В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области

Т·Г·Т·У

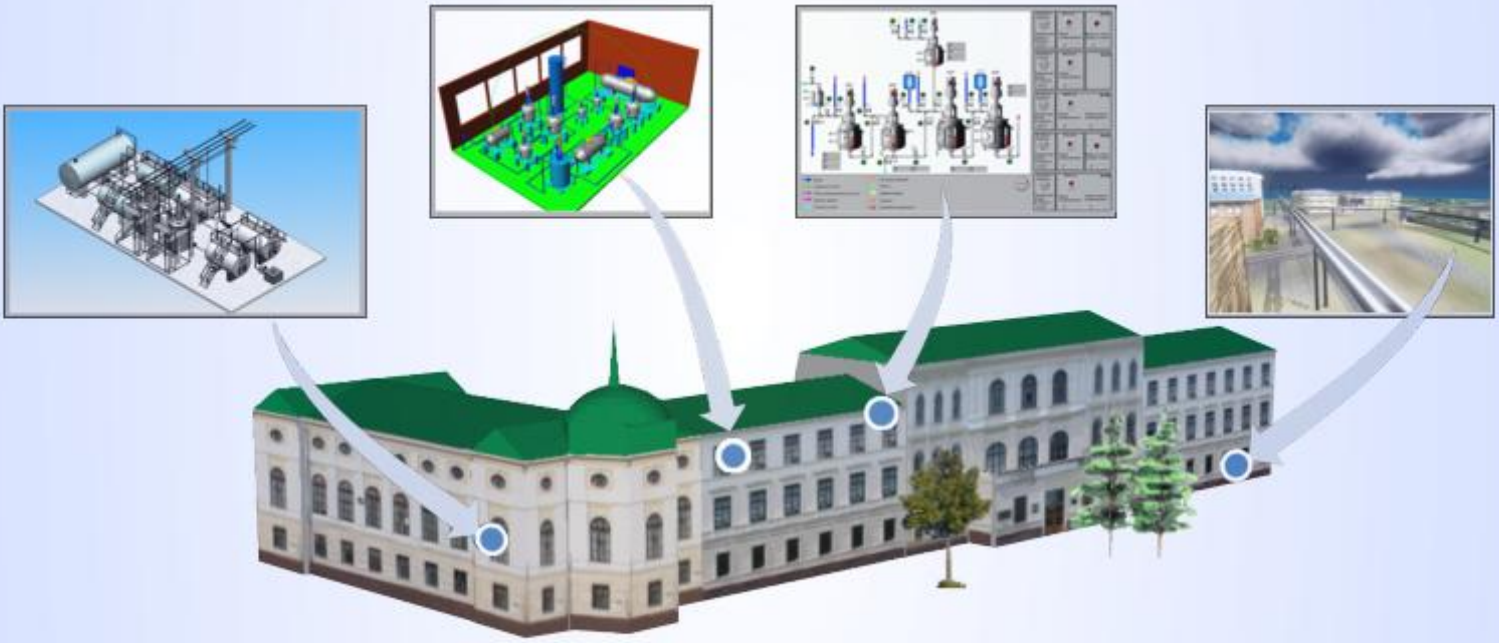
Всероссийский Фестиваль науки

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Выпуск 5, Том I

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

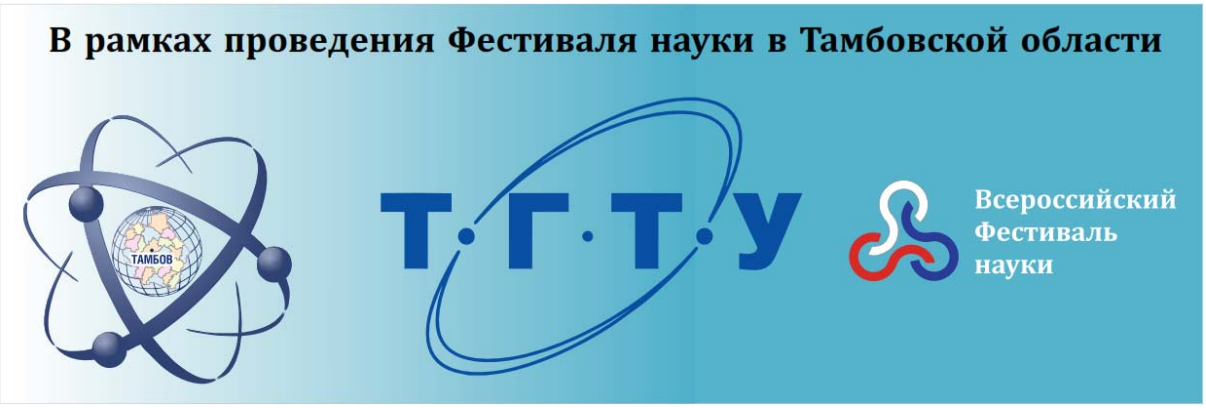
Issue 5, Volume I



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»



ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Материалы V Международной научно-практической конференции

г. Тамбов, 14 – 16 ноября 2018 г.

Выпуск 5, Том I

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 5, Volume I

Научное электронное издание

Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2018

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43
В52

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор М. Н. Краснянский (общая редакция);
д-р техн. наук, профессор В. А. Немтинов;
д-р. техн. наук, профессор В. Г. Мокрозуб;
д-р техн. наук, профессор С. В. Карпушкин;
канд. экон. наук Ю. В. Немтинова;
канд. техн. наук, доцент А. Б. Борисенко;
канд. техн. наук С. В. Карпов

В52 **Виртуальное** моделирование, прототипирование и промышленный дизайн [Электронный ресурс] : материалы V Международной научно-практической конференции : в 3 т. / под общ. ред. М. Н. Краснянского ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5.
ISBN 978-5-8265-1836-6.

Т. I. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 18,2 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-1996-7.

Опубликованы материалы пленарных и секционных докладов Международной научно-практической конференции, которая посвящена проблемам научно-технического и социально-экономического развития регионов. Целью конференции является обсуждение и публикация научных достижений ученых, а также определение возможных путей решения проблем разработки методов и алгоритмов создания и применения виртуальных моделей и прототипов объектов различного назначения и сложности.

В настоящее время виртуальное моделирование и прототипирование технических систем широко используется при решении задач промышленного дизайна, проектирования, модернизации, перепрофилирования производств различных отраслей промышленности. Еще одна популярная сфера применения виртуального моделирования и прототипирования – создание моделей культурно-исторических объектов в целях сохранения первозданного облика памятников архитектуры, в том числе утраченных, мемориальных и культурных сооружений.

Материалы конференции могут быть полезны преподавателям вузов и средних учебных заведений, научным работникам, руководителям и специалистам предприятий, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

Все научные работы, представленные на конференцию, прошли двойное рецензирование программным комитетом и редакционной коллегией.

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43

ISBN 978-5-8265-1996-7 (т. I)
ISBN 978-5-8265-1836-6 (общ.)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2018

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Министерство образования и науки Российской Федерации
- Российский фонд фундаментальных исследований
- Ассоциация инженерного образования России
- Управление образования и науки Тамбовской области
- ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Конференция проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-20042\18) и Управления образования и науки Тамбовской области (проект 1-НМ-18).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Приходько Вячеслав Михайлович – председатель программного комитета, советник ректора ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН.

Краснянский Михаил Николаевич – сопредседатель программного комитета, ректор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» («ТГТУ»), д-р техн. наук, проф., профессор РАН.

Воеводин Владимир Валентинович – сопредседатель программного комитета, зам. директора НИВЦ МГУ, зав. кафедрой суперкомпьютеров и квантовой информатики ВМК МГУ, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН.

Мищенко Сергей Владимирович – почетный ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Позднеев Борис Михайлович – директор ИИСТ ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин», д-р техн. наук, проф.

Дворецкий Станислав Иванович – советник при ректорате ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Монастырев Павел Владиславович – директор Института архитектуры, строительства и транспорта ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Громов Юрий Юрьевич – директор Института автоматики и информационных технологий ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Тютюнник Вячеслав Михайлович – профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ», генеральный директор Международного Информационного Нобелевского Центра, д-р техн. наук, проф.

Куликов Геннадий Михайлович – исполнитель государственной работы «Организация проведения научных исследований» в ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р физ.-мат. наук, проф.

Каррера Эразмо – профессор аэрокосмических конструкций и аэроупругости Туринского политехнического института, Турин (Италия), д-р техн. наук, проф.

Нобель Микаэл Свен – учредитель и глава Нобелевского благотворительного фонда, полный профессор университета Сока (Япония), д-р наук, проф. (Стокгольм, Швеция).

Горлач Сергей Петрович – зав. кафедрой «Параллельные и распределенные системы» Вестфальского университета имени Вильгельма, г. Мюнстер (Германия), д-р наук, проф.

Яегер Магнус – заместитель декана факультета экономического инжиниринга Восточно-Баварского института Амберг-Вайден (Германия), проф.

Аверченков Владимир Иванович – зав. кафедрой «Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Остроух Андрей Владимирович – профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», д-р техн. наук, проф.

Сердюк Анатолий Иванович – директор Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д-р техн. наук, проф.

Морозов Михаил Николаевич – зав. кафедрой информатики и системного программирования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», канд. техн. наук, проф.

Малыгин Евгений Николаевич – профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Фролов Сергей Владимирович – зав. кафедрой «Биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Немтинов Владимир Алексеевич – председатель, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (КИСМ) ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Соколов Михаил Владимирович – зам. председателя, председатель совета молодых ученых ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, доцент.

Карпушкин Сергей Викторович – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Мокрозуб Владимир Григорьевич – профессор, и.о. зав. кафедрой КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р. техн. наук, проф.

Егоров Сергей Яковлевич – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Секретари конференции

Борисенко Андрей Борисович – доцент кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. техн. наук, доцент.

Немтинова Юлия Владимировна – доцент кафедры «Экономический анализ и качество» ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. экон. наук.

Карпов Сергей Владимирович – доцент кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. техн. наук.

ORGANIZERS

- Ministry of Education and Science Russian Federation
- Russian Foundation for Basic Research
- Association for Engineering Education of Russia
- Department of Education and Science in the Tambov Region
- Tambov State Technical University

CONFERENCE PROGRAM COMMITTEE

Prikhodko Vyacheslav Mikhailovich – Chairman of the Program Committee, Rector's counselor of Moscow State Automobile and Road Technical University, Dr. Tech. Sci., Prof., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences.

Krasnyanskiy Mikhail Nikolaevich – Co-Chairman, Rector of Tambov State Technical University (TSTU), Dr. Tech. Sci., Prof., professor of the Russian Academy of Sciences.

Voevodin Vladimir Valentinovich – Co-Chairman of the Program Committee, Deputy Director research computing center of Moscow state University, Dr. Tech. Sci., Prof., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences.

Mischenko Sergey Vladimirovich – Honored Rector of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Pozdneev Boris Mikhailovich – Vice-Rector for Quality Management of MSTU "STANKIN", Dr. Tech. Sci., Prof.

Dvoretskiy Stanislav Ivanovich – TSTU Rectorate's Counselor, Dr. Tech. Sci., Prof.

Monastirev Pavel Vladislavovich – Director of the Institute of Architecture, Civil Engineering and Transport of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Gromov Yury Yurievich – Director of the Institute of Automation and Information Technologies of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Tyutyunnic Vyacheslav Mikhailovich – Professor of the Department of Construction of Radio-Electronic and Microprocessor Systems of TSTU, CEO of International Information Nobel Center, Dr. Tech. Sci., Prof.

Kulikov Gennady Mikhailovich – Principal Investigator of TSTU, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.

Carrera Erasmo – Full Professor of Aerospace Structures and Aeroelasticity of the Torino Polytechnic Institute, Turin (Italy), Ph. D., Prof.

Nobel Sven Michael – Founder and Head of Nobel Charitable Foundation, Full Professor of the University of Soka (Japan), Ph. D., Prof. (Stockholm, Sweden).

Gorlatch Sergei Petrovich – Head of the Department of Parallel and Distributed Systems of the University of Münster (Germany), Dr. Habil., Prof.

Jaeger Magnus – Deputy Dean of the Faculty of Economic Engineering of Amberg-Weiden University of Applied Sciences (Germany), Dr.-Ing., Prof.

Averchenkov Vladimir Ivanovich – Head of the Department of Computer Technologies and Systems of Bryansk State Technical University, Dr. Tech. Sci., Prof.

Ostroukh Andrey Vladimirovich – Professor of the Department of Automated Control Systems of Moscow State Automobile and Road Technical University, Dr. Tech. Sci., Prof.

Serdyuk Anatoliy Ivanovich – Director of Aerospace Institute of Orenburg State University, Dr. Tech. Sci., Prof.

Morozov Mikhail Nikolaevich – Head of the Department of Computer Science and System Programming Volga State University of Technology, Cand. Tech. Sci., Prof.

Malygin Evgeniy Nikolaevich – Professor of the Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Frolov Sergey Vladimirovich – Head of the Department of Biomedical Engineering of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

ORGANIZING COMMITTEE

Nemtinov Vladimir Alexeevich – Chairman, Professor of the Department of "Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering" (CISME) of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Sokolov Mikhail Vladimirovich – Deputy Chairman, Chairman of the Council of Young Researcher of TSTU, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof.

Karpushkin Sergey Victorovich – Professor of the Department of CISME of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Mokrozub Vladimir Grigorievich – Professor, Head of the Department of CISME of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Egorov Sergey Yakovlevich – Professor of the Department of CISME of TSTU, Dr. Tech. Sci., Prof.

Secretaries of the conference

Borisenko Andrey Borisovich – Associate Professor of the Department of CISME of TSTU, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof.

Nemtinova Yulia Vladimirovna – Associate Professor of the Department of "Economic analysis and quality" of TSTU, Cand. Econ. Sci.

Karpov Sergey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of CISME of TSTU, Cand. Tech. Sci.

СОДЕРЖАНИЕ

Приглашенные пленарные доклады …… 13

Аггашян Р. В., *Маргаров Г. И.* Анализ современных угроз информационной безопасности в системах виртуального моделирования …… 14

Borisenko A. B., *Gorlatch S. P.* Toward High-performance Solutions for Batch Plants Design: an Overview …… 20

Корнаев А. В., *Савин Л. А.*, *Корнаева Е. П.* Математические модели и программные средства расчета, диагностики и управления траекториями движения роторов ……. 28

Малыгин Е. Н., *Карпушкин С. В.*, *Краснянский М. Н.*, Мокрозуб *В. Г.*, *Глебов А. О.*, *Карпов С. В.* Моделирование и оптимизация высокоточных технических объектов 35

Позднеев Б. М., *Толок А. В.*, *Овчинников П. Е.*, *Куприяненко И. А.*, *Левченко А. Н.*, *Шароватов В. И.* Моделирование архитектуры и обеспечение интероперабельности систем управления цифровым предприятием на основе Индустрии 4.0 ……... 41

Ганиев А. А., *Гуломов Ш. Р.* Сетевые атаки и их последствия в компьютерных сетях 49

Львов А. А., *Кузин С. А.*, *Светлов М. С.*, *Львов П. А.* Моделирование распределенной системы датчиков давления на основе беспроводного радиоканала связи …….. 54

Муталов Ш. А., *Хужамшукуров Н. А.* Усовершенствование системы высшего химико-технологического образования в Узбекистане …….. 61

Пупыкина А. А., *Очеповский А. В.*, *Гущина О. М.*, *Насонов Д. А.* Алгоритм определения границ зубных коронок для сегментации 3D-модели челюсти …….. 64

Секция I. Виртуальное моделирование, визуализация и прототипирование технических систем …..…… 71

Колотвин А. В., *Колотвин Д. А.* Виртуальное моделирование и оценка работоспособности многослойных пластин …… 72

Никулин С. С., *Левин А. Г.*, *Кузнецов А. В.* Моделирование температурного поля в полимерном изделии с металлизированным покрытием …… 77

Ламскова М. И., *Филимонов М. И.*, *Новиков А. Е.*, *Самофалова Л. В.*, *Павлова С. В.* Моделирование процесса разделения системы жидкость–твердое тело в батарее гидроциклонов …… 81

Тимохин П. Ю., *Финагин Л. А.* Сверхбольшие текстуры для моделирования огней ночных городов земли в космических видеотренажерах ……... 88

Тимохин П. Ю., *Омельченко Д. В.* Метод визуализации в масштабе реального времени результатов моделирования неустойчивого вытеснения нефти на экранах сверхвысокого разрешения ……... 93

Седых И. А., *Демахин Д. С.* Программная реализация имитационной модели процесса формирования транспортных потоков на двух перекрестках ……... 99

Ершов Д. А., *Никитенко М. С.* Методы тайловой и кластерной визуализации сложных трехмерных сцен …… 105

Колотвин Д. А., *Решетов С. Ю.*, *Клещарева А. В.* Моделирование цеха по ремонту и обслуживанию грузовых автомобилей ……. 110

Бельченко Ф. М., Сосенушкин С. Е. Применение профессиональных средств компьютерной графики и моделирования для разработки виртуальных моделей робототехнических комплексов …… 115

Алехин П. А., *Хлебников В. А.*, *Хрусталев Р. В.* Применение методов топологической оптимизации для создания новых конструкций радиаторов пассивного охлаждения ……. 124

Першин В. Ф., *Алхило З. А. А.*, *Баранов А. А.*, *Меметов Н. Р.*, *Туголуков Е. Н.* Компьютерное моделирование движения вязкой графеносодержащей жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками ……... 131

Киселев К. И., *Шестаков К. В.*, *Хорохорина И. В.*, *Абоносимов О. А.*, *Лазарев С. И.* Моделирование явлений переноса веществ в электрохимических мембранных процессах на основе фрикционной теории …… 137

Хамраева А. М. Моделирование оценки микробиоценоза ротовой полости у пациентов в стоматологической практике ……... 144

Рогов И. В., *Майникова Н. Ф.* Задание теплового воздействия в методе периодического нагрева для неразрушающего определения теплофизических свойств …….. 150

Бочарова А. Н., *Черемисин А. П.*, *Архипов А. Е.* Моделирование технологического оборудования для виртуальной реальности …… 155

Морозов Н. А., *Гаврилов А. А.*, *Коваль С. Ю.*, *Захаров И. С.*, *Галкин А. А.* Моделирование колебаний треснувшей профильной трубы …….. 160

Оськин С. В., *Овсянников Д. А.*, *Цокур Д. С.* Моделирование физических процессов зимней агрегации пчел ……... 166

Корзина М. И., *Сковородкин С. С.* Применение технологии дополненной реальности в энергетических системах ……. 175

Терюшков В. П.,*Чупшев А. В.*, *Коновалов В. В.*, *Родионов Ю. В.* Моделирование работы барабанных устройств на основе силового анализа …….. 178

Ванин В. А., *Романова Е. В.*, *Григорян В. С.* Построение и оптимизация формообразующих цепей на основе гидравлических связей в станках со сложными движениями формообразования ……... 185

Ванин В. А., *Романова Е. В.*, *Григорян В. С.* Оптимальное построение кинематической структуры станков на основе гидравлических связей в виде шагового гидропривода …… 189

Бобылев А. И., *Коновалов В. В.*, *Терюшков В. П.*, *Фомин А. С.* Моделирование изменения геометрии материала в цилиндрической емкости ……... 193

Дедов Д. Л., *Архипов А. Е.*, *Черемисин А. П.*, *Бочарова А. Н.* Разработка управляемой беговой дорожки для интеграции технологий виртуальной реальности …… 206

Подвальный С. Л., *Бредихин А. В.*, *Школьникова Ю. М.* Подход к организации производственной мультиагентной системы …….. 211

Солдатов А. В., *Фидаров В. Х.* Исследование влияния жесткости (упругих деформаций) технологической системы токарного станка на точность обработки …….. 218

Селиванова З. М., *Куренков Д. С.*, *Хоан Т. А.* Виртуальное моделирование интеллектуальных информационно-измерительных систем теплофизических свойств материалов и изделий …… 225

Акжигитов И. И., *Авдеева О. В.* Математическая модель напорного устройства ….. 231

Пахомов А. Н., *Гатапова Н. Ц.*, *Пахомова Ю. В.* Моделирование поверхности капли жидкости, высыхающей на подложке ……... 237

Черемисин А. П., *Бочарова А. Н.*, *Архипов А. Е.* Применение топологической оптимизации при проектировании транспортных средств …… 243

Сиухин А. А., *Зверев М. В.*, *Балашов П. В.* Особенности процесса профилирования дорожного полотна при строительстве …… 247

Сиухин А. А., *Зверев М. В.*, *Балашов П. В.* Применяемые системы нивелирования при строительстве дорожного полотна …… 253

Галлямов А. К вопросу о повышении эффективности измерительных систем концентрации пылегазовзвеси при добыче полезных ископаемых …….. 259

Седых И. А. Разработка нечетких окрестностных моделей цементного производства 265

Овечкин Н. В., *Курнасова Я. Л.*, *Артамонов Р. П.*, *Серебрянкин В. А.* Механизм захвата промышленного робота для выполнения специальных операций …….. 270

Кадиев Р. А. Современный методический инструментарий прогнозирования долговечности железобетонных конструкций …….. 275

Ведищев С. М., *Прохоров А. В.*, *Хольшев Н. В.*, *Выгузов М. Е.* Модель формирования дозы в барабанном дозаторе с подвижными лопатками в ячейках …… 280

Ванин В. А., *Колодин А. Н.* Структура формообразующих цепей резьбофрезерного станка на основе шагового гидропривода ……... 289

Колодин А. Н., *Родина А. А.*, *Олейникова Ю. С.*, *Аршинникова Т. А.*, *Белякова К. А.* Построение формообразующих цепей токарных станков на основе шагового гидропривода 294

Голованчиков А. Б., *Прохоренко Н. А.*, *Меренцов Н. А.*, *Анцыперов С. А.*, *Черикова К. В.* Влияние продольной диффузии на уравнения рабочих линий в процессах ректификации бинарных смесей …… 300

Ванин В. А., *Колодин А. Н.*, *Олейникова Ю. С.*, *Аршинникова Т. А.*, *Белякова К. А.* Синхронные связи в станках на основе шагового гидропривода ……. 307

Ванин В. А., *Колодин А. Н.* Оптимальное построение структуры внутренних цепей токарно-затыловочных станков …… 313

Фомичев М. В. Методология оценки достоверности имитационной модели …….. 318

Сергеева А. С., *Немтинов В. А.*, *Немтинова Ю. В.* Карта потока создания ценности в бережливом производстве …….. 325

Меренцов Н. А., *Персидский А. В.*, *Топилин М. В.*, *Лебедев В. Н.*, *Балашов В. А.*, *Голованчиков А. Б.* Экспериментальная установка для исследования гидродинамики и тепломассообмена в насадочных контактных устройствах …….. 332

Куликова Е. Г., *Ефремова С. Ю.*, *Коновалов В. В.*, *Гумаров Г. С.* Моделирование роста высоты растений томата с учетом влияния ламп искусственного освещения 341

Макухин А. Г., *Кроль О. С.*, *Синдеева Е. В.*, *Сыровой Г. В.* Оптимизация режимов резания при фрезеровании на станке модели СФ68 ……... 347

Зайцев В. Ю., *Коновалов В. В.*, *Родионов Ю. В.* Заклинивания ручного заклепочника – проблема, решение, визуализация …… 353

Филинов Е. П., *Остапюк Я. А.* Концептуальное проектирование малоразмерных газотурбинных двигателей для перспективных беспилотных летательных аппаратов ……. 363

Филинов Е. П., *Остапюк Я. А.* Уточнение математической модели массы малоразмерных турбореактивных двухконтурных двигателей ……. 367

Долбин Р. А., *Минин Ю. В.*, *Нурутдинов Г. Н.* Выявление критичных элементов сетевой информационной системы …….. 371

Егорова Е. А., *Лисицын А. С.* Способ совмещения изображений срезов мультиспиральной компьютерной томографии и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии легких ……. 377

Акулинин Е. И., *Голубятников О. О.*, *Дворецкий Д. С.*, *Дворецкий С. И.* Короткоцикловые адсорбционные процессы с циклически изменяющимся давлением для очистки и разделения газовых смесей ……. 382

Семенов Д. Д., *Коновалова К. Н.* Виртуальная модель системы регулирования давления и температуры …… 388

Райкин Л. И., *Субботина М. Н.*, *Стефанова М. В.*, *Федорова Т. О.* Технологические платформы для создания информационных моделей промышленных объектов и сооружений на этапах их жизненного цикла …….. 392

Костюкова А. П., *Костюкова Т. П.* Разработка модифицированного метода параметрической оптимизации устройств разрядно-импульсной электротехнологии ….. 400

Хорохорина И. В., *Лазарев С. И.*, *Кочетов В. И.* Моделирование ультрафильтрационного процесса очистки промышленных растворов от поверхностно-активных веществ …… 405

Ли В. Г. Геометрические средства построения видеоряда рабочей зоны внекорабельной деятельности космонавта в виртуальной среде моделирования …… 408

Дмитриев О. С., *Худяков В. В.*, *Дмитриев А. О.* Моделирование массопереноса при отверждении полимерных композитов …… 413

Лазарев С. И., *Ковалев С. В.*, *Коновалов Д. Н.* Совершенствование конструкции электробаромембранного аппарата …….. 417

Новиков А. Е., *Борисенко И. Б.*, *Чамурлиев О. Г.*, *Чамурлиев Г. О.*, *Плющиков В. Г.* Волновое разрушение закрытых почвогрунтов …….. 422

Василевский К. С., *Оневский М. П.* Параметрическая идентификация математической модели установки «искусственные легкие» ……... 429

Лазарев С. И., *Родионов Д. А.*, *Ковалев С. В.* Промышленный дизайн электробаромембранного аппарата рулонного типа ……... 438

Морозов Н. А., *Гаврилов А. А.*, *Морозова И. А.* Моделирование деформации очищаемого материала в центрифугах с регулируемым сдвигом потока …… 442

Морозов Н. А., *Морозова И. А.*, *Гаврилов А. А.* Моделирование движения частиц твердой фазы в центрифугах с регулируемым сдвигом потока …… 447

Минаев С. Г., *Грудинин Н. С.*, *Телепина А. А.*, *Ищенко Д. А.* Устройства дополненной реальности на производстве …….. 452

Ванин В. А., *Колодин А. Н.*, *Родина А. А.*, *Фидаров В. Х.*, *Скоморохова А. И.* Гидравлические связи с цифровой пневматической (струйной) системой управления во внутренних цепях зуборезных станков …… 456

Ванин В. А., *Колодин А. Н.*, *Родина А. А.*, *Фидаров В. Х.*, *Казанков А. А.*, *Воронина М. В.* Применение пневматической (струйной) системы для управления внутренними гидравлическими связями зубообрабатывающих станков ……. 462

Ванин В. А., *Колодин А. Н.* Реализация построения гидравлических внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе шагового гидропривода ……... 467

Лазарев С. И., *Игнатов Н. Н.* Полуэмперический подход в описании коэффициента задержания в электробаромембранных процессах разделения растворов ……... 473

Лебедь Н. И., *Аверина М. Б.* Моделирование взаимодействия плодоовощного сырья с режущим аппаратом ломтикового измельчителя …… 477

Родина А. А., *Белякова К. А.*, *Колодин А. Н.* САПР гальванических линий ……. 484

Карпушкин С. В., *Афанасенков В. Л.*, *Тюрин Р. Э.* Определение поверхностной мощности омических нагревателей в плитах гидравлических прессов ……... 489

Невиницын В. Ю., *Лабутин А. Н.*, *Волкова Г. В.* Синтез и моделирование нелинейной робастной системы управления температурой в химическом реакторе ……... 494

Карпушкин С. В., *Корнилов К. С.*, *Афанасенков В. Л.* Сравнительный анализ эффективности способов нагрева плит гидравлических прессов …… 501

Карпушкин С. В., *Глебов А. О.*, *Корнилов К. С.* Применение аппроксимаций кривых намагничивания для расчета полей вихревых токов в ферромагнитных материалах 508

Мокрозуб В. Г., *Попов А. В.*, *Калистратов М. С.*, *Пыкин И. С.* Графическое представление задачи структурного синтеза технологического оборудования …….. 514

Мокрозуб В. Г., *Попов А. В.*, *Калистратова И. В.*, *Пыкин И. С.* Использование графов для представления задачи расчета числа и размеров аппаратов химико-технологических систем …… 519

Шуваева А. М., *Яковлев А. В.* Аппаратная реализация мандатного разграничения доступа на основе RFID-технологии …… 524

Арапов Д. В., *Тихомиров С. Г.*, *Подвальный С. Л.*, *Денисенко В. В.*, *Авцинов И. А.* Моделирование каталитического процесса синтеза винилацетата на основе этилена 531

Мокрозуб В. Г., *Попов А. В.*, *Мокрозуб В. А.*, *Пыкин И. С.* Представление задач размещения оборудования и трассировки трубопроводов химико-технологических систем в виде графов …….. 539

Мокрозуб В. Г., *Малыгин Е. Н.* Декомпозиция задачи аппаратурного оформления химико-технологических систем …….. 544

Мартьянов Е. И., *Малыгин Е. Н.* Применение систем автоматизированного расчета для проектирования лопастных мешалок …… 549

Бобылев В. Ю., *Телепина А. А.*, *Ищенко Д. А.* Перспективы использования виртуального прототипирования в современном машиностроении …….. 554

Егоров С. Я., *Золотов Д. А.* Экономические аспекты сетевого планирования остановочных ремонтов машиностроительных производств …….. 558

Яковлев А. В., *Савилова У. А.*, *Шибков Д. А.*, *Яковлева Д. А.* Разработка программно-аппаратного комплекса для тестирования на проникновение через уязвимость Bad USB ……... 560

Яковлев А. В., *Савилова У. А.*, *Шибков Д. А.*, *Яковлева Д. А.* Предпосылки реализации атак класса Bad USB ……. 566

Рыжков А. В., *Мачкарин А. В.* Моделирование дискового почвообрабатывающего орудия с пружинным спиральным катком …….. 572

Колодин А. Н. Струйная система управления шаговым приводом ……... 577

Колодин А. Н. Оптимальное построение структуры внутренних цепей станков ……. 582

Голованчиков А. Б., *Прохоренко Н. А.*, *Шибитова Н. В.*, *Романенко М. Д.*, *Залипаева О. А.* Моделирование процесса ректификации с учетом продольной диффузии ……. 586

Кроль О. С., *Соколов В. И.* 3D-моделирование угловой шпиндельной головки обрабатывающего центра …….. 593

Тугашова Л. Г. Применение фильтра Калмана для идентификации параметров процессов нефтепереработки …… 602

Торгашев М. А., *Страшнов Е. В.* Методы адаптивного управления виртуальными роботами на основе датчиков сенсорного очувствления ……... 606

Страшнов Е. В., *Мальцев А. В.* Разрешение коллизий систем шарнирно связанных тел с применением блочного подхода ……. 612

Мальцев А. В., *Страшнов Е. В.* Методы визуализации 3D-объектов с учетом физических свойств их материалов …….. 616

Мальцев А. В., *Тимохин П. Ю.* Методы нахождения коллизий систем частиц с объектами виртуальной среды ……... 620

Соколов В. И., *Кроль О. С.*, *Степанова О. Г.* Нелинейное моделирование электрогидравлического привода технологического оборудования …….. 627

Кушнир А. П., *Асадова Ю. С.* Моделирование уплотнений неподвижных соединений …… 634

Глотова Т. С., *Ромащенко М. А.*, *Федоров С. М.*, *Глотов В. В.* Основные уровни обеспечения электромагнитной совместимости ……. 639

Дежа А. А., *Соколов М. В.* Способ повышения качества обработки деталей из алюминиевых сплавов на токарных станках с ЧПУ …….. 643

Долотов С. В., *Соколов М. В.* Способ повышения качества заготовок деталей из алюминиевых сплавов для токарных станков с ЧПУ …… 647

Бровкин К. А., *Фидаров В. Х.* Исследование влияния режимов резания и геометрических параметров резца на шероховатость при чистовом точении …… 651

Бровкин К. А., *Фидаров В. Х.* Исследование влияния обработки материала деталей на их внутренние свойства …… 656

Бровкин К. А., *Фидаров В. Х.* Исследование стойкости инструментальных материалов при обработке заготовок из отбеленного чугуна ……. 663

Богатырев А. О. Исследование температурных полей в полимерно-металлическом изделии …… 667

Наумов Э. О., *Соколов М. В.* Выбор рациональных технологических параметров обработки деталей из нержавеющих сталей на токарных станках с ЧПУ ……... 672

Харин Д. А., *Соколов М. В.* Выбор рациональных технологических параметров обработки деталей из цветных металлов на токарных станках с ЧПУ ……. 679

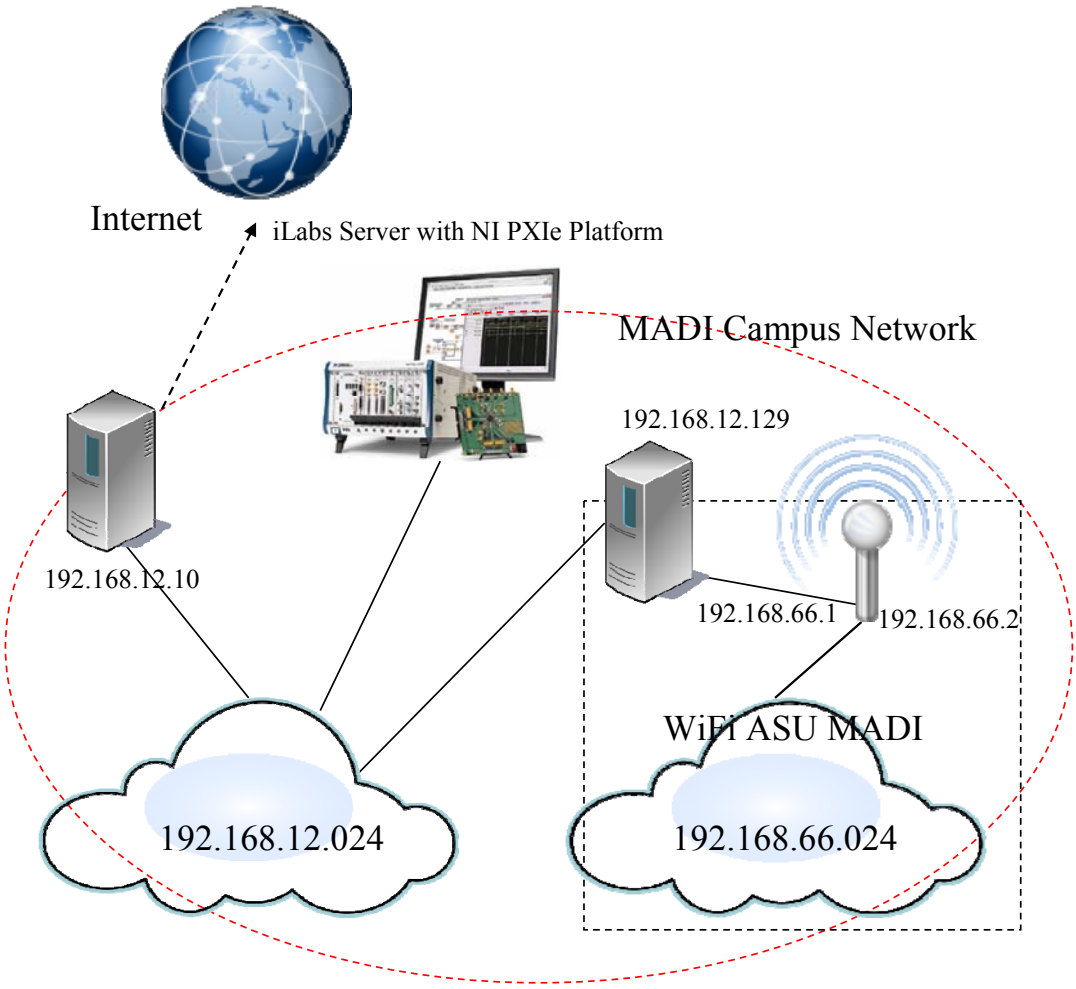
Штрак А. В. Расчет освещения в DIALUX ……. 686

Иванова О. Г., *Аль-Матари Н. А.*, *Саид Б. М. Г.* Математическое моделирование случайного процесса с заданными статистическими характеристиками ……. 691

Лоскутова А. Д., *Королева И. Л.* Моделирование электрофизических процессов в полевой полупроводниковой структуре …… 694

Сычев М. В., *Родионов Ю. В.*, *Никитин Д. В.* Основные направления проектирования энергоэффективных жидкостно-кольцевых вакуумных насосов ……... 700

ПРИГЛАШЕННЫЕ ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ



УДК 004.49

Аггашян Р. В.[1], Маргаров Г. И.[2]
Национальный политехнический университет Армении, Армения, г. Ереван
[1](Тел. +374 93 520520, e-mail: rubag@seua.am),
[2](Тел. +374 93 401895, e-mail: gmargarov@gmail.com)

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Aghgashyan R. V.[1], Margarov G. I.[2]
National Polytechnic University of Armenia, Armenia, Yerevan
[1](Tel. +374 93 520520, e-mail: rubag@seua.am),
[2](Tel. +374 93 401895, e-mail: gmargarov@gmail.com)

ANALYSIS OF MODERN THREATS TO INFORMATION SECURITY IN VIRTUAL SIMULATION SYSTEMS

Аннотация. Современные многоуровневые системы виртуального моделирования, как правило, строятся на базе информационной инфраструктуры, включающей не только отдельные компьютеры, подключенные к Интернету, но и множество серверов с подключенными к ним конечными точками. Конечные точки в последнее время подвергаются угрозам информационной безопасности, наиболее опасными среди которых являются атаки вымогательства. Представлены характер и основные принципы осуществления таких атак. Приводятся рекомендации по обнаружению и предотвращению атак, а также сформулированы основные рекомендации по управлению защитой от них.

Ключевые слова: система виртуального моделирования, угроза информационной безопасности, конечная точка, атака вымогательства, обнаружение атак, предотвращение атак, управление защитой от атак.

Abstract. Modern multi-level virtual simulation systems are usually built on the basis of the information infrastructure, including not only individual computers connected to the Internet, but also a lot of servers with endpoints connected to them. Endpoints have recently been exposed to information security threats, the most dangerous of which are ransomware attacks. The nature and basic principles of such attacks are presented. Recommendations on the detection and prevention of attacks are provided, as well as the main recommendations for managing protection against them are formulated.

Keywords: virtual simulation system, information security threats, endpoint, ransomware attack, attack detection, attack prevention, attack protection management.

Современные многоуровневые системы виртуального моделирования, как правило, строятся на базе информационной инфраструктуры начиная от отдельного компьютера, подключенного к Интернету, кончая сложными системами, состоящими из нескольких серверов и подключенных к ним рабочих станций [1]. Учитывая важность человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности, самым слабым звеном такой инфраструктуры являются рабочие станции или, другими словами, конечные точки, которые в последнее время все чаще подвергаются угрозам информационной безопасности [2]. В этой связи анализ таких угроз и управление защитой от них становятся

актуальной проблемой для специалистов по моделированию и информационной безопасности.

Существующие угрозы информационной безопасности на уровне конечных точек можно разделить на три основные группы [3]:

– атака раскрытия и модификации, при которой противник получает доступ к содержанию конфиденциальной информации и может изменить ее;

– атака выборочной утечки, при которой противник угрожает опубликовать специально отобранную информацию с атакованного компьютера;

– атака полного блокирования, при которой противник блокирует большинство данных посредством шифрования.

Применение достаточно стойкой криптографии позволяет защититься от атак раскрытия и модификации за счет обеспечения высокого уровня секретности, надежного контроля целостности и многоуровневой аутентификации [4]. В некоторых случаях при локальном хранении данных возможно обеспечение совершенной секретности, при которой раскрытие информации не представляется возможным даже теоретически [5].

Защита от атак выборочной утечки также может быть осуществлена средствами стойкой криптографии при условии, что все чувствительные данные хранятся и передаются в зашифрованном виде, иными словами, при обеспечении высокого уровня секретности чувствительных данных.

По существу, наибольшую опасность представляют атаки полного блокирования, которые часто называются атаками вымогательства (Ransom ware attack). В последние годы наблюдается значительный рост разнообразия и частоты таких атак, которая достигает более 4000 случаев в день [6]. При этом, число таких атак по всему миру активно растет, так как для потенциальных противников это может быть достаточно простым, но эффективным источником нелегального дохода, особенно, учитывая тот факт, что средства осуществления таких атак можно приобрести в так называемой «темной сети» (Darknet) и использовать их, не имея особых специальных профессиональных навыков [7]. Тем не менее, можно ожидать, что в обозримом будущем разнообразие атак вымогательства может уменьшиться на фоне значительного повышения уровня их продуманности и изощренности. В результате угрозы информационной безопасности могут стать более значительными, особенно для критических и наукоемких инфраструктур, таких как системы виртуального моделирования.

В случае атаки вымогательства на компьютере жертвы большинство рабочих файлов (например, все файлы с наиболее распространенными расширениями) шифруются. При этом атакуемый компьютер остается работоспособным, но почти все пользовательские файлы становятся недоступными, а инструкция и ключ для дешифрования файлов атакующий обещает отправить за вознаграждение.

Для управления обнаружением и предотвращением атак вымогательства важно вначале проанализировать, как сами атаки выполняются. Анализ показывает, что большинство атак выполняется в следующей фиксированной последовательности:

– **доставка вредоносной программы** на сервер хостинга через уязвимости в программном обеспечении сервера или компьютера потенциальной жертвы, а также с использованием фишинга и методов социальной инженерии;

– **загрузка вредоносной программы** с сервера на целевой компьютер в ходе фонового обмена информацией;

– **исполнение вредоносной программы** и компрометация целевого компьютера путем нахождения и использования соответствующей уязвимости в программном обеспечении для достижения поставленной цели;

– **шифрование файлов** на целевом компьютере и отправка на сервер злоумышленника ключа шифрования, а также необходимой информации о компьютере и сервере жертвы;

– **уведомление пользователя** с информацией о зашифрованности файлов и инструкцией о том, что необходимо сделать (заплатить выкуп) для получения ключа дешифрования, а также активация обратного отсчета времени до безвозвратного уничтожения файлов.

Очень важно как можно быстрее организовать обнаружение, чтобы иметь возможность предотвратить атаку, которая на самом деле способна зашифровать файлы в течение нескольких минут. Таким образом, обнаружение в режиме реального времени на компьютере жертвы и сервере хостинга рекомендуется реализовать в соответствии со следующими шагами, которые имеют решающее значение:

– **сканирование уязвимостей и инвентаризация файлов.** Подробное знание того, что происходит в любой момент в информационной системе, включая локальные и облачные файлы, имеет важное значение для понимания масштабов любого инцидента с безопасностью. Поскольку целью атаки вымогательства являются наиболее ценные (пользовательские) файлы, очень важно наличие их обновленной и надежной инвентаризации для обеспечения безопасности в случае атаки;

– **контроль и обнаружение вторжений.** Несмотря на то, что атаки вымогательства трудно обнаружить заранее, с хорошей системой предотвращения вторжений атака может быть обнаружена достаточно быстро, так, чтобы можно было предотвратить ее успешное завершение;

– **мониторинг целостности файлов.** Бóльшая часть вредоносных программ запускает некоторые системные процессы и получает прямой доступ к системным файлам, что в большинстве случаев не является частью обычных системных операций. При этом технология контроля целостности файлов может генерировать предупреждение, как только критический системный файл обновляется, изменяется или перемещается. Это, конечно же, не может помешать началу процесса шифрования файлов, но может помешать дальнейшему распространению атаки, позволяя быстро изолировать компрометированную систему;

– **интеграция и автоматический запуск средств безопасности.** Быстрый оперативный отклик является критическим фактором успеха в любой аварийной ситуации, включая атаки вымогательства. Чем быстрее будет обнаружена вредоносная программа и предпринята соответствующая реакция на потенциальную атаку, тем больше вероятность предотвращения большого урона. Современные инновации в области автоматизации управления безопасностью значительно улучшили реакцию на угрозы и инциденты, обеспечив совместное скоординированное функционирование различных средств безопасности, которые могут эффективно интегрироваться в единую платформу управления [8]. Такой подход, по существу, обеспечивает немедленное разъединение доступа к сети и изоляцию конечных точек, как только действия, связанные с вымогательством, будут обнаружены на уровне сервера хостинга;

– **управление мониторингом и анализом журналов.** Один из важных промежуточных следов практически любой атаки можно обнаружить в системных журналах, журналах доступа и активности, журналах приложений и т.д. В то же время проблема обнаружения доступа противника к этим журналам довольно сложна из-за огромного объема и бесконечной разновидности этих журналов, что делает необходимым автоматизацию корреляции событий, например, в рамках технологии управления информацией и событиями безопасности (Security Information and Event Management – SIEM) для анализа этих журналов и предупреждения о начале атаки, что, в свою очередь, позволит остановить ее распространение [9];

– **объединение обновленной информации об угрозах с мониторингом безопасности.** Аналитики безопасности тщательно изучают новейшие разработки, инновации и инфраструктуры осуществления атак, что позволяет применять упреждающие методы управления и инструменты для устранения новейших атак вымогательства. Непрерывное обновление аналитики угроз может помочь организовать проактивную защиту и обнаружение возникающих угроз [10].

Исследование принципов осуществления атак вымогательства и современных достижений в защите от них позволяет сформулировать основные рекомендации по управлению защитой от атак согласно следующей последовательности действий:

– **проведение регулярных тренингов по безопасности для конечных пользователей.** Большинство атак вымогательства по-прежнему основаны на незнании и неопытности конечных пользователей, которые ничего не подозревают и, не колеблясь, нажимают на ссылку или открывают файл, полученный из неизвестного источника. В этой ситуации наиболее разумным и эффективным решением могут быть регулярные тренинги по безопасности для конечных пользователей, особенно по современным методам фишинга и социальной инженерии. По сути, эти часто используемые методы, станут непригодными, если пользователи научатся более скептически относиться к тому, что они видят или получают через Интернет, а также хорошо анализировать и продумывать свои действия;

– **организация эффективных процедур резервного копирования и восстановления.** Очевидно, что при атаке вымогательства, когда пользователь рискует потерять все свои важные данные, оперативное и безопасное резервное копирование всех данных является разумным выходом из опасной ситуации [11]. Такое копирование позволяет пользователю уверенно игнорировать запрос выкупа для получения ключа дешифрования и просто восстанавливать данные из резервной копии. В этом случае, конечно, будут определенные временны́е затраты на восстановление, но выкуп не будет выплачен, и, самое главное, атакующий поймет, что его атака не увенчалась успехом. К сожалению, не все конечные пользователи регулярно выполняют резервное копирование или проверяют процедуры восстановления. Современные процедуры и инструменты для резервного копирования данных – еще одна важная тема регулярных тренингов по безопасности для конечных пользователей.

– **установление надлежащей практики превентивных действий для конечных точек.** Атаки вредоносных программ в основном базируются на использовании уязвимостей программного обеспечения и небезопасных конфигураций в конечных точках. В отличие от широкомасштабных сетевых атак, ориентированных на системы и инфра-

структуры, атака вымогательства целенаправленно атакует конечные точки, потому что именно там в основном содержится большое количество пользовательских данных, за которые проще всего получить выкуп. В этой связи лучшая защита против атак вымогательства связана с простым улучшением безопасности информации на конечных точках с соблюдением всех правил управления безопасностью. В частности, своевременное обновление операционной системы и приложений является одним из наиболее эффективных способов защиты от современных атак. Кроме того, имеет смысл отключить макросы в приложениях MS Office, а также удалить все ненужное программное обеспечение;

– **осуществление непрерывного сканирования уязвимостей.** Когда современная вредоносная программа выполняется на конечной точке, она находит и использует последние уязвимости для достижения своей цели. В этом отношении регулярное и непрерывное сканирование уязвимостей выявит уязвимости операционной системы и приложений, что позволит немедленно попытаться нейтрализовать уязвимости для предотвращения будущих вредоносных атак. Специальные инструменты сканирования уязвимостей позволяют регулярно проверять, подвержена ли конечная точка рискам. Учитывая то, что такие инструменты обычно постоянно получают обновления уязвимостей, пользователь может быть уверен, что на конечной точке будут найдены и ликвидированы все последние известные уязвимости;

– **фильтрация входящих и особенно исходящих подключений для блокировки нежелательных.** На первых этапах атаки вымогательства зараженный компьютер жертвы инициирует соединение с сервером злоумышленника. Поэтому, если блокировать такие соединения на шлюзе конечной точки, то атака вымогательства фактически будет блокирована, прежде чем она начнет выполнение. Кроме того, для пользовательского контроля может быть рекомендовано настроить оповещение при инициировании таких соединений.

Строгое соблюдение вышеприведенных правил и рекомендаций по управлению безопасностью может в большинстве случаев защищать многоуровневую систему виртуального моделирования не только от угроз вымогательства, но и от многих других современных угроз безопасности.

Список использованных источников

1. **Gao L.**, Gao W., Gu H. Virtual Simulation Technology of 3D Obstacle Avoidance Algorithm for AUV. In Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering, ACM, 2018. – P. 117.

2. **Roman R.**, Lopez J., Mambo M. Mobile edge computing, fog et al.: A survey and analysis of security threats and challenges // Future Generation Computer Systems. – 2018. – V. 78. – P. 680 – 698.

3. **Bulazel W. A.,** Yener B. A Survey on Automated Dynamic Malware Analysis Evasion and Counter-Evasion, In Proceedings of the 1st Reversing and Offensive-oriented Trends Symposium (ROOTs), ACM Press, 2017. – P. 1 – 21.

4. **Easttom C.** Modern Cryptography: Applied Mathematics for Encryption and Information Security. McGraw-Hill Education, 2016.

5. **Karpuk D. A.**, Chorti A. Perfect Secrecy in Physical-Layer Network Coding Systems from Structured Interference // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2016. – V. 11, 8. – P. 1875 – 1887.

6. **Taddeo M.**, Floridi L. Regulate artificial intelligence to avert cyber arms race // Nature. – 2018. – V. 556, № 7701. – P. 296 – 298.

7. **Byrne J. M.**, Kimball K. A. Inside the Darknet: Techno-Crime and Criminal Opportunity. In Criminal Justice Technology in the 21st Century, Thomas Publisher, 2017. – P. 206 – 232.

8. **Richardson R.**, North M. Ransomware: Evolution, mitigation and prevention // International Management Review. – 2017. – V. 13, № 1. – P. 10 – 21.

9. **Miller D. R.**, Harris S., Harper A., Van Dyke S., Blask C. Security Information and Event Management (SIEM) Implementation. McGraw Hill, 2010.

10. **Yaqoob I.**, Ahmed E., ur Rehman M. H., Ahmed A. I. A., Al-garadi M. A., Imran M., Guizani M. The rise of ransomware and emerging security challenges in the Internet of Things. Computer Networks, 2017. – V. 129. – P. 2. – P. 444 – 458.

11. **Thomas J. E.**, Galligher G. C. Improving backup system evaluations in information security risk assessments to combat ransomware. Computer and Information Science, 2018. – V. 11, № 1. – P. 14 – 25.

UDC 004.424

Borisenko A. B.[1], Gorlatch S. P.[2]
[1]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +7(4752)630706, e-mail: borisenko@mail.gaps.tstu.ru),
[2]University of Muenster, Germany, Muenster
(Tel. +49(251)8332740, e-mail: gorlatch@uni-muenster.de)

TOWARD HIGH-PERFORMANCE SOLUTIONS FOR BATCH PLANTS DESIGN: AN OVERVIEW

Abstract. This paper provides a short survey of our recent results on the development of high-performance software to solve the problem of optimal design of multiproduct batch plants on modern parallel computers. We describe two main algorithmic approaches to optimization – branch-and-bound and metaheuristics – and their parallel implementation on multi-core CPU and many-core GPU. Our experiments on a real-world case study, the design of chemical-engineering systems demonstrate the trade-off between the runtime acceleration and the quality of the obtained solutions.

Keywords: combinatorial optimization, multi-product batch plant design, branch-and-bound, metaheuristics, GPU computing, CUDA.

A large number of real-life optimization problems in science, engineering, economics, and business are complex and difficult to solve [12]. In this paper, we focus on an exemplary practical optimization problem – the optimal selection of chemical equipment for multi-product batch plants. This kind of plants manufactures a number of related products using the same equipment in (almost) the same operation sequence. The important examples are manufacturing of fine chemicals, pharmaceutical products, polymers, and food and beverages using batch operations [11]. The features include the production of low-volume, high-quality products, flexibility to adopt complex operations due to fast market changes, and suitability to manufacture different products using the same facility.

We present an overview of our recently published results on developing high-performance software for a particular application use case – a *Chemical-Engineering System* (CES) – a set of equipment (reactors, tanks, filters, dryers etc.) for manufacturing diverse products. Our algorithms and programs solve the design optimization problem, i.e., determining the number of units at processing stages and their main sizes to meet these design and production objectives at the lowest possible capital and operating cost. Assuming that the number of units at every stage of CES is fixed, the problem can be formulated as follows (for a detailed mathematical formulation, see [7]).

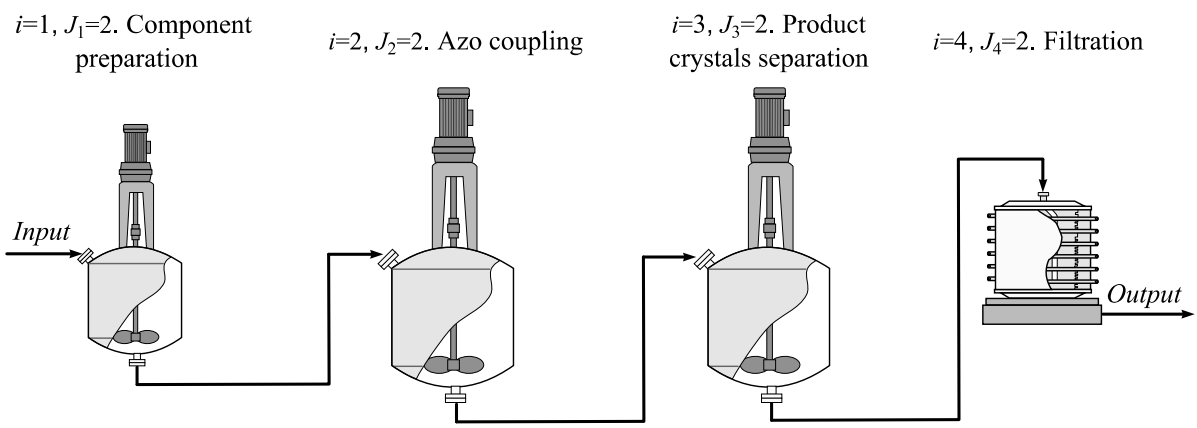
A CES consists of a sequence of I processing stages; i-th stage can be equipped with equipment units from a finite set X_i, with J_i being the number of equipment units variants in X_i. All equipment unit variants of a CES are described as $X_i = \{x_{i,j}\},\ i = \overline{1,I},\ j = \overline{1,J_i}$, where $x_{i,j}$ is the main size j (working volume, working surface) of the unit suitable for processing stage i. A CES variant $\Omega_e,\ e = \overline{1,E}$ (where $E = \Pi_{i=1}^{I} J_i$ is the number of all possible system variants) is an ordered set of available equipment unit variants.

The goal is finding the optimal number of units at processing stages and their main sizes while the input data are as follows: demand for each product of assortment, production horizon, available equipment set, etc.

Each variant Ω_e of a system must be in an operable condition (*compatibility constraint*), i.e., it must satisfy the condition of a joint action for its processing stages expressed by function S: $S(\Omega_e) = 0$. An operable variant of a CES must also satisfy a *processing time constraint*: $T(\Omega_e) \le T_{\max}$, where $T_{\max}$ is the total available time (horizon).

Fig. 1 shows a simple CES consisting of 4 stages ($I = 4$) where each stage can be equipped with 2 devices ($J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = 2$); the number of all possible system variants is $2^4 = 16$. Finding an optimal solution to such problem can be a difficult task due to «combinatorial explosion» – the number of combinations (the number of all possible system variants E in our problem) to be examined grows exponentially, such that even the fastest computers will require an intolerable amount of time. For example, in our earlier work [6], a CES consisting of 16 stages is presented where each process stage can be equipped with devices of 5 to 12 standard main sizes. The number of choices in this case is $5^{16} - 12^{16}$ (which is approximately $10^{11} - 10^{17}$).

A common approach is to formulate a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model [8, 14] and exploit the Branch-and-bound (B&B) technique for solving it. In B&B, the search space (see Fig. 2) is represented as a tree whose root is the original problem, the internal nodes are partially solved subproblems, and the leaves are the potential solutions. B&B proceeds in several iterations where the best solution found so far (upper bound) is progressively improved: a bounding mechanism is used to eliminate the subproblems that are not likely to lead to optimal solutions and cut their corresponding sub-trees. This reduces the size of the explored search space, but can be still time-consuming in practice and requires acceleration, for example using parallel machines. Fortunately, the tree-like organization of the B&B search space provides a potential for the parallelization of algorithm, as all branches of the tree can be processed simultaneously.



Accessible equipment set with the main sizes $x_{i,j} \in X_i$:

$$X_1 = \begin{Bmatrix} x_{1,1} = 6.3\ \text{m}^3 \\ x_{1,2} = 10.0\ \text{m}^3 \end{Bmatrix} \quad X_2 = \begin{Bmatrix} x_{2,1} = 20.0\ \text{m}^3 \\ x_{2,2} = 25.0\ \text{m}^3 \end{Bmatrix} \quad X_3 = \begin{Bmatrix} x_{3,1} = 16.0\ \text{m}^3 \\ x_{3,2} = 20.0\ \text{m}^3 \end{Bmatrix} \quad X_4 = \begin{Bmatrix} x_{4,1} = 5.0\ \text{m}^2 \\ x_{4,2} = 12.5\ \text{m}^2 \end{Bmatrix}$$

Fig. 1. Example: A Simple Chemical-Engineering System

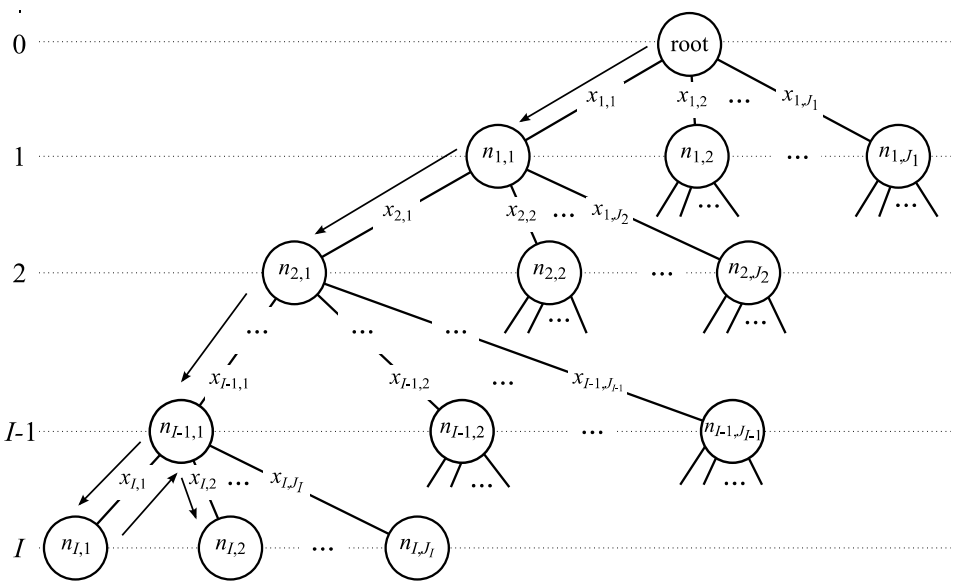


Fig. 2. Tree traversal in depth-first search

In [6], we presented a parallel branch-and-bound algorithm for the optimal design of real-world multi-product batch plants, and we implemented it on modern clusters of multi-core processors. We parallelized our algorithm on systems with both shared memory and distributed memory.

In the shared-memory approach, all nodes $N_i = \{n_{i,1}, n_{i,2}, \ldots, n_{i,k}\}$ $k = \overline{1, K_i}$, $K_i = \Pi_{l=1}^{i} J_l$ at each layer of the tree are regarded as independent *tasks* that can be executed in parallel. The total number of tasks, $N_{task} = \sum_{i=1}^{G} K_i$ can be very large. Therefore, we introduce a *granularity* parameter G to limit the degree of parallelism to a certain level of the tree: subtrees below the granularity level are not split into tasks but rather processed sequentially.

To evaluate our parallelization approach, we developed an OpenMP-enhanced C++ program and we conducted runtime experiments on a computing system with 4 eight-core processors with 128 GB RAM. Our OpenMP implementation demonstrates high scalability. Runtime experiments in [6] using a real-world example of a multi-product batch plant show that our solution provides a considerable speedup.

For a distributed-memory parallelization of B&B algorithm, we used the *master-worker paradigm* [2, 6]: single *master* process dispatches a subset of computations to multiple *worker* processes and gathers computed results from them. This approach is illustrated by Fig. 3. The implementation is written in C++ using Message Passing Interface (MPI). We conducted runtime experiments on a heterogeneous cluster consisting of 198 nodes with 2 hexa-core processors with 2 or 4 GB RAM each.

Both shared- and distributed-memory implementations provide high scalability. Runtime experiments for our implementations using a real-world example of a multi-product batch plant show that our solution provides considerable, near-linear speedup. On the same hardware, the performance of both approaches differs slightly. However, in spite of its more difficult implementation, the MPI implementation is preferable, because it runs both on shared-memory machines and on computers with distributed memory. Currently, shared-memory machines with many processors (hundreds and thousands) are rare, unlike computing clusters.

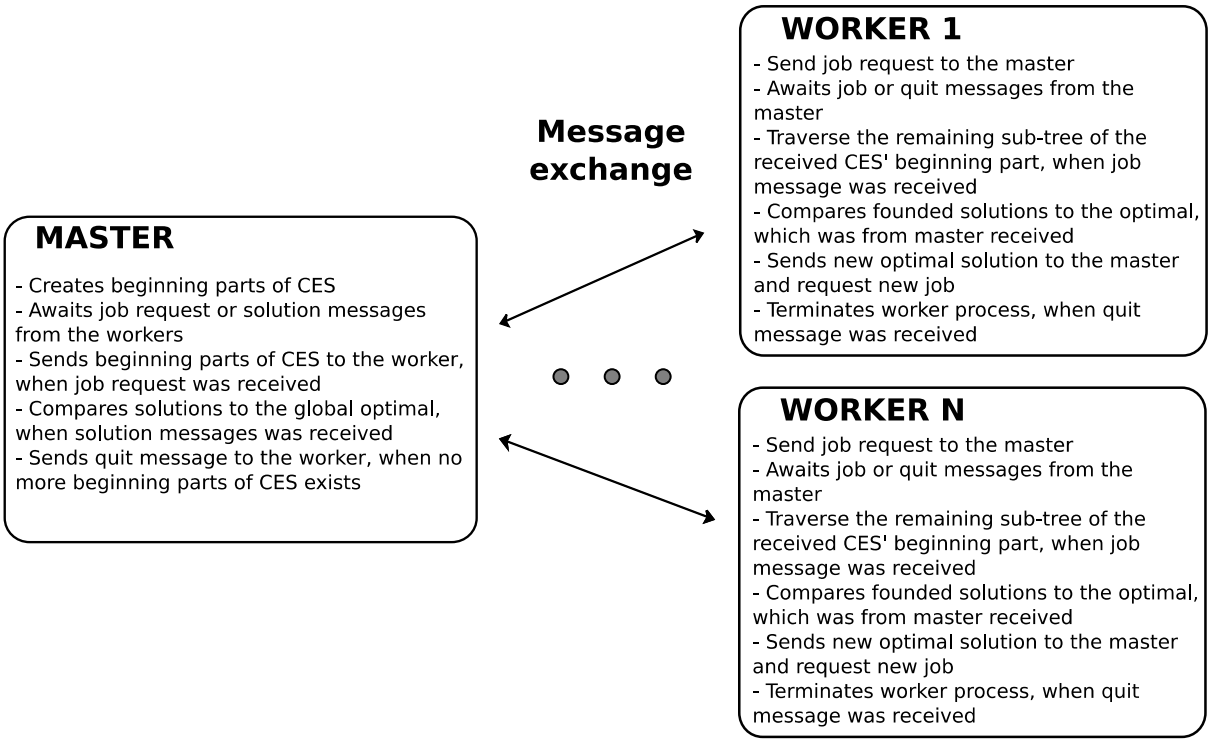


Fig. 3. Distributed-memory parallel branch-and-bound. Master-worker paradigm

Initially designed for addressing compute-intensive graphics tasks, Graphics Processing Units (GPU) have many thousands computational cores and can provide massive parallelism at a reasonable price [13]. Moreover, GPUs also have a great performance/watt ratio, which is key for achieving supercomputing performance. In the latest (as of June 2018) Green500 list [16], six of the top ten systems are accelerated with GPUs.

In papers [4, 5], we parallelized the B&B for the optimal selection of equipment for multi-product batch plants on a CPU-GPU system using the CUDA programming environment [10]. We implemented two versions – an iterative and a recursive one – and we described their optimizations, as well as compared them to each other. We reported the experimental results about the speedup of our GPU-based implementations as compared to the sequential CPU version.

Fig. 4 illustrates our strategy of dividing the search tree into subtrees for parallel processing: the sequential host process on the CPU dispatches computations to multiple threads on the GPU and then gathers the results from these threads. For the tree traversal, we use both recursive and iterative approaches. Using a stack is the obvious way to traverse tree without recursion. To develop a parallel program on the GPU, we use the C programming language with the CUDA Runtime API. Unlike the driver API, the runtime API does not require explicit initialization in the host program in order to use a GPU: all necessary initialization steps are performed automatically when the first function of the runtime API is called. The recursive approach can be used on NVIDIA GPUs of Compute Capability 2.0 and higher. On older NVIDIA devices, the iterative approach should be used.

Our implementation takes into account that NVIDIA GPUs have some Streaming Multiprocessors (SMs) consisting of Streaming Processors (SP) (since Fermi microarchitecture NVIDIA changes the name SP to CUDA cores).

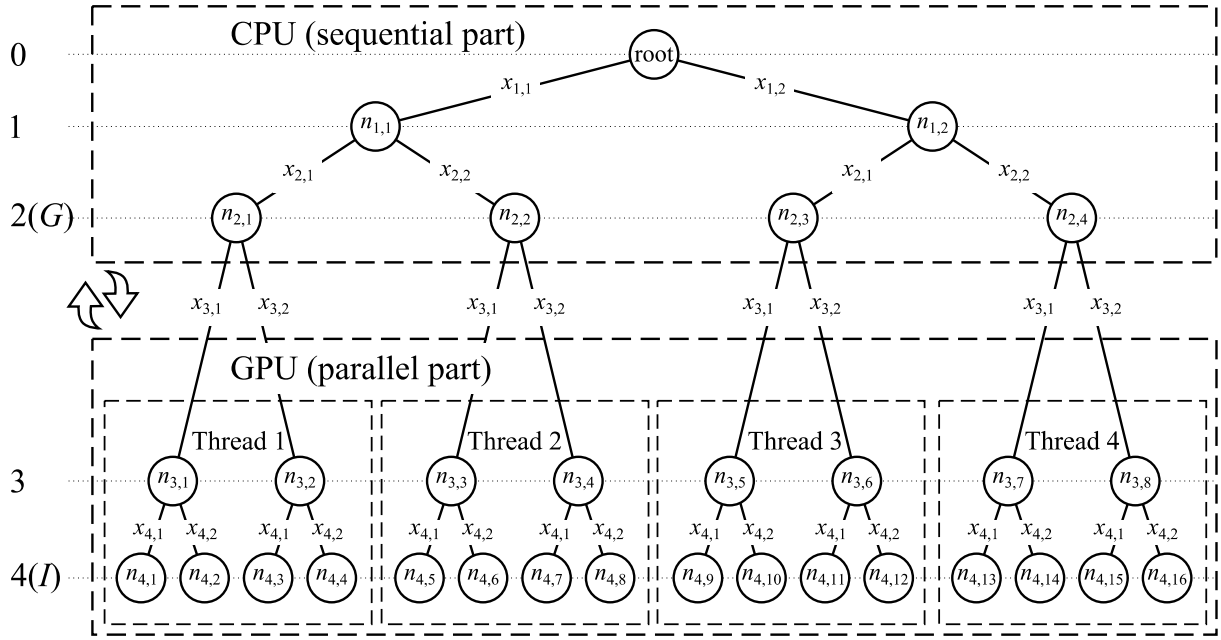


Fig. 4. Dividing the search tree into subtrees for parallel processing

These SMs only get one instruction at a time which means that the CUDA cores all execute the same instruction. Because threads (and not data) are mapped to the CUDA cores and executed in the Single-Instruction, Multiple-Data (SIMD) manner, this style of execution is called Single-Instruction, Multiple-Thread (SIMT): each thread executes the same instruction, but possibly on different data. Threads within a *warp* (groups of 32 threads, used in the hardware implementation to coalesce memory access and instruction dispatch) must execute the same instruction in each cycle. When the execution encounters a divergent control flow, the SM is forced to execute both control-flow paths to the point where they join back together. The warp serially executes each control-flow path taken, disabling threads that are not on the correct path (also known as *branch divergence*). We examine two optimizations that aim at improving the performance of our programs: using shared memory (fast, but limited size), as well as utilizing and reducing branching in the kernel function.

In [4, 5] we analyzed the impact of the degree of parallelism controlled by the granularity parameter, and we conducted optimizations of our programs using the specific features of GPU: memory hierarchy and branch divergence. Our results showed that the recursion-based implementation in general is faster than the iteration-based on our test platform, and that our optimizations significantly reduced the total runtime.

We observed that the speedup of the recursive version was between 2.66 and 5.79, and for the iterative version it was between 1.67 and 4.43. Based on these experiments, we concluded than the direct implementation of the B&B algorithm on GPUs does not yield a significant speedup. The most obvious problem with tree traversal on a GPU was a high warp divergence due to many control-flow execution paths (due to *if-else* instructions). Each tree node processed in a parallel manner represents a different CES variant; such that every searched subtree may have a different structure.

Our next effort in parallelizing CES-design algorithm is metaheuristics. A *heuristic* for an optimization problem is an algorithm that explores not all possible states of the problem, but

rather the most likely ones. Specific heuristics are usually problem-dependent. Purely heuristics-based solutions may be inconsistent; therefore, *metaheuristics* solutions usually perform better than simple heuristics [9]. A metaheuristic is a generic algorithmic template used for finding high-quality solutions of optimization problems [1] by exploiting a trade-off of local search and global exploration. Randomization in metaheuristics helps to move away from local search to the search on the global scale, by reducing the effective size of the space and exploring the space efficiently. Metaheuristic algorithms find decent solutions for optimization problems in a reasonable amount of time, but there is no guarantee that the optimal solution is always reached [15].

In [3] we proposed a metaheuristics-based approach to the optimal design of multi-product batch plants, with a particular application example of CES. Our hybrid approach combined two metaheuristics: Ant Colony Optimization (ACO) and Simulated Annealing (SA). We developed a sequential implementation of the proposed method, and we parallelized it on GPU using the CUDA programming environment. We experimentally demonstrated that the results of our hybrid metaheuristic approach (ACO+SA) were very close to the global optimal solutions, but they were produced much faster than using the deterministic Branch-and-Bound approach.

Fig. 5 illustrates our parallel implementation of the hybrid (ACO+SA) approach on a system comprising a CPU and a GPU. The application code consists of a sequential code (*host* code for CPU) that invokes execution of hundreds or thousands of parallel threads on the *device* (GPU), where threads execute the kernel code.

The implementation proceeds in five steps (from left to right in Fig. 5):

1. CPU reads the input data, initializes the metaheuristics' parameters for ACO and SA, sends data to GPU, and starts the kernel for ACO on the GPU.

2. The ACO kernel on the GPU searches for the first feasible solution – the initial CES-variant. We use the Multiple Ant Colonies approach [12]: all colonies work as threads in parallel to solve the problem independently. As soon as some thread finds a solution, all threads terminate. With more threads, the probability of finding a solution increases, and therefore the search time is reduced.

3. CPU receives the obtained feasible solution, distributes it between threads as an initial guess for SA, and starts the SA kernel function on the GPU.

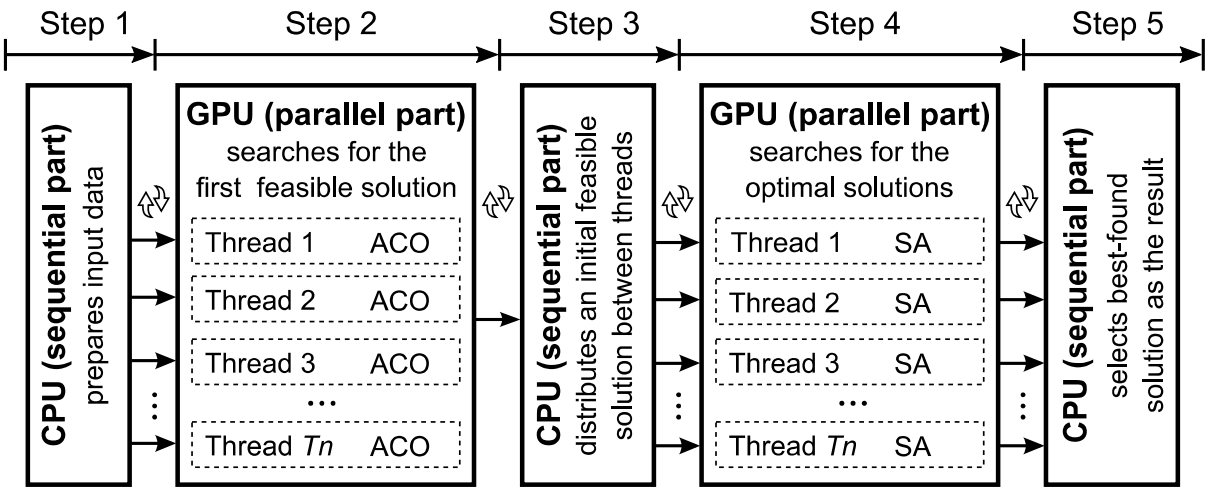


Fig. 5. Hybrid Algorithm Structure

4. The SA kernel on the GPU searches in each thread for the optimal solution with the initial solution found by ACO, i.e., we do not try to reduce the time of one iteration, but we rather increase the number of iterations executed simultaneously. Thus, the chance of the algorithm to converge to the global optimum increases, even if all instances use the same initial solution. A larger number of threads does not reduce the run time of the algorithm, but rather increases the probability that some thread eventually finds a nearly optimal solution.

5. CPU receives the SA solutions obtained by the GPU threads and chooses the best among them – this is the final solution of our problem.

In [3] we compare the results of our novel hybrid (ACO+SA) metaheuristic approach on a CPU-GPU platform with the global optimal solution obtained by the B&B method. Our experiments confirm that our parallel hybrid approach obtains good-quality solutions which are very near to the global optimal values obtained by a deterministic algorithm like B&B, but our approach finds the solution much faster.

Thereby, the development of hybrid metaheuristic algorithms and their implementation on GPU and application in different fields are widely discussed in the literature. The main motivation for parallelizing metaheuristics on GPUs is often the acceleration factor relative to a CPU implementation. With GPUs-implementation, parallel metaheuristics achieved better results in terms of computation, and even solution quality.

Acknowledgement

This work was generously supported by the DAAD (German Academic Exchange Service) and by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the «Mikhail Lomonosov II»-Programme.

References

1. **Birattari, M.** Tuning Metaheuristics / M. Birattari. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. – 221 p.

2. **Borisenko, A.** Parallel MPI-implementation of the branch-and-bound algorithm for optimal selection of production equipment / A. Borisenko, S. Gorlatch // Vestn. Tambovskogo Gos. Teh. Univ. – 2016. – V. 22., № 3. – P. 350 – 357.

3. **Borisenko, A.** Parallelizing Metaheuristics for Optimal Design of Multiproduct Batch Plants on GPU / A. Borisenko, S. Gorlatch // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – V. 10 421. – P. 405 – 417.

4. **Borisenko, A.** Parallelizing Branch-and-Bound on GPUs for Optimization of Multiproduct Batch Plants / A. Borisenko, M. Haidl, S. Gorlatch // Lecture Notes in Computer Science, – 2015. –V. 9251. – P. 324 – 337.

5. **Borisenko, A.** A GPU parallelization of branch-and-bound for multiproduct batch plants optimization / A. Borisenko, M. Haidl, S. Gorlatch // J. Supercomput. – 2017. – V. 73, № 2. – P. 639 – 651.

6. **Borisenko, A.** Optimal Design of Multi-product Batch Plants Using a Parallel Branch-and-Bound Method / A. Borisenko, Ph. Kegel, S. Gorlatch // Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – V. 6873. – P. 417 – 430.

7. **Borisenko, A.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. Borisenko, S. Karpushkin // J. Comput. Syst. Sci. Int. – 2014. – V. 53, № 3. – P. 410 – 419.

8. **Fumero, Y.** A Mixed Integer Linear Programming model for simultaneous design and scheduling of flowshop plants / Y. Fumero, G. Corsano, J. M. Montagna // Appl. Math. Model. – 2013. – V. 37, № 4 – P. 1652 – 1664.

9. **Gandomi, A.** Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization / A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari, and A. Alavi // Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures. – 2013. – P. 1 – 24.

10. **NVIDIA** Corporation CUDA C Programming Guide 9.1 [Electronic resource]. URL: http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf.

11. **Seid, E.** Design and synthesis of multipurpose batch plants using a robust scheduling platform / E. Seid, T. Majozi // Ind. Eng. Chem. Res. – 2013. – V. 52, № 46. – P. 16 301 – 16313.

12. **Talbi E.-G.** Metaheuristics: from design to implementation / E.-G. Talbi – John Wiley & Sons, 2009. – 624 p.

13. **Tan, Y.** A Survey on GPU-Based Implementation of Swarm Intelligence Algorithms / Y. Tan, K. Ding // IEEE Trans. Cybern. – 2016. – V. 46, № 9. – P. 2028 – 2041.

14. **Terrazas-Moreno, S.** A mixed-integer linear programming model for optimizing the scheduling and assignment of tank farm operations / S. Terrazas-Moreno, I. E. Grossmann, J. M. Wassick // Ind. Eng. Chem. Res. – 2012. – V. 51, № 18. – P. 6441 – 6454.

15. **Valadi, J.** Applications of Metaheuristics in Process Engineering / J. Valadi, P. Siarry. – Cham: Springer International Publishing, 2014. – 444 p.

16. **Green500** List for June 2018 [Electronic resource]. – URL : https://www.top500.org/green500/lists/2018/06/

УДК 519.6

Корнаев А. В., Савин Л. А., Корнаева Е. П.
Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Россия, г. Орел
(e-mail: rusakor@inbox.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЯМИ ДВИЖЕНИЯ РОТОРОВ

Kornaev A. V., Savin L. A., Kornaeva E. P.
Orel State University named after I. S. Turgenev, Russia, Orel
(e-mail: rusakor@inbox.ru)

MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELS, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF THE ROTOR MOTION TRAJECTORIES

Аннотация. Приводятся концептуальные положения двух подходов моделирования гидромеханических систем: детерминированного, основанного на уравнениях механики сплошных сред, и стохастического – на базе искусственных нейронных сетей. Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований проблемной научно-исследовательской лаборатории моделирования гидромеханических систем в области разработки моделей и программ расчета, диагностики и управления траекториями движения роторов с подшипниками жидкостного трения. Показаны возможности применения математических моделей в решении задач улучшения энергетических характеристик роторно-опорных систем, разработки высокоскоростных и высокоточных вычислительных моделей, средств прогностического моделирования и диагностики.

Ключевые слова: гидродинамическая теория смазки, роторная динамика, информационно-измерительная система, искусственная нейронная сеть.

Abstract. Conceptions of two approaches for hydromechanical systems modeling are given: deterministic – based on equations of continuum mechanics, and stochastic – based on artificial neural networks. The results of theoretical and experimental researches of the problem research laboratory for modeling hydromechanical systems in the field of developing models and programs for calculating, diagnosing and controlling the trajectories of motion of rotors with fluid-friction bearings are presented. The advantages of using mathematical models to solve problems of improving the energy characteristics of rotary support systems, development of high-speed and high-precision computational models, prognostic modeling and diagnostic tools were subscribed.

Keywords: hydrodynamic lubrication theory, rotor dynamics, informational system, artificial neural network.

Введение. Достичь высоких скоростей и мощностей в ограниченном пространстве позволяет вращательное движение. Вращающиеся детали присутствуют в подавляющем большинстве двигательных установок. Довольно сложно привести пример в технике, в котором высокоскоростное движение реализовано без вращения. Но еще сложнее придумать пример в живой природе, который бы демонстрировал наличие естественных роторных систем.

Опоры являются важнейшими элементами роторных машин, определяющими их надежность и энергоэффективность. Выход из строя опор, вероятнее всего, приведет

к отказу роторной машины. Известно четыре основных вида подшипников: подшипники скольжения, подшипники качения, подшипники жидкостного трения, электромагнитные подшипники [1]. Первые два вида опор подразумевают контактное взаимодействие трущихся поверхностей. Их достоинством является высокая несущая способность и низкий уровень потерь на трение, а следствием контакта является высокий износ и низкая демпфирующая способность. Третий и четвертый виды опор подразумевают полное разделение трущихся поверхностей за счет слоя рабочей среды или электромагнитного поля, что делает их теоретически безызносными.

В данной работе объектом исследования являются роторно-опорные системы с подшипниками жидкостного трения. Для того, чтобы в движущейся рабочей среде возникли силы, достаточные для разделения трущихся поверхностей, необходимо выполнение ряда условий: среда должна обладать свойством вязкости; по толщине слоя среды должен возникать резкий перепад скорости; зазор должен изменяться по направлению движения жидкости. Следует отметить, что процесс гидродинамической смазки противоречив. Целью действия является снижение потерь на трение, а причиной возникновения – наличие внутреннего трения. Таким образом, цель действия направлена на борьбу с причиной появления. Многие исследования в области гидродинамического трения связаны с решением этого противоречия.

Уровни и подходы к моделированию роторно-опорных систем. Существует множество уровней моделирования роторно-опорных систем с ПЖТ (рис. 1). Можно выделить два основных – это моделирование ротора и подшипника.

Модель подшипника определяет движущаяся жидкость, в результате моделирования определяется силовое действие жидкости на окружающие тела. Основу математической модели составляют уравнения гидромеханики, такие как уравнение движения, неразрывности, баланса тепла и др. В большинстве работ, для расчета силовой реакции жидкости, действующей на шип и подшипник, используется метод линеаризации. Считается, что силовая реакция слоя жидкости зависит от положения шипа и скорости его поперечных колебаний, тогда ее можно представить в виде ряда Тейлора с производными, не старше первого порядка. Механическим аналогом такой идеализации является совокупность пружин и демпферов. Ротор, если это допустимо, рассматривают как материальную точку или твердое недеформируемое тело. В более общем случае ротор описывается уравнениями механики сплошных сред [2].

Рис. 1. Концептуальные уровни моделирования роторно-опорных систем [2]

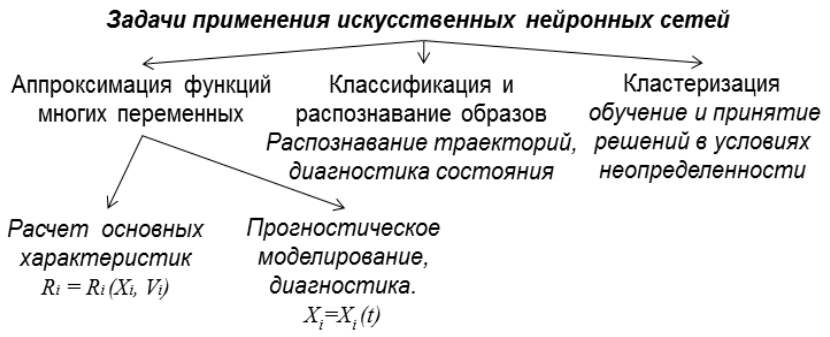


Рис. 2. Применение искусственных нейронных сетей в роторной динамике

Представленный выше подход является детерминированным (предопределенным), т.е. основанным на физических законах. Можно наблюдать следующую закономерность. В стремлении к полному физическому соответствию сложность модели возрастает и ее численная реализация становится затруднительной. Поэтому в решении некоторых сложных задач следует использовать стохастический подход.

Одним из наиболее перспективных средств стохастического моделирования являются искусственные нейронные сети. С помощью искусственных нейронных сетей решаются следующие типы задач: аппроксимация, классификация и кластеризация [3]. Все эти типы задач могут быть применены в роторной динамике (рис. 2).

Естественные и искусственные нейронные сети похожи по структуре. Тело нейрона получает сигналы по множеству входных каналов, преобразует их и передает во внешнюю среду по единственному выходному каналу – аксону. При этом единственный выходной сигнал может передаваться многим соседним нейронам через синапсы, в которых сигнал нейрона может усиливаться или гаситься. В искусственных нейронах в роли сигналов выступают цифровые данные. Множество чисел x_i на входе в искусственный нейрон умножается на веса, затем суммируется. К результату применяется функция активации, а полученное значение является выходным. Совокупность нейронов образует нейронную сеть, которая преобразует множество входных чисел x_i в множество выходных чисел y. Следовательно, нейронная сеть в данном случае образует функцию многих переменных. Для того, чтобы нейронная сеть выдавала на выходе требуемые значения, ее необходимо «обучить», т.е. подобрать значения весов. Для этого выполняется процедура минимизации ошибки [3].

Программная реализация моделей роторно-опорных систем. Можно рассмотреть в сравнении два наиболее оснащенных программных комплекса для решения задач роторной динамики: «ANSYS» и «MATLAB». Первый является передовым CAE-продуктом, в его арсенале полный набор средств решения физических задач. Но на данном этапе «ANSYS» не приспособлен для взаимодействия с реальным объектом. «MATLAB» не имеет широких возможностей в решении дифференциальных уравнений в частных производных, однако имеет встроенный язык программирования, многие стандартные средства работы с матрицами, надстройки в виде сред визуального программирования типа «Simulink» и множество тулбоксов, в том числе для работы с искусственными нейронными сетями. Кроме того, «MATLAB» имеет возможность программного взаимодействия с реальными физическими объектами. Следовательно, на его основе можно разрабатывать системы измерений и управления. На основе «Simulink + SimMechanics» можно разработать модель роторно-опорной системы. Для этого необходимо выполнить импорт твердотельной модели ротора, модель под-

шипника удобно интегрировать в виде кода на языке «MATLAB» с помощью дополнительно устанавливаемых пакетов реализуется программная связь с физическим объектом, а система управления может быть реализована, например, на основе искусственной нейронной сети. Ниже приводятся результаты реализации задач исследования роторно-опорных систем.

Задача 1 посвящена решению задачи повышения энергоэффективности подшипника жидкостного трения за счет искусственного температурно-вязкостного клина. Модель подшипника была разработана с использованием среды программирования «MATLAB», там же была реализована простейшая одномассовая модель ротора. С помощью периодических граничных условий для температуры была задана переменная температура жидкости на одном из торцов подшипника, графическая интерпретация искусственного температурного клина представлена на рис. 3. В результате расчетов был получен эффект снижения колебаний и потерь на трения для варианта 2 подачи температурно-неоднородной жидкости (рис. 3) по сравнению с вариантом температурно-однородной жидкости. Более подробно с постановкой и результатами решения задачи можно ознакомиться в работе [4].

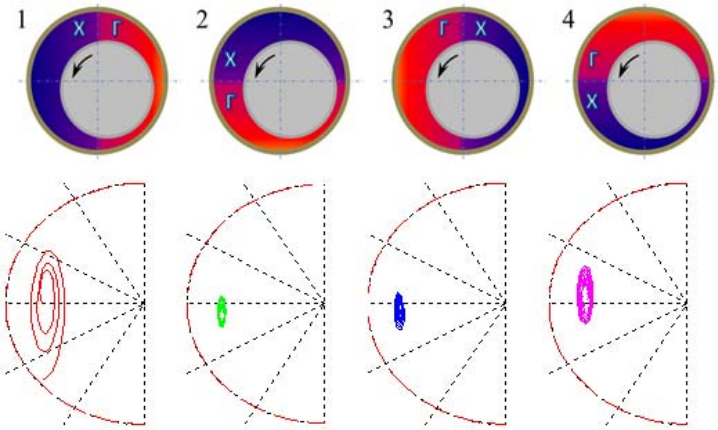


Рис. 3. Результаты расчета траекторий колебаний ротора в условиях температурно-вязкостного клина

Задача 2 посвящена исследованию возможности аппроксимации гидродинамической реакции смазочного слоя как функций компонент этой реакции в зависимости от положения и скорости колебания ротора [5]. Для аппроксимации использовалась искусственная нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем. Нейроны скрытого слоя содержали сигмоидную функцию активации, нейроны выходного слоя – линейную. В качестве данных для обучения нейронной сети использовались результаты вычислительных экспериментов, полученные с помощью программы расчета, аналогичной рассмотренной в предыдущем примере.

Последующие примеры связаны с обучением нейронных сетей на основе данных физических измерений. Фото опорного узла и функциональная схема установки для исследования роторно-опорных систем разработки ПНИЛ «Моделирование гидромеханичских систем» (ОГУ имени И. С. Тургенева) представлены на рис. 4. Информационно-измерительная система установки позволяет измерять виброперемещения ротора, давление, температуру и расход смазочного материала и проводить запись измеряемых сигналов с частотой до 8 кГц при частоте вращения ротора до 80 Гц.

Рис. 4. Экспериментальный стенд: фото корпуса опоры (слева) и структурная схема информационно-измерительной системы

Задача 3 посвящена исследованию возможности экстраполяционного моделирования виброперемещений ротора с помощью нейронных сетей. Использовалась нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с одним скрытым слоем. Нейроны скрытого слоя содержали сигмоидную функцию активации, нейроны выходного слоя – линейную. В качестве данных для обучения нейронной сети использовались результаты измерений виброперемещений ротора по одной из координат. Обучение нейронной сети проводилось по данным измерения, полученным за первую секунду работы роторной системы. Затем проводилось сравнение результатов расчета и измерений на десятой секунде. Погрешность расчета виброперемещений во всем сравниваемом временном диапазоне не превысила 10 мкм при среднем зазоре подшипника 100 мкм. Результаты исследования представлены в работе [6].

Задача 4 связана с использованием искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации и распознавания траекторий ротора. Использовалась нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем с функцией активации «softmax» и с линейной функцией активации в выходном слое. По данным измерений виброперемещений необходимо было определить один из четырех способов подачи смазочного материала (рис. 3) в подшипник жидкостного трения (рис. 4). Результаты показали высокую точность решения задачи, более подробно они представлены в работе [7].

Заключение. Современные средства моделирования позволяют совмещать инструментарий решения инженерные и производственные задач. Совмещение детерминированного и стохастического подходов в моделировании позволяют достигать высоких результатов в решении сложных задач. Перспективы применения искусственных нейронных сетей определяют возможности создания «интеллектуальных» роторно-опорных машин, способных моделировать состояние технической системы с существенным опережением времени процессов, диагностировать возможные неполадки и образовывать высокоскоростные и высокоточные системы управления.

Работа подготовлена в рамках выполнения проектов Российского научного фонда № 16-19-0186 (*исследование динамики ротора*) *и гранта Президента РФ № 14.Z56.17.1643-МК* (*экспериментальное исследование эффекта температурно-вязкостного клина*).

Список использованных источников

1. **Hori, Y.** Hydrodynamic Lubrication / Y. Hori. – Tokyo : Yokendo Ltd, 2006. – 239 p.
2. **Савин, Л. А**. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения : монография / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
3. **Haykin, S. O.** Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition) / S. O. Haykin. – PHIL, 2010. – 936 p.
4. **Kornaev, A. V.** Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid-film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant / A. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, L. A. Savin // International Journal of Mechanics. – 2017. – V. 11. – P. 197 – 203.
5. **Kornaev, A. V.** Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings [Electronic resource] / A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, L. A. Savin // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – V. 2017. – 11 p. – URL : https://doi.org/10.1155/2017/9196701.
6. **Прогностическое** моделирование динамики роторов с нелинейной реакцией опор / Н. В. Корнаев, А. В. Корнаев, А. С. Фетисов, Н. В. Токмаков // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИНТОП – 2018) : сб. тр. Междунар. конф. – НИУ «БелГУ», 2018. – С. 427 – 433.
7. **Корнаев, А. В.** Распознавание траекторий роторов с использованием искусственных нейронных сетей / А. В. Корнаев, Н. В. Корнаев, А. С. Фетисов // Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике (DCNAIR 2018) : сб. тр. Междунар. школы молодых ученых. – СГТУ, Саратов, 2018 (статья принята к публикации).

References

1. **Hori, Y.** Hydrodynamic Lubrication / Y. Hori. – Tokyo : Yokendo Ltd, 2006. – 239 p.

2. **Savin, L. A.** Modeling of rotor systems with journal bearings : monograph / L. A. Savin, O. V. Solomin. – M. : Mashinostroyenie-1, 2006. – 444 p. (in Russian)

3. **Haykin, S. O.** Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition) / S. O. Haykin. – PHIL, 2010. – 936 p.

4. **Kornaev, A. V.** Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid-film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant / A. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, L. A. Savin // International Journal of Mechanics. – 2017. – V. 11. – P 197 – 203.

5. **Kornaev, A. V.** Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings [Electronic resource] / A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, L. A. Savin // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – V. 2017. – 11 p. – URL : https://doi.org/10.1155/2017/9196701.

6. **Simulation** and Prognostic Modeling of the Rotor Dynamics with Considering Nonlinear reactions / N. V. Kornaev, A. V. Kornaev, A. S. Fetisov, N. V. Tokmakov // INTOP – 2018. Conference Proceedings. – NRU “BSU”, 2018. – P. 427 – 433.

7. **Kornaev, A. V.** Rotor trajectories recognizing with using artificial neural networks / A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, A. S. Fetisov // DCNAIR – 2018. Conference Proceedings. – SSTU, Saratov, 2018 (accepted for publication).

УДК 620.178.4/.6

Малыгин Е. Н., Карпушкин С. В., Краснянский М. Н.
Мокрозуб В. Г., Глебов А. О., Карпов С. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Malygin E. N., Karpushkin S. V., Krasnyanskiy M. N.,
Mokrozub V. G., Glebov A. O., Karpov S. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

HIGH-PRECISION TECHNICAL OBJECTS MODELING AND OPTIMIZATION

Аннотация. На примере установки для температурной обработки нагруженных изделий рассмотрены основные этапы проектирования технических объектов с распределенными характеристиками, отвечающими требованиям высокой точности. Сформулирована формализованная постановка задачи оптимизации задачи технического объекта. Приведена математическая модель объекта, описывающая электромагнитные и тепловые взаимодействия. Рассмотрено решение задачи оптимизации с применением теории планирования эксперимента.

Ключевые слова: математическое моделирование, индукционный нагрев, метод конечных элементов, оптимизация, планирование эксперимента.

Abstract. The main stages of designing technical objects with distributed characteristics that meet the requirements of high precision are considered on the example of the heat treatment equipment of loaded products. The formalized statement of optimization problem of technical object is formulated. The mathematical model of the object describing electromagnetic and thermal interactions is given. The solution of the optimization problem using the design of experiment theory is considered.

Keywords: mathematical modeling, induction heating, finite elements method, optimization, design of experiments.

Для обеспечения конкурентоспособности современное промышленное оборудование должно отвечать высоким требованиям эффективности, надежности, а также обладать приемлемой стоимостью. Среди технических объектов промышленного назначения существует класс оборудования, эффективность функционирования которого определяется распределенными по объему и времени характеристиками – полями температур, механических напряжений, скоростей и т.д. Высокоточный анализ подобных полей позволяет принимать обоснованные решения о конструкции технического объекта, а также выбирать наилучший вариант его реализации среди множества альтернатив, т.е. выполнять оптимизацию.

Решение оптимизационной задачи за приемлемое время не представляется возможным без применения методов математического моделирования. В большинстве случаев перечисленные выше поля могут быть описаны фундаментальными физическими зако-

Рис. 1. Колонный тип вулканизационного пресса

нами в форме дифференциальных уравнений в частных производных. Наиболее эффективный подход к решению подобных уравнений предполагает использование метода конечных элементов.

В данной работе общие подходы к моделированию и оптимизации технических объектов, отвечающих требованиям высокой точности реализации процессов, рассматриваются на примере установки для температурной обработки механически нагруженных изделий (см. рис. 1). Подобные установки, представляющие собой гидравлический пресс с нагревательными плитами, применяются для реализации процессов вулканизации, полимеризации, а также отпуска высокоточных металлических изделий.

Задачи проектирования нового пресса, оснащенного нагревательными плитами, можно разделить на две большие группы: задачи теплового анализа и задачи прочностного анализа элементов пресса. Первую группу образуют следующие расчеты:

1) расчет необходимой мощности нагревательных плит;
2) выбор и обоснование системы нагрева (индукционный, омический или паровой);
3) расчет нагревателей;
4) расчет системы теплоизоляции;
5) расчет системы охлаждения;
6) моделирование и оптимизация температурного поля.

Во вторую группу входят расчеты напряженно-деформированного состояния элементов пресса и решение задачи оптимизации его конструкции.

Первые две задачи группы теплового анализа носят инженерный характер и, как правило, не вызывают затруднений. Расчет электрических нагревателей, обеспечивающих заданную мощность и обладающих высокой надежностью, связан с конечно-элементным анализом [1]. В случае высокотемпературных установок особое внимание уделяется системе теплоизоляции пресса, гарантирующей безопасную работу гидравлической системы. Система охлаждения может применяться для обеспечения технологического регламента температурной обработки изделий.

Наиболее сложный и ответственный этап в группе тепловых расчетов – моделирование и оптимизация температурного поля нагревательных плит. Зачастую ставится задача получения равномерных температурных полей на рабочих поверхностях плит. Такие плиты являются универсальными, так как могут использоваться для производства изделий различной конфигурации.

Температурное поле плиты с индукционными нагревателями определяется распределением вихревых токов, для расчета которых требуется модель электромагнитных процессов [2]. В пространстве моделирования электромагнитного поля можно выделить три области: область существования вихревых токов Ω_1 (нагревательная плита), область с нулевой электрической проводимостью Ω_2 (воздушное пространство или электроизоляция), область с внешним током Ω_3 (обмотка, подключенная к источнику тока или напряжения), см. рис. 2.

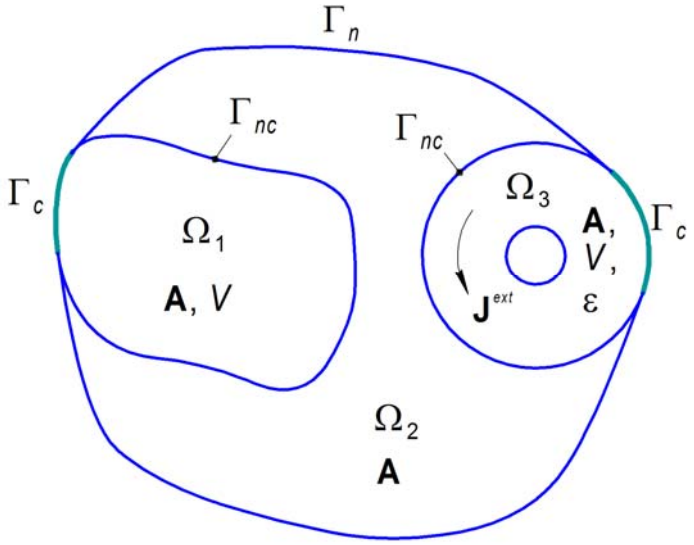


Рис. 2. Области в пространстве моделирования электромагнитного поля

Для области Ω_1 математическая модель имеет вид

$$\mathrm{rot}\left(\mu^{-1}\,\mathrm{rot}\,\mathbf{A}\right)+\gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}+\gamma\,\mathrm{grad}\,V=0\,; \tag{1}$$

$$\mathrm{div}\left(\gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}+\gamma\,\mathrm{grad}\,V\right)=0\,, \tag{2}$$

где **A** – реберный векторный магнитный потенциал, Вб/м; μ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; γ – удельная электрическая проводимость, Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; V – узловой скалярный электрический потенциал, В; t – время,

В областях Ω_2 и Ω_3 электромагнитное поле описывается уравнением

$$\mathrm{rot}\left(\mu^{-1}\mathrm{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}^{ext}\,, \tag{3}$$

где $\mathbf{J}^{ext}$ – вектор плотности внешнего тока, А/м^2.

На границе Γ_{nc} контакта между электропроводящей и диэлектрической областями Ω_1 и Ω_2 задаются граничные условия непрерывности тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля и непрерывности нормальной компоненты магнитной индукции:

$$\mu_1^{-1}\mathrm{rot}\mathbf{A}_1\mathbf{n}=\mu_2^{-1}\mathrm{rot}\mathbf{A}_2\mathbf{n}\,; \tag{4}$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{A}_1\mathbf{n}=\mathrm{rot}\mathbf{A}_2\mathbf{n}\,, \tag{5}$$

где **n** – единичный вектор нормали к поверхности контакта между электропроводящей и диэлектрической областями.

Аналогичным образом записываются условия на границе между областями Ω_2 и Ω_3.

На внешней границе Γ_n диэлектрической области Ω_2 наиболее часто задается условие параллельности магнитной индукции:

$$\mathrm{rot}\mathbf{A}\mathbf{n}=0\,; \tag{6}$$

В плоскостях симметрии анализируемой области могут находиться внешние границы Γ_c электропроводящих областей Ω_1 и Ω_3 (плиты и индукторов), см. рис. 2.

В случае перпендикулярности вихревых токов этим плоскостям граничные условия имеют вид:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{n} = 0; \tag{7}$$

$$V = \text{const}. \tag{8}$$

Вектор плотности вихревых токов $\mathbf{J}$(А/м^2) рассчитывается по формуле

$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \,\text{grad}\, V. \tag{9}$$

Следовательно, условие параллельности вихревых токов плоскостям симметрии можно записать в виде

$$\mathbf{n}\left(\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \gamma \,\text{grad}\, V\right) = 0. \tag{10}$$

Результатом решения уравнений электромагнитного поля является объемное тепловыделение q, используемое для решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T + \frac{q}{c\rho}, \tag{11}$$

где T – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$; c – теплоемкость, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; ρ – плотность, кг·м$^{-3}$.

Тепловыделение определяется по закону Джоуля–Ленца

$$q = f \int_{t_{st}}^{t_{st}+\frac{1}{f}} \frac{J^2}{\gamma} dt, \tag{12}$$

где f – частота тока, Гц; J – модуль плотности тока; t_{st} – условное время стабилизации электромагнитных процессов, по окончании которого изменениями амплитудных значений плотности тока можно пренебречь, с.

Уравнение теплопроводности дополняется условиями однозначности – начальным условием и граничными условиями в зависимости от физики протекающих процессов.

Таким образом, формализованная постановка задачи оптимизации будет иметь следующий вид: необходимо найти число индукторов и их конструктивные характеристики (диаметр провода, число витков, ширину паза, глубину паза, координаты осевой линии паза) такие, что разность между максимальной и минимальной температурами на рабочей поверхности плиты достигает минимального значения при выполнении условий математической модели (1) – (12).

Как было отмечено выше, для решения дифференциальных уравнений (1) – (3) и (11) предпочтительнее использование метода конечных элементов. Поскольку магнитная проницаемость ферромагнитных материалов не является константой, а зависит от напряженности магнитного поля (следовательно, и от векторного магнитного потенциала), решение нелинейных нестационарных уравнений (1), (2) связано с большими затратами машинного времени (десятки часов на современном компьютере). Сократить время расчета до приемлемых значений позволяет допущение о постоянстве магнитной проницаемости. Однако в этом случае требуется проведение оценки возникающих погрешностей.

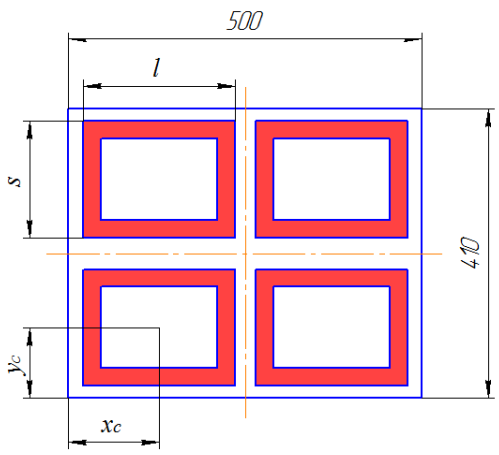


Рис. 3. Геометрия промышленной плиты

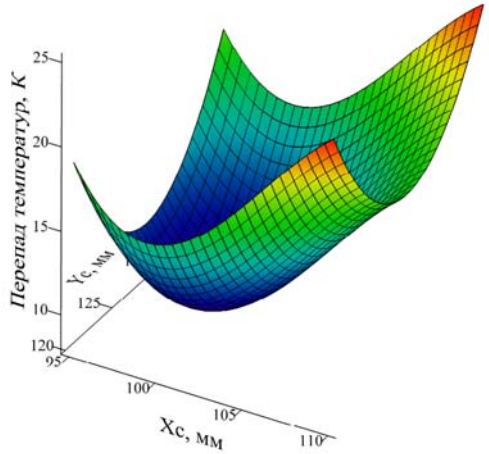


Рис. 4. Поверхность отклика

Решение поставленной задачи оптимизации классическими методами (например, наискорейшего спуска) даже с учетом допущения о постоянстве магнитной проницаемости на современном этапе развития вычислительной техники не представляется возможным. По этой причине целесообразно применение теории планирования эксперимента, позволяющей получить максимум информации об объекте исследования при минимуме вычислительной работы [3]. Суть данного подхода состоит в проведении серии вычислительных экспериментов, аппроксимации результатов с помощью многомерного полинома и поиска минимума аппроксимирующей функции.

На рисунках 3, 4 приведен пример применения теории планирования эксперимента для оптимизации промышленной нагревательной плиты. В качестве варьируемых переменных использованы длина и ширина индуктора, положение его центра, мощность индуктора.

Для проведения вычислительных экспериментов использован ротатабельный центральный композиционный план второго порядка, отличающийся независимостью погрешности прогноза целевой функции от направления поиска. Аппроксимация целевой функции выполнена полным квадратичным полиномом с помощью метода наименьших квадратов. В результате оптимизации перепад температур на рабочей поверхности плиты удалось снизить с 15,7 °С до 7,6 °С. На рисунке 4 показан график аппроксимирующей целевой функции (поверхность отклика) при фиксированных длине, ширине и мощности индукторов.

На примере установки для температурной обработки нагруженных изделий рассмотрены общие подходы к моделированию и оптимизации технических объектов, отвечающих требованиям высокой точности реализации процессов. Показано, что наибольшие затруднения возникают на этапе оптимизации технического объекта с распределенными выходными характеристиками по причине чрезмерного объема вычислений. Для снижения затрат машинного времени предложено применение теории планирования эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/8.9*).

Список использованных источников

1. **Plates** in Hydraulic Presses with Ohmic Heaters / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, A. O. Glebov, S. V. Karpov // Russian Engineering Research. – 2016. – V. 36, № 9. – P. 708 – 712. – DOI: 10.3103/S1068798X16090136.

2. **Bíró O.** Edge element formulations of eddy current problems / O. Bíró // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1999. – V. 169, № 3–4. – P. 391 – 405. – https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00165.

3. **Optimization** of design and performance characteristics of heating system of press equipment / A. V. Ostroukh, A. O. Glebov, S. V. Karpov, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy // American Journal of Applied Sciences. – 2014. – V. 11, Is. 6. – P. 939 – 946. – DOI: 10.3844/ajassp.2014.939.946.

References

1. **Plates** in Hydraulic Presses with Ohmic Heaters / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, A. O. Glebov, S. V. Karpov // Russian Engineering Research. – 2016. – V. 36, № 9. – P. 708 – 712. – DOI: 10.3103/S1068798X16090136.

2. **Bíró O.** Edge element formulations of eddy current problems / O. Bíró // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1999. – V. 169, № 3–4. – P. 391 – 405. – https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00165.

3. **Optimization** of design and performance characteristics of heating system of press equipment / A. V. Ostroukh, A. O. Glebov, S. V. Karpov, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy // American Journal of Applied Sciences. – 2014. – V. 11, Is. 6. – P. 939 – 946. – DOI: 10.3844/ajassp.2014.939.946.

УДК 378.147 – 658.512

Позднеев Б. М.[1], Толок А. В.[2], Овчинников П. Е.[3],
Куприяненко И. А.[4], Левченко А. Н.[5], Шароватов В. И.[6]
[1]ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, г. Москва
(Тел. (499)9731151, e-mail: bmp@stankin.ru),
[2]ФГБУН ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, Россия, г. Москва
(Тел. (495)3348910, e-mail: atol@ipu.ru),
[3]ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, г. Москва
(Тел. (499)9731151, e-mail: p.ovchinnikov@stankin.ru),
[4]ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, г. Москва
(Тел. (499)9731151, e-mail: i.kupriyanenko@stankin.ru),
[5]ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, г. Москва
(Тел. (499)9731151, e-mail: a.levchenko@stankin.ru),
[6]ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Россия, г. Москва
(Тел. (499)9731151, e-mail: viktor-sharovatov@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ ИНДУСТРИИ 4.0

Pozdneev B. M.[1], Tolok A. V.[2], Ovchinnikov P. E.[3],
Kupriyanenko I. A.[4], Levchenko A. N.[5], Sharovatov V. I.[6]
[1]MSUT “STANKIN”, Russia, Moscow
(Tel. (499)9731151, e-mail: bmp@stankin.ru),
[2]ICS Academician VA Trapeznikov of RAS, Russia, Moscow
(Tel. (495)3348910, e-mail: atol@ipu.ru),
[3]MSUT “STANKIN”, Russia, Moscow
(Tel. (499)9731151, e-mail: p.ovchinnikov@stankin.ru),
[4]MSUT “STANKIN”, Russia, Moscow
(Tel. (499)9731151, e-mail: i.kupriyanenko@stankin.ru),
[5]MSUT “STANKIN”, Russia, Moscow
(Tel. (499)9731151, e-mail: a.levchenko@stankin.ru),
[6]MSUT “STANKIN”, Russia, Moscow
(Tel. (499)9731151, e-mail: viktor-sharovatov@yandex.ru)

MODELING THE ARCHITECTURE AND ENSURING INTEROPERABILITY OF SYSTEMS MANAGING THE DIGITAL ENTERPRISE ON THE BASIS OF INDUSTRY 4.0

Аннотация. В докладе представлены современные подходы, модели и стандарты архитектуры цифрового предприятия в соответствии с концепцией «Индустрия 4.0». Обосновано, что выбор архитектуры и модели управления цифровым предприятием должен определяться на основе процессной модели и архитектуры бизнес-процессов организации. Предложен профиль требований международных и национальных стандартов для реализации архитектурного подхода при проектировании и моделировании цифрового двойника предприятия. Рассмотрены основные проблемы, связанные с интеграцией и

интероперабельностью систем автоматизации управления предприятием с учетом специфики их функционального назначения и базовой платформы. Приведены основные понятия в области подходов к обеспечению внутренней и внешней интероперабельностей предприятия.

Ключевые слова: цифровое предприятие, моделирование, архитектура, интероперабельность, системы управления предприятием.

Abstract. The report presents modern approaches, models and standards of digital enterprise architecture in accordance with the concept of “4.0 industry”. It is proved that the choice of architecture and model of digital enterprise management should be determined on the basis of the process model and architecture of business processes of the organization. The profile of the requirements of international and national standards for the implementation of the architectural approach in the design and modeling of the digital double of the enterprise is proposed. The problems associated with the integration and interoperability of enterprise management automation systems, taking into account the specifics of their functional purpose and basic platform. The basic concepts in the field of approaches to ensuring internal and external interoperability of the enterprise are given.

Keywords: digital enterprise, modeling, architecture, interoperability, enterprise management system.

Национальная стратегия развития цифровой экономики и реализация национальной технологической инициативы ориентированы на применение сквозных цифровых технологий и создание цифровых фабрик будущего в соответствии с концепцией «Индустрия 4.0». [1 – 8] Применительно к промышленной сфере разработана ведомственная программа «Цифровая промышленность», в которой детализированы цели и задачи цифровизации и цифровой трансформации с учетом влияния промышленной сферы на формирование национальной цифровой экономики.

Рассматривая приоритетные направления развития цифровых предприятий, как основы развития цифровой промышленности и ее отраслевых сегментов, необходимо учитывать опыт немецких промышленников, которые в 2011 г. инициировали создание концепции «Индустрия 4.0» [1 – 4]. Основная идея концепции заключается в создании стратегических конкурентных преимуществ для немецкой промышленности на основе цифровой интеграции отраслей и обеспечения формирования сквозных цепочек добавленной стоимости при условии сокращения сроков поставок продукции, повышения качества и снижения издержек в рамках сквозной цепочки жизненного цикла. В последующем, в рамках развития этой концепции были определены восемь основных направлений, среди которых необходимо особо отметить следующие:

– стандартизация и создание эталонной архитектуры Индустрии 4.0;

– управление комплексными системами на основе новых концепций планирования и функционального моделирования;

– глобальная широкополосная инфраструктура для промышленности;

– образование и повышение квалификации, включая разработку новых стратегий развития и оценки цифровых компетенций в соответствии с Индустрией 4.0;

– нормативно-правовая база для развития новых производственных процессов и деловых объединений с горизонтальной структурой.

В этой связи следует отметить приоритетность направления, связанного со стандартизацией и созданием эталонной архитектуры Индустрии 4.0. В настоящее время разработку стандартов в области Индустрии 4.0 выполняют технические комитеты и подкомитеты международных организаций по стандартизации (ISO – Международная организация по стандартизации, IEC – Международная электротехническая комиссия, ITU-T – сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи, ITU-R – сектор радиосвязи Международного союза электросвязи), региональных организаций по стандартизации (CEN – Европейский комитета по стандартизации, CENELEC – Европейский комитет по электротехнической стандартизации, GOST – Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации), международных объединений (IEEE – Институт инженеров электротехники и электроники, ISA – Стандарты промышленной архитектуры и др.). В Германии разработку стандартов в этой новой и быстро развивающейся сфере выполняют специально созданные комитеты и рабочие группы (DIN – Немецкий институт по стандартизации, DKE – Немецкая комиссия по электронике и электротехнике, VDMA – Союз машиностроителей Германии, VDI – Объединение немецких инженеров и др.). Инициативное развитие работ по стандартизации, весьма вероятно, обусловит проблемы, связанные с гармонизацией стандартов. В этой связи для российской промышленности важное значение имеет взаимодействие и участие в работе совместных групп по стандартизации эталонной архитектуры «Индустрии 4.0», имеющей основополагающее значение для развития цифровых платформ и их интеграции. [9]

Развивая технологию «умных заводов» и «цифровых фабрик будущего», четвертая промышленная революция формирует новый мир, в котором виртуальные и цифровые сегменты производственной инфраструктуры гибко взаимодействуют между собой на глобальном уровне. В сочетании с развитием промышленного «интернета вещей» (IIoT), сетевых и облачных технологий, суперкомпьютинга, больших данных, виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальностей появилась реальная возможность реализации виртуальных и цифровых предприятий, отвечающих требованиям эталонной архитектуры и национального профиля стандартов (рис. 1).

Рис. 1. Цифровое предприятие и виртуальное предприятие в аспекте развития цифровой экономики

Разработка эталонных архитектур и профилей стандартов должна учитывать определенную специфику, которую необходимо создать, в первую очередь, для отрасли машиностроения, являющейся базой для развития промышленности. С учетом этих перспективных задач в октябре 2018 г. по инициативе руководства МГТУ «СТАНКИН» была образована Ассоциация «Цифровые инновации в машиностроении» (АЦИМ), учредителями АЦИМ стали ведущие предприятия промышленной сферы (АО «НПО «Энергомаш», Балтийская промышленная компания, Ковровский электромеханический завод, АО «ВНИИНСТРУМЕНТ», ОАО «Саста», DMG MORI Россия, ООО «Семаргл», НТЦ «Технолог», ОАО «Подольский электромеханический завод», ООО «Коско», ОАО «НИАТ» и др.), ИТ-компании (1С, АСКОН, Цифра, Ай-Теко и др.), ведущие российские университеты («МГТУ «СТАНКИН», Санкт-Петербургский политехнический университет, Уральский ФУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Ульяновский ГУ, Ульяновский ГТУ, Тамбовский ГТУ, Севастопольский ГУ и др.). Избрано правление АЦИМ в составе 10 членов, председателем правления избран Б. М. Позднеев, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных систем и технологий МГТУ «СТАНКИН».

Модель цифровых инноваций в машиностроении (ЦИМ) включает 4 ключевых направления деятельности (рис. 2) для гармоничного решения задач в области стратегического прогнозирования, создания технологических платформ и инфраструктуры, стандартизации и сертификации процессов и продукции, развития компетенций и кадрового обеспечения [10 – 13]. Применительно к задачам стандартизации необходимо указать, что существующие международные и национальные стандарты содержат лишь общие положения, касающиеся интеграции и интероперабельности систем управления масштаба производства и(или) предприятия (рис. 3). Инициирование разработки стандартов для создания архитектуры цифрового предприятия является приоритетной задачей для членов АЦИМ.

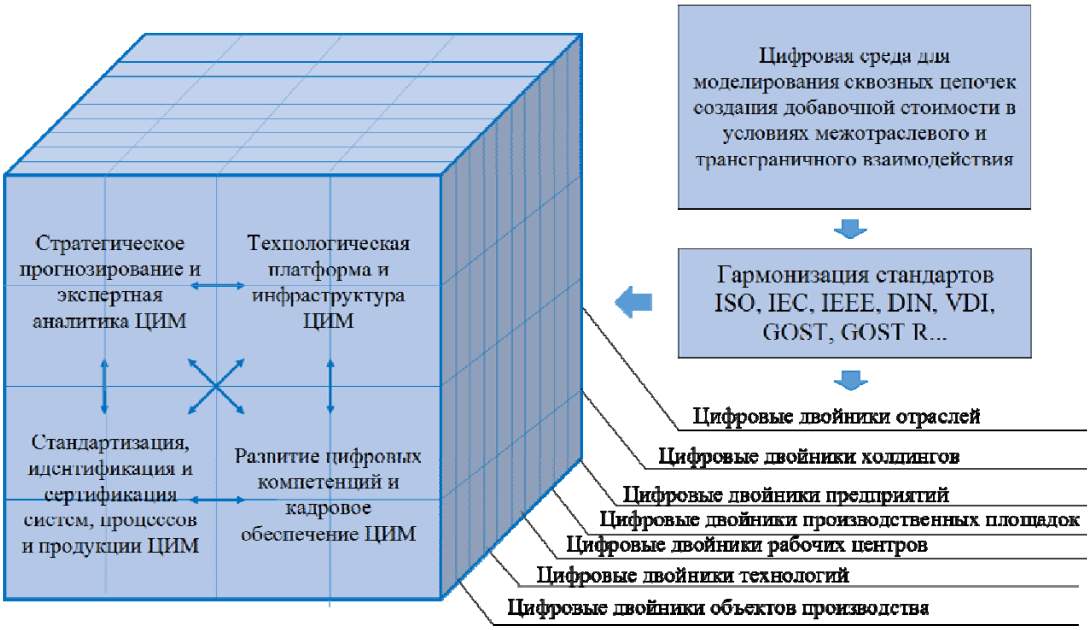


Рис. 2. Модель цифровых инноваций в машиностроении

Рис. 3. Интеграция и систем управления предприятием на основе стандартов

Другой важный аспект деятельности АЦИМ будет связан с подготовкой и переподготовкой кадров для создания цифровых предприятий ОПК на основе изучения лучших практик, международных и национальных стандартов в следующих областях: информационные технологии; интероперабельность; стратегический менеджмент; менеджмент знаний; менеджмент рисков; менеджмент качества и др. Без этого невозможно подготовить кадры новой формации, способные создавать цифровые фабрики будущего и высококонкурентную продукцию для внутреннего и внешнего рынка. В аспекте импортозамещения необходимо мотивировать отечественные ИТ-компании к созданию на базе ведущих университетов научно-образовательных полигонов для ускорения процессов освоения перспективных информационно-программных средств и платформ в области цифрового производства. В настоящее время фирма «1С» и МГТУ «СТАНКИН» реализуют проект по созданию пилотного проекта «Виртуальное машиностроительное предприятие» (рис. 4), который предполагает развитие в форме корпоративной среды для членов АЦИМ и других заинтересованных сторон [10 – 14].

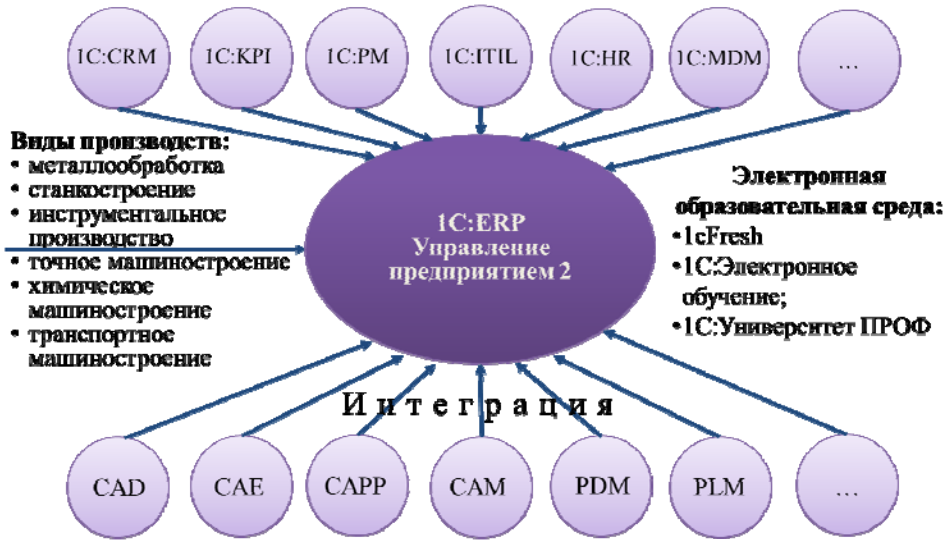


Рис. 4. Информационная среда виртуального машиностроительного предприятия на базе «1С:ERP»

Объединение и координация деятельности всех заинтересованных сторон для решения выше указанных задач, позволит внести реальный вклад в выполнение государственной политики по цифровизации и цифровой трансформации отрасли машиностроения в соответствии с лучшими мировыми практиками и стандартами.

Список использованных источников

1. **Шваб, К.** Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – М. : Эксмо, 2016. – (Top Business Awards). – 138 с.

2. **Роджерс, Д. Л.** Цифровая трансформация : практическое пособие / Д. Л. Роджерс ; пер. с англ. – М. : Издательская группа «Точка», 2017. – 344 с.

3. **Боровков, А. И.** Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад департамента корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО / А. И. Боровков. – М., 2017. – 84 с.

4. **Липкин, Е.** Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции / Е. Липкин. – М. : ООО «Остек-СМТ», 2017. – 224 с.

5. **Бирбраер, Р. А.** Основы инженерного консалтинга: Технология, экономика, организация / Р. А. Бирбраер, И. Г. Альтшулер. – 3-е изд. – М. : Дело, 2011. – 232 с.

6. **Андриченко, А.** Управление Корпоративными мастер-данными в промышленных холдингах и корпорациях / А. Андриченко // Станкоинструмент. – 2016. – № 4. – М. : РИЦ «Техносфера». – С. 54 – 62.

7. **Цифровое** машиностроение: тенденции и перспективы развития / С. Н. Григорьев, Г. М. Мартинов, В. М. Чадеев, Н. И. Аристова // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 5. – М. : ИПУ РАН. – С. 3–4.

8. **Кривошеев, О. В.** Система полного жизненного цикла «Цифровое предприятие» / Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса : сб. докл. VI Международного Форума / О. В. Кривошеев. – М. : Connect, 2017. – С. 22.

9. **Компьютерный** менеджмент качества и развитие персонала в условиях цифрового машиностроения / Б. М. Позднеев, П. Е. Овчинников, И. А. Куприяненко, В. И. Шароватов // I Научно-практический Форум «Вопросы качества продукции военного и гражданского назначения организаций оборонно-промышленного комплекса : сб. докл. – М. : Connect, 2018. – С. 100–101.

10. **Позднеев, Б. М.** О создании научно-образовательного полигона «Виртуальное машиностроительное предприятие» / Б. М. Позднеев ; под общ. ред. проф. Д. В. Чистова // Новые информационные технологии в образовании : сб. науч. тр. 18-й Междунар. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии в образовании» (Применение технологий «1С» для развития компетенций цифровой экономики) 30–31 января 2018 г. – М. : ООО «1С Паблишинг», 2018. – Ч. 2. – С. 255 – 257.

11. **Гарбук, С. В.** Цифровое производство в контексте Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации / С. В. Гарбук // VI Международный Форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса : сб. докл. – М. : Connect, 2017. – С. 48–49.

12. **Организация** проектирования специальной технологической оснастки / А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов, А. А. Краснов, А. Н. Шурпо // Вестник МГТУ

«СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. – М. : ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 2017. – № 1(40). – С. 84 – 89.

13. **Организация** виртуального предприятия – будущее производства / А. Н. Феофанов, Е. Ю. Бондарчук, С. А. Тясто // Вестник МГТУ «СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. – М. : ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – 2018. – № 3(46). – С. 101 – 105.

14. **Ковалев, С. П.** Модельно-ориентированный подход к управлению жизненным циклом сложных технических изделий / С. П. Ковалев, А. В. Толок // 14-я Междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта : тез. докл. (CAD/CAM/PDM-2014, Москва). – М. : ООО «Аналитик», 2014. – С. 13.

References

1. **Schwab, K.** The Fourth Industrial Revolution / K. Schwab. – World Economic Forum, 2016. – 198 p.

2. **Rogers, D**. The Digital Transformation Playbook: Rethink Your Business for the Digital Age (Columbia Business School Publishing) / D. Rogers. – Columbia Business School, 2016. – 282 p.

3. **Borovkov, A. I.** Tchifrovoe proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhologii / A. I. Borovkov // Rabochii doklad departamenta korporativogo obucheniya Moskovskoi shkoly upravleiya SKOLKOVO. – M. : 2017. – 84 p.

4. **Lipkin, E.** Industriya 4.0. Umnye technologii – kluchevoi element v promyshlennoi konkurentchii / E. Lipkin. – M., 2017. – 224 p.

5. **Birbraer, R. A.** Osnovy inzhenernogo konsaltinga: Tekhnologiya, ekonomika, orgaizatchiya / R. A. Birbraer, I. G. Altshuler. – M., 2011. – 232 p.

6. **Andrichenko, A.** Upravleniye Korporativnymi master dannymi v promyshlenyh holdingah i korporatchiyah. / A. Andrichenko // Stankoinstrument. – 2016. – № 4. – P. 54 – 62.

7. **Tchifrovoe** mashostroyenie: tendenchii i perspektivy razvitiya / S. N. Grigoryev, G. M. Martiov, V. M. Chadeev, N. I. Aristova // Avtomatizatchiya v promyshlennosti. – 2017. – № 5. – P. 3–4.

8. **Krivosheev, O. V.** Sistema polnogo zhiznennogo tchikla “Tchifrovoe proizvodstvo” / O. V. Krivosheev // Sborik dokladov VI mezhdunarodogo foruma Informatchionnye techologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa”. – M., 2017. – P. 22.

9. **Pozdneev, B. M.** O sozdanii nauchno-obrazovatelogo poligona “Virtualnoe mashinostroitelnoe predpriyatie” / B. M. Pozdneev ; pod obschey redaktciei prof. D.V. Chistova // Novye informatchionye tehnologii v obrazovaii. Sborik nauchnyh trudov 18-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentchii “Novye informatchionnye tehnologii v obrzovanii” (Primenenie tehologii “1C” dlya razvitiya kompetentchii tcifrovoi ekonomiki) 30–31 Yanvarya 2018 g. – M., 2018. – Chast 2. – P. 255 – 257.

10. **Kompyuternyi** menegment kachestva I razvitiye persoala v usloviyah tcifrovogo mashinostroeniya / B. M. Pozdneev, P. E. Ovchinikov, I. A. Kupriyanenko, V. I. Sharovatov // Sborik dokladov I Nauchno-praktichskogo foruma “Voprosy kachestva produktchii voennogo i grazhdanskogo naznacheniya orgaizatchii oboronno-promyshlennogo kompleksa”. – M., 2018. – P. 100–101.

11. **Garbuk, S. V.** Tcifrovoe proizvodstvo v kontekste Strategii nauchno-tehologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatchii / S. V. Garbuk // Sborik dokladov VI mezhdunarodogo foruma “Informatchionnye techologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa”. – M., 2017. – P. 48–49.

12. **Feofanov, A. N.** Organizatchiya virtualnogo predpriyatiya – buduschee proizvodstva / A. N. Feofanov, E. U. Bondarchuk, S. A. Tyasto // Vestnik MGTU “STANKIN”. – 2018. – № 3(46). – P. 101 – 105.

13. **Kozlov, A. M.** Intellektualnaya navykovaya sistema avtomatizirovanogo vybora marshrutnyh tehnologii mehanoobrabotki detalei / A. M. Kozlov, I. I. Shatskih, V. V. Kavygin // Vestnik MGTU “STANKIN”. – 2017. – № 3(42). – P. 90 – 93.

14. **Kovalev, S. P.** Modelno-orientirovannyi podhod k upravleniu zhiznenym tchiklom izdelii / S. P. Kovalev, A. V. Tolok // Tezisy dokladov 14-i Mezhdunarodoy konferetchii “Sistemy proektirovaniya, tehologicheskoi podgotovki proizvodstva i upravleiya etapami zhiznenogo tchikla promyshleogo produkta” (CAM/CAD/PDM-2014, Moskva) – M., 2014. – P. 13.

УДК 004.056.53

Ганиев А. А.[1], Гуломов Ш. Р.[2]
Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада аль-Хорезми, Узбекистан, г. Ташкент
[1](Тел. (+99898)305-67-30, e-mail: abduhalilganiev58@gmail.com),
[2]Тел. (+99890)970-84-64, e-mail: sherhisor30@gmail.com)

СЕТЕВЫЕ АТАКИ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

Ganiev A. A.[1], Gulomov Sh. R.[2]
Tashkent University of Information Technologies
named after Muhammad al-Khwarizmi, Uzbekistan, Tashkent
[1](Tel. (+99898)305-67-30, e-mail: abduhalilganiev58@gmail.com),
[2](Tel. (+99890)970-84-64, e-mail: sherhisor30@gmail.com)

NETWORK ATTACKS AND THEIR EFFECTS IN THE COMPUTER NETWORKS

Аннотация. Данный доклад посвящен анализу атак сетевого уровня, использующих уязвимости протоколов сетевого взаимодействия. Предложена модель защиты сетевого трафика, позволяющая сократить время реакции на атаки типа DDoS.

Ключевые слова: HTTP flood атака, Slowloris атака, SSL запросы, Smurf-атака, DDoS атака, легитимный трафик.

Abstract. This report is devoted to the analysis of network layer attacks that exploit the vulnerabilities of network communication protocols. A model protection of network traffic was proposed, which makes it possible to reduce the response time to DDoS attacks.

Keywords: HTTP flood attack, Slowloris attack, SSL requests, Smurf-attack, DDoS attack, legitimate traffic.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие информационно-коммуникационных систем. При этом данные системы очень сложны, поэтому с их развитием у хакеров появляется все больше возможностей для проведения успешных атак на узлы компьютерных систем.

Подобный рост атакующих действий год за годом требует задействования существенно больших сил и временны́х затрат со стороны администраторов и аналитиков безопасности. В организациях и компаниях, вовлеченных в производство критически важной продукции, для поддержания безопасности корпоративных сетевых ресурсов расходуются крупные финансовые и материальные средства, направленные на содержание специального оборудования. Поэтому задача обнаружения сетевых атак является актуальной.

Сетевые атаки столь же многообразны, как и системы, против которых они направлены. Некоторые атаки отличаются большой сложностью, другие по силам обычному оператору, даже не предполагающему, к каким последствиям может привести его

деятельность [1]. Сеть Интернет создавалась для связи между государственными учреждениями и университетами в целях оказания помощи учебному процессу и научным исследованиям. Создатели этой сети не подозревали, насколько широкое распространение она получит. В результате в спецификациях ранних версий интернет-протокола отсутствовали требования безопасности [2, 3]. Поэтому многие реализации IP являются изначально уязвимыми и незащищенными.

На рисунке 1 приведена классификация сетевых атак в компьютерных сетях.

В таблице 1 приведена DDoS-атаки возможны на каждом из семи уровней.

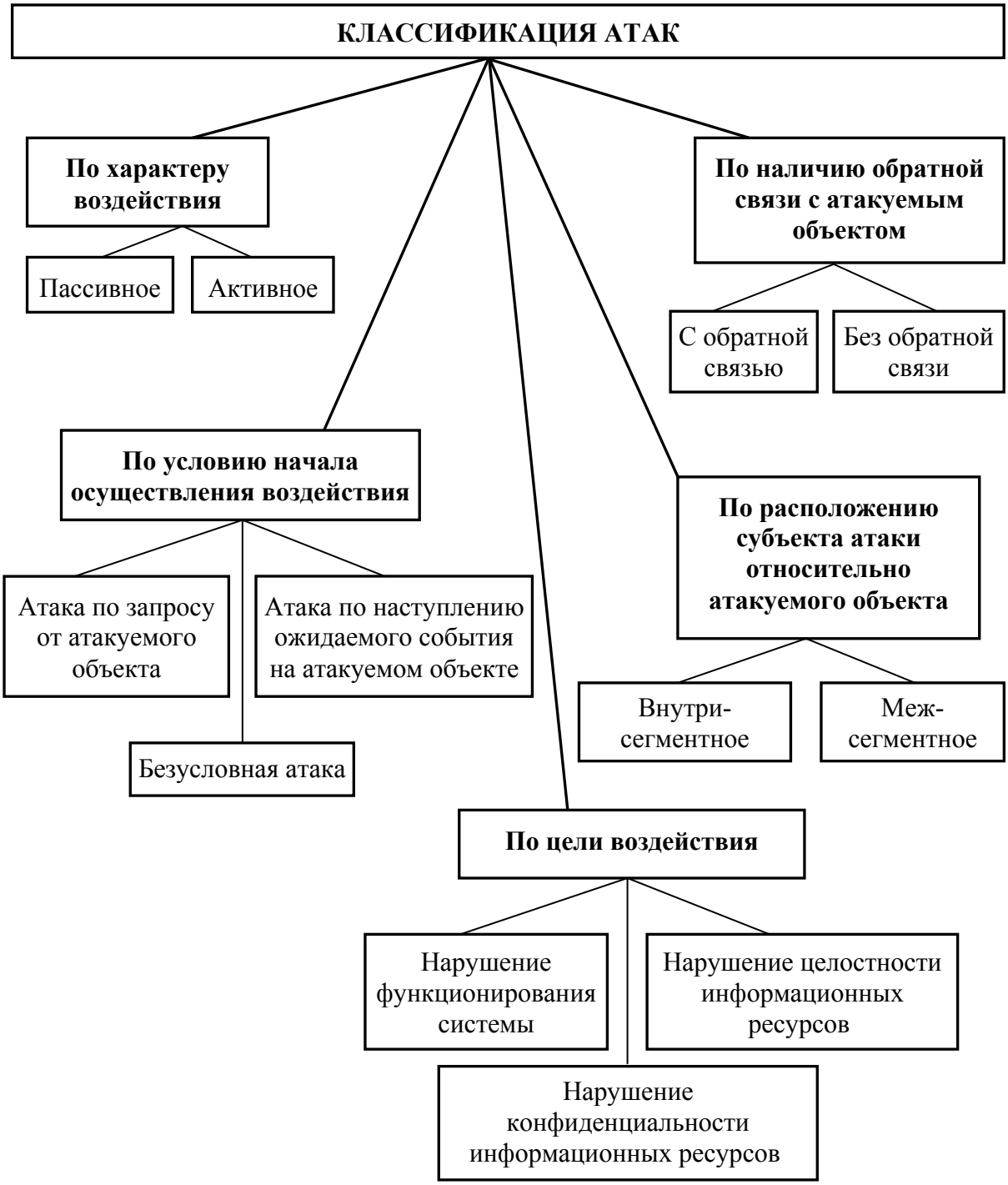


Рис. 1. Классификация сетевых атак в компьютерных сетях

1. Сравнительный анализ возможных атак на различных уровнях модели OSI

Модель OSI		Примеры технологий DDoS	Последствия DDoS-атаки
7	Прикладной уровень	PDF GET-запросы, HTTP GET, HTTP POST, HTTP flood, Slowloris Attack (логин, загрузка фото/видео, подтверждение обратной связи)	Нехватка ресурсов. Чрезмерное потребление системных ресурсов службами на атакуемом сервере
6	Представительский уровень	Подложные SSL-запросы: проверка шифрованных SSL пакетов очень ресурсоемка, злоумышленники используют SSL для HTTP-атак на сервер жертвы	Атакуемые системы могут перестать принимать SSL-соединения или автоматически перегружаться
5	Сеансовый уровень	Атака на протокол Telnet использует слабые места программного обеспечения Telnet-сервера на свитче, делая сервер недоступным	Делает невозможным для администратора управление свитчем
4	Транспортный уровень	SYN-флуд, Smurf-атака (атака ICMP-запросами с измененными адресами)	Достижение пределов по ширине канала или по количеству допустимых подключений, нарушение работы сетевого оборудования
3	Сетевой уровень	ICMP-флуд – DDos-атаки на третьем уровне модели OSI, которые используют ICMP-сообщения для перегрузки пропускной способности целевой сети	Снижение пропускной способности атакуемой сети и возможная перегруженность межсетевого экрана
2	Канальный уровень	MAC-флуд – переполнение пакетами данных сетевых коммутаторов	Потоки данных от отправителя получателю блокируют работу всех портов
1	Физический уровень	Физическое разрушение, физическое препятствие работе или управлению физическими сетевыми активами	Сетевое оборудование приходит в негодность и требует ремонта для возобновления работы

Формальная модель защиты информации от DDoS-атак описывается с использованием формальных теоретико-множественных конструкций [4, 5].

Представим модель защиты информации от DDoS-атак в виде кортежа:

$$M = < IP, OP, HN, HC, IA, U >, \quad (1)$$

где IP – входящие пакеты; OP – Выходящие пакеты; HN – множество узлов (хостов) компьютерной сети; HC – множество связей между узлами компьютерной сети; IA – сценарий реализации атаки; U – параметр, характеризующий действия пользователя.

На рисунке 2 приведена формальная модель защиты сетевого трафика от DDoS-атак.

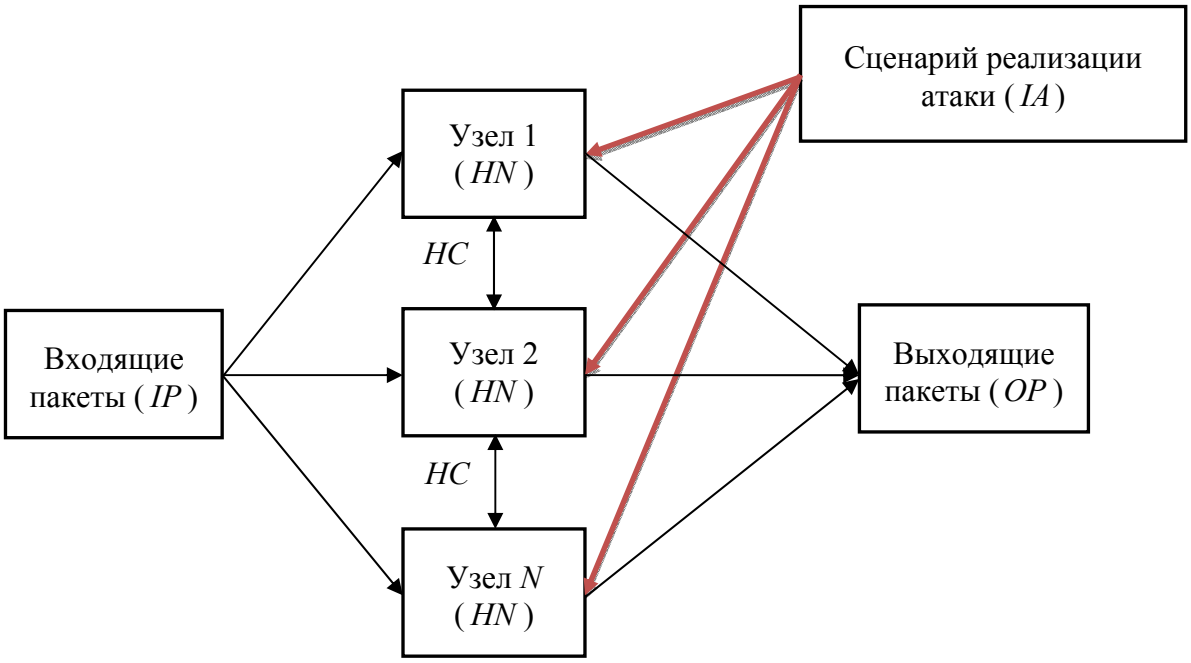


Рис. 2. Формальная модель защиты сетевого трафика от DDoS-атак

Множество HN -узлов зададим в виде кортежа элементов:

$$HN = < Equipment, Role, Software, Hardware, Function >,$$

где $Equipment$ – множество типов оборудования, соответствующее узлу вычислительной сети; $Role$ – множество функциональных ролей узла; $Software$ – множество компонентов программного обеспечения, используемого узлами; $Hardware$ – множество компонентов аппаратного обеспечения, используемого узлами; $Function : Role \rightarrow Software$ – функция, реализующая отображение множества функциональных ролей узла на множество компонентов программного обеспечения.

Программным компонентом ПО является протокол, реализующий набор правил и позволяющий осуществлять соединение и обмен данными между двумя и более включенными в сеть устройствами.

Множество связей HC между узлами компьютерной сети в контексте различных протоколов описывается следующим образом: считается, что узлы 1, 2, …, N сети связаны посредством некоторого протокола, если существует хотя бы одна непустая конечная последовательность с начальным узлом 1 и конечным узлом 2, через которые будет проходить сообщение.

Сценарий реализации атаки содержит:

$$IA = < IA_{function\ attack}, IA_{against\ attack}, IA_{legitimate\ activities}, IA_{warning\ about\ attack}, IA_{response\ to\ attack} >, \quad (2)$$

где $IA_{function\ attack}$ – функционирование DDoS-атаки; $IA_{against\ attack}$ – сдерживания DDoS-атаки и противодействия атакам; $IA_{legitimate\ activities}$ – легитимной деятельности компьютерной сети; $IA_{warning\ about\ attack}$ – предупреждение о DDoS-атаке; $IA_{response\ to\ attack}$ – реагировать на DDoS-атаки.

В этом случае каждый промежуточный сценарий становится объектом последующей декомпозиции.

Сценарии $IA_{function\ attack}$ содержат под сценарии распространения DDoS-атаки, управления ею и реализации атак.

Сценарии $IA_{against\ attack}$ содержат под сценарии противодействия распространению DDoS-атаки, противодействия управлению ею и противодействия реализации атак.

Сценарии $IA_{legitimate\ activities}$ предназначены для генерации шаблонов легитимного трафика.

Сценарии $IA_{warning\ about\ attack}$ предназначены для смягчения последствия нападения на жертву.

Сценарии $IA_{response\ to\ attack}$ предназначены для обнаружения DDoS-атак и реагирование на них.

В результате проведенного анализа классификации сетевых атак на различных уровнях модели OSI было установлено, что для построения эффективных средств защиты информации от сетевых атак требуется разработка модели защиты сетевого трафика. Предложенная модель защиты сетевого трафика позволяет более эффективно защищать компьютерные сети от сетевых атак и сократить время реакции на атаки типа DDoS.

Список использованных источников

1. **Жигулин, Г. П.** Информационная безопасность / Г. П. Жигулин, С. Г. Новосадов, А. Д. Яковлев. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2013.

2. **Скворцов, М. А.** Разработка методики выявления сетевых атак с помощью Data Mining / М. А. Скворцов // Молодой ученый. – 2016. – № 10. – С. 87 – 89.

3. **Ennert, M.** Testing of IDS model using several intrusion detection tools / M. Ennert, E. Chovancov´a, Z. Dudl´akov´a // Journal of Applied Mathematicsand Computational Mechanics. – 2015. – V. 14, № 1. – P. 55 – 62.

4. **Jyothsna, V.** A review of anomaly based intrusion detection systems / V. Jyothsna, V. R. Prasad, K. M. Prasad // International Journal of Computer Applications. – 2011. – V. 28, № 7. – P. 26 – 35.

5. **Широков, А.,** Дискретная математика. Основные теоретико-множественные конструкции : учебно-методическое пособие / А. Широков, В. Грузман, Ю. Прокопчук. – ЛитРес, 2013. – Ч. VI. – 184 с.

УДК 531.7.084: 621.397

Львов А. А.[1], Кузин С. А.[1], Светлов М. С.[2], Львов П. А.[3]
[1]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, г. Саратов
(Тел. (8452)998732, e-mail: alvova@ mail.ru; kuzinsa@mail.ru),
[2]Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, г. Саратов
(Тел. (8452)236387, e-mail: svetlovms@yandex.ru),
[3]Энгельсское опытное конструкторское бюро им. А. И. Глухарева, Россия, г. Энгельс
(e-mail: peter.lvov@ gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНОГО РАДИОКАНАЛА СВЯЗИ

L'vov A. A.[1], Kuzin S. A.[1], Svetlov M. S.[2], L'vov P. A.[3]
[1]Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov
(Tel. (8452)998732, e-mail: alvova@ mail.ru; kuzinsa@mail.ru),
[2]Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Russia, Saratov
(Tel. (8452)236387, e-mail: svetlovms@yandex.ru),
[3]Engels Experimental Design Bureau "Signal" named after A. I. Glukharev, Russia, Saratov
(e-mail: peter.lvov@ gmail.com)

SIMULATION OF WIRELESS PRESSURE SENSOR NETWORK BASED ON RADIO COMMUNICATION

Аннотация. В работе представлена новая распределенная измерительная система, основанная на использовании беспроводной сети интеллектуальных датчиков давления, и результаты компьютерного моделирования этой системы. Для датчиков в различных узлах системы применяется новый тип формирователя сигналов в виде петли переменного тока. Описана оптимальная процедура обработки сигналов с датчиков, включенных в токовую петлю, основанная на решении получающихся уравнений по методу максимального правдоподобия. Проведено сравнение предлагаемой методики обработки с известной классической, подтвердившее преимущества нового подхода: повышение точности измерения с одновременным снижением стоимости системы в целом.

Ключевые слова: радиолокационная сеть интеллектуальных датчиков, метод максимального правдоподобия, математическая модель.

Abstract. The paper presents a new distributed measuring system based on the use of a wireless network of intelligent pressure sensors, and the results of computer simulation of this system. For sensors in various nodes of the system, a new type of signal conditioner in the form of an AC loop is used. The optimal procedure for processing signals from sensors included in the current loop, based on solving the resulting equations by the maximum likelihood method, is described. A comparison of the proposed processing technique with the well-known classical one was carried out, which confirmed the advantages of the new approach, namely, an increase in the measurement accuracy while reducing the cost of the whole system.

Keywords: radar network of intelligent sensors, maximum likelihood method, mathematical model.

Контроль состояния современных летательных аппаратов (ЛА) и управления ими в процессе испытаний и эксплуатации является актуальной задачей авиастроения. Одним из наиболее перспективных путей решения этой задачи, не получившим пока широкого распространения, является непрерывный мониторинг состояния всех подсистем ЛА с помощью технологии беспроводных систем датчиков. С приходом технологий распределенного сбора информации стали активно развиваться системы управления, основанные на беспроводных устройствах связи. Это позволяет не только упростить установку измерительной аппаратуры на ЛА и снизить стоимость ее обслуживания, но также существенно сократить объем используемых кабельных линий связи, что снижает общий вес устанавливаемого оборудования [1 – 3].

Предлагаемая работа посвящена созданию распределенной измерительной системы датчиков ЛА на основе применения беспроводной связи по радиоканалу (РК) в сочетании с технологией петли переменного тока [2], используемой для создания формирователей сигнала наборов датчиков, обслуживающих конкретные узлы и подсистемы ЛА.

Анализ известных распределенных информационно-измерительных систем (ИИС), основанных на беспроводных мультисенсорных сетях [3, 4], показал, что наиболее удачной является иерархическая структура организации системы сбора информации. На первом (нижнем) иерархическом уровне находятся датчики – источники информации о контролируемых параметрах или подсистемах ЛА; на втором (среднем, промежуточном) – автономные вычислительные устройства (концентраторы), снабженные приемопередатчиками сигналов, к которым присоединяется несколько датчиков, осуществляющих сбор информации о конкретном узле или подсистеме; на третьем (верхнем) – центральный пункт управления и сбора измерительной информации (ЦПУиСИИ), управляющий ее обменом между концентраторами и устройствами окончательной обработки информации. Управление режимами сбора информации и основная обработка получаемых данных от концентраторов осуществляется специальным программным обеспечением ЦПУиСИИ. Такая структура сети позволит организовать централизованное управление режимами сбора данных в процессе испытаний и эксплуатации ЛА, осуществить бесперебойный сбор данных с заданной частотой измерений, оперативно обработать и отобразить данные в реальном времени. На рисунке 1 дана архитектура предлагаемой иерархической модульной распределенной ИИС.

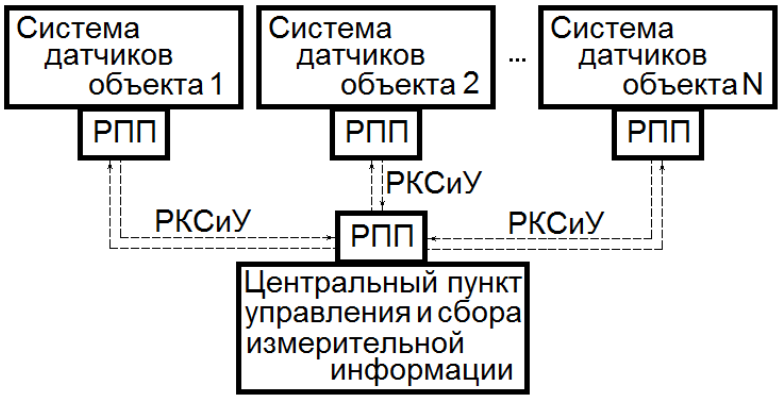


Рис. 1. Архитектура распределенной системы датчиков:
РПП – радиоприемопередатчик; РКСиУ – РК связи и управления

Система датчиков каждого из N объектов (контролируемых узлов ЛА) имеет автономное питание и управляющий контроллер, который связан с ЦПУиСИИ по РК, для чего все объекты снабжаются РПП. ЦПУиСИИ поочередно опрашивает системы датчиков и получает информацию о значениях измеряемых параметров каждого объекта.

Исходя из практических соображений, с учетом реальной топологии размещения датчиков на борту ЛА, для минимизации длины линий связи от датчиков до блоков концентраторов, можно рекомендовать организацию групп датчиков по кустовому принципу. При этом каждый куст (группа датчиков) работает на свой концентратор.

В предыдущих работах [2, 5] авторы предложили идею использования петли переменного тока в качестве формирователя сигналов системы датчиков (любой физической природы), производящих сбор информации о том или ином узле ЛА. Были показаны преимущества такого подхода, главными из которых являются независимость откликов датчиков от сопротивлений соединительных проводов и высокая чувствительность схемы, которая примерно вдвое выше чувствительности традиционно используемых мостовых схем формирования сигналов датчиков.

Архитектура формирователя сигналов с использованием петли переменного тока системы интеллектуальных датчиков (ИД), снимающих измерительную информацию с некоторого узла (объекта) с номером i (i = 1, 2, …, N), показана на рис. 2.

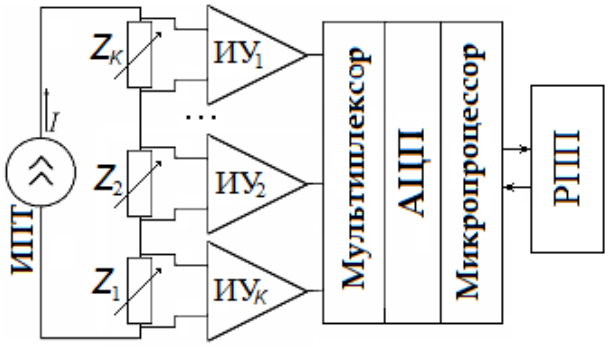


Рис. 2. Архитектура системы ИД, установленных на объекте *i*:
ИУ – измерительные операционные усилители; ИПТ – источник переменного тока;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Число K датчиков для каждого объекта может быть различным. ИД имеют собственные полные сопротивления (импедансы) Z_k, природа которых может быть различной (чисто резистивная, емкостная, индуктивная, а также смешанная).

Будем полагать, что ИУ не являются прецизионными (в целях сокращения стоимости всей системы), поэтому у них может быть «дрейф нуля». Кроме того, источник переменного тока тоже выбирается относительно недорогим, поэтому стабильность его частоты не может быть гарантирована. Тем не менее, предполагается, что в течение одного цикла измерения выходных сигналов ИД частота источника и смещение нуля ИУ остаются постоянными, но их значения точно не известны.

После дискретизации сигналов с выходов ИД вся последующая обработка в целях получения оценок неизвестных измеряемых физических величин проводится микропроцессором. Поэтому математическая модель выходного сигнала k-го датчика у i-го объекта распределенной системы после процедуры оцифровки может быть записана в виде

$$u_{ikj} = A_{ik}\sin[2\pi(f_{0i} + \nu_i)t_{kj} + \varphi_{ik}] + B_{ik} + \xi_{ikj},$$
$$i = 1, 2, \ldots, N; \quad k = 1, 2, \ldots, K; \quad j = 1, 2, \ldots, M, \tag{1}$$

где A_{ik} и φ_{ik} – неизвестные амплитуда и фаза сигнала в k-м канале i-го объекта, подлежащие оценке; ν_i – малая неизвестная флуктуация центральной частоты f_{0i} ИПТ у i-го объекта, возникающая из-за возможной его нестабильности; B_{ik} – постоянное смещение, необходимое для положительности оцифровываемого сигнала в АЦП, но не известное из-за возможного «дрейфа нуля» ИУ; ξ_{ikj} – случайная погрешность измерения напряжения у k-го канала i-й системы в момент времени t_{kj}, возникающая из-за влияния тепловых шумов усилителей и других факторов и предполагаемая нормально распределенной с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией σ^2. Для сокращения записей в дальнейшем опустим индекс объекта i, предполагая, что подобные операции проводятся для всех N объектов (рис. 1).

Величина ν считается очень малой по сравнению с f_0 ($|\nu / f_0| \le 0{,}01$), потому что стабильность частоты современных недорогих отечественных генераторов тока не ниже 1%. При этом моменты взятия выборок в разных каналах t_{kj} и t_{mj} не равны между собой для различных каналов ($k \ne m$).

При сделанных допущениях система уравнений (1) должна быть решена относительно параметров A_k, φ_k, B_k и ν. Всего в ней $3K + 1$ неизвестных. Если общее время измерений не превышает нескольких периодов (2–3 периодов) тока, питающего петлю, то величина $\nu N\tau \le 0{,}15$ (где $\tau = t_{kj} - t_{k(j-1)}$ – период дискретизации сигналов в АЦП). В этом случае синус и косинус малого аргумента νt_{ko} могут быть приближенно равны: $\sin\nu t_{kj} \approx \nu t_{kj}$ и $\cos\nu t_{kj} \approx 1$. Тогда система (1) может быть переписана в виде

$$u_{kj} \approx A_k\sin(2\pi f_0 t_{kj})\cos\varphi_k + A_k 2\pi\nu t_{kj}\cos(2\pi f_0 t_{kj})\cos\varphi_k + A_k\cos(2\pi f_0 t_{kj})\sin\varphi_k -$$
$$- A_k 2\pi\nu t_{kj}\sin(2\pi f_0 t_{kj})\cos\varphi_k + B_k + \xi_{kj}, \quad k = 1, 2, \ldots, K; \quad j=1, 2, \ldots, M. \tag{2}$$

Следующая замена переменных:

$$\begin{cases} q_{1k} = A_k\cos\varphi_k, \\ q_{2k} = A_k\nu\cos\varphi_k, \\ q_{3k} = A_k\sin\varphi_k, \\ q_{4k} = A_k\nu\sin\varphi_k, \\ q_{5k} = B_k, \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} x_{1kj} = \sin 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{2kj} = 2\pi t_{kj}\cos 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{3kj} = \cos 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{4kj} = -2\pi t_{kj}\sin 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{5kj} = 1; \end{cases}$$
$$k = 1, 2, \ldots, K; \quad j = 1, 2, \ldots, M \tag{3}$$

делает систему (2) линейной относительно новых неизвестных $\boldsymbol{q} = (q_{11}, \ldots, q_{51}, \ldots, q_{1K}, \ldots, q_{5K})^T$ (T обозначает транспонирование матрицы):

$$u_{kj} = \sum_{m=1}^{5} q_{mk}x_{mkj} + \xi_{kj}, \quad k = 1, 2, \ldots, K; \quad j = 1, 2, \ldots, M. \tag{4}$$

Из (3) и (4) видно, что общее число неизвестных q_{mk} равно $5K$. Следовательно, число измерений напряжения в каждом канале должно быть не меньше этой величины ($M \ge 5K$), но для повышения точности оценивания желательно выбрать M, в несколько раз большим, чем $5K$.

Однако с математической точки зрения должны существовать $2K - 1$ билинейных уравнений связи на эти переменные q_{mk}, которые легко находятся из (3):

$$q_{1k}q_{4k} = q_{2k}q_{3k}; \quad \nu = q_{2k}/q_{1k}; \quad k = 1, 2, \ldots, K. \tag{5}$$

При сделанных допущениях относительно погрешностей измерения ξ_{kj} оптимальные оценки неизвестных параметров $\boldsymbol{q}$ могут быть получены путем решения линейной системы уравнений (4) по методу максимального правдоподобия (ММП) [6] с учетом билинейных ограничений (5).

Стандартный метод, предложенный в [7] и использованный в [2, 5, 6], позволяет предложить итерационный алгоритм решения задачи (4), (5). Он основан на естественном предположении, что погрешности ξ_{kj} по абсолютной величине существенно меньше, чем значения сигнала u_{kj} ($|\xi_{kj}| << u_{kj}$). В этом случае решение, которое выбирается в качестве нулевого приближения, совпадает с решением по методу наименьших квадратов:

$$\mathbf{q}_0 = \left(\mathbf{X}^T\mathbf{X}\right)^{-1}\left(\mathbf{X}^T V\right), \tag{6}$$

где –1 обозначает нахождение обратной матрицы. После этого задача (4), (5) может быть решена с помощью метода множителей Лагранжа:

$$\mathbf{q}_{m+1} = \mathbf{q}_m - \frac{\mathbf{q}_m^T\mathbf{G}\mathbf{q}_m}{2\mathbf{q}_m^T\mathbf{G}(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{G}\mathbf{q}_m}(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{G}^T\mathbf{q}_m, \tag{7}$$

где m – порядковый номер итерации, а блочные матрицы $\mathbf{X}$ и $\mathbf{G}$ задаются выражениями, приведенными в [6]. Как указано в работах [6, 7], сходимость предлагаемого алгоритма очень высокая (как правило, не требуется более 2–3 итераций).

После нахождения оценок промежуточных неизвестных $\mathbf{q}$ достаточно просто вычислить оценки искомых параметров модели (1), подставив значения этих оценок в (3):

$$\hat{\nu} = \frac{1}{2K}\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{\hat{q}_{2k}}{\hat{q}_{1k}} + \frac{\hat{q}_{4k}}{\hat{q}_{3k}}\right), \quad \hat{\varphi}_k = \begin{cases} \alpha_k, & \hat{q}_{1k} \ge 0, \hat{q}_{3k} \ge 0; \\ \alpha_k + \pi, & \hat{q}_{1k} < 0; \\ \alpha_k + 2\pi, & \hat{q}_{1k} > 0, \hat{q}_{3k} < 0, \end{cases} \quad \begin{matrix} \hat{A}_k = \sqrt{\hat{q}_{1k}^2 + \hat{q}_{3k}^2}, \\ 0 \le \hat{\varphi}_k \le 2\pi, \\ \alpha_k = \operatorname{arctg}(\hat{q}_{3k} / \hat{q}_{1k}). \end{matrix} \tag{8}$$

Зная из (8) оценки амплитуд и фаз сигналов с выходов всех датчиков, можно определить значения измеряемых физических величин, которые характеризуют исследуемый объект.

Использование предлагаемого формирователя сигналов в сочетании с описанной процедурой оценивания параметров датчиков позволяет существенно снизить требования к идентичности используемых чувствительных элементов, включенных в токовую петлю (что является обязательным, например, для мостовых формирователей сигнала). Более того, стабильность частоты ИПТ может не соблюдаться, потому что возможные колебания частоты учитываются описанной моделью. Таким образом, стоимость системы датчиков, используемых для сбора информации с какого-либо объекта (узла) ЛА, может быть значительно уменьшена.

Сравнительный анализ точности предлагаемой методики оценивания амплитуд сигналов на выходах датчиков давления был проведен с помощью компьютерного статистического имитационного моделирования. Исследовалась точность оценивания

амплитуд A_k предлагаемой методики по сравнению с известной методикой оценивания семи параметрической задачи [8].

Точность измерения характеризовалась стандартным отклонением (STD) погрешностей оценивания. Частота источника тока была равна f_0 = 20 кГц, а частота взятия выборок с помощью АЦП $f_m = 1/\tau$ была в 10 раз выше. Вариация основной частоты выбиралась из диапазона от 0 до 200 Гц. Отношение сигнал/шум (SNR) задавалось соотношением A_k^2/σ^2.

Типичные результаты моделирования показаны на рис. 3, где в логарифмическом масштабе показаны зависимости STD погрешностей оценивания от величины отношения SNR, полученные двумя упомянутыми методами.

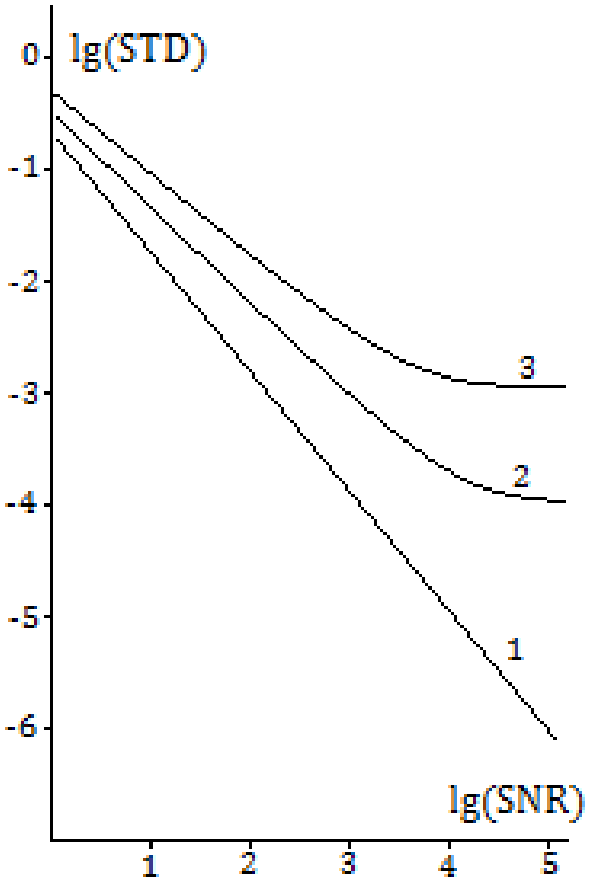


Рис. 3. Зависимости lg(STD) от lg(SNR) для двух методов оценивания:
1 – оценивание по методике данной работы; *2*, *3* – оценивание по методике работы [8]
(кривая *2* соответствует расстройке ν = 30 Гц, кривая *3* – расстройке ν = 180 Гц)

Из рисунка видно, что метод, предложенный в [8], имеет систематические погрешности, обусловленные тем, что с его помощью не очень точно оценивается вариация частоты ν. Вместе с тем, предлагаемый метод измерения не делает систематических погрешностей, и его точность определяется только отношением SNR. При этом точность оценивания методом из работы [8] снижается с увеличением величины погрешности знания исходной частоты источника переменного тока, что подтверждает тезис о неудачном оценивании величины ν.

В работе описана топология распределенной системы сбора информации, основанная на использовании системы ИД и предназначенная для применения в ЛА гражданского назначения. Система строится по модульному иерархическому принципу. На нижнем уровне используются системы датчиков, обслуживающих конкретные узлы или подсистему ЛА. Все датчики, собирающие информацию с одного узла, соединены по проводным каналам с одним концентратором, совокупность которых представляет собой второй (средний) уровень распределенной системы. Концентраторы осуществляют обмен полученными от датчиков и предварительно обработанными данными по беспроводному РК с ЦПУиСИИ, находящимся на третьем (верхнем) уровне.

Проведено компьютерное моделирование работы нового формирователя сигнала, подтвердившее преимущество предлагаемой методики обработки сигналов с датчиков давления по сравнению с известной классической методикой.

Список использованных источников

1. **Tian, G. Y.** Design and Implementation of Distributed Measurement Systems Using Fieldbus-Based Intelligent Sensors / G. Y. Tian // IEEE Trans. Instrument. Measur., 2001. – V. 50, № 5. – P. 1197 – 1202.

2. **The use** of current loop circuit as a signal conditioner for high accuracy digital piezoresistive pressure sensors / A. A. L'vov, P. A. L'vov, R. S. Konovalov, S. A. Kuzin // X Internat. Scien. &Techn. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". Proceed. – Omsk : Omsk State Technical University, Russia, 2016.

3. **Сергиевский, М. В.** Использование беспроводных сенсорных сетей для сбора, передачи и обработки информации в системах мониторинга состояния объектов / М. В. Сергиевский, С. Н. Сыроежкин // Cloud of Science. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 125 – 136.

4. **Sergievskiy, M. V.** The Use of Wireless Sensor Technologies for Condition Monitoring of Modern Aircraft Structures / M. V. Sergievskiy, S. N. Syroezhkin // Modern Applied Science. – 2015. – V. 9, № 8. – P. 266 – 269.

5. **L'vov, A. P.** Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing / A. L'vov, P. L'vov, R. Konovalov // Proceed. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2016. – P. 279 – 282.

6. **Распределенная** система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи / Д. В. Кленов, А. А. Львов, П. А. Львов и др. // VIII Всерос. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика» : сб. науч. тр. – Ростов-н/Дону ; Таганрог : Изд-во Южного федерального университета, 2017. – С. 306 – 313.

7. **Репин, В. Г.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М. : Сов. радио, 1977. – 432 с.

8. **Händel, P.** Properties of the IEEE-STD-1057 Four-Parameter Sine Wave Fit Algorithm / P. Händel // IEEE Trans. on. Instrument. Measur. – 2000. – V. 49, № 6. – P. 1189 – 1193.

УДК 665.63.67

Муталов Ш. А.[1], Хужамшукуров Н. А.[2]
Ташкентский химико-технологический институт, Узбекистан, г. Ташкент
[1](Тел. (0371)2447920, e-mail: info@tkti.uz),
[2](Тел. (+99893)5781503, e-mail: nkhujamshukurov@mail.ru)

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫСШЕГО ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УЗБЕКИСТАНЕ

Mutalov Sh. A.[1], Khujamshukurov N. A.[2]
Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan, City of Tashkent
[1](Tel.: (0371)2447920, e-mail: info@tkti.uz),
Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan, City of Tashkent
[2](Tel.: +99893)5781503, e-mail: nkhujamshukurov@mail.ru)

IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF HIGHER CHEMICAL TECHNOLOGY EDUCATION IN UZBEKISTAN

Аннотация. Кардинальная реформа системы высшего образования в Узбекистане началась в 1997 году с принятия Закона об образовании и Национальной программы подготовки кадров. ТХТИ является ведущим химико-технологическим вузом Узбекистана. Институт обучает по государственным образовательным стандартам, готовит выпускников, востребованных на современном рынке труда. В данном статье дано краткое содержание об образовательной системе института.

Ключевые слова: Ташкентский химико-технологический институт, химико-технологического образования, системы высшего образования, бакалавриат, магистратура.

Abstract. Fundamental reform of the higher education system in Uzbekistan began in 1997 with the adoption of the law on education and the National Training Programme. Tashkent Institute of Chemical Technology is the leading chemical and technological university in Uzbekistan. The university provides training in compliance with the state educational standards, training professionals for the modern labor market. This article gives a summary of the educational system of the university.

Keywords: Tashkent Institute of Chemical Technology, chemical technology education, higher education system, bachelor degree programs, graduate programs.

Реформы в секторе высшего образования страны. Кардинальная реформа системы высшего образования в Узбекистане началась в 1997 году с принятия Закона об образовании и Национальной программы подготовки кадров. Реформы в секторе высшего образования страны привели к полному переходу на трехуровневую систему подготовки высококвалифицированных кадров, состоящее из программы бакалавриата (4 года), магистратуры (2 года) и базовой докторантуры/докторантуры (3 года).

Меры по дальнейшему развитию системы высшего образования. В последнее время был принят ряд нормативных документов для дальнейшего усовершенствования системы высшего образования. Согласно Указу Президента Ш. Мирзиеева от 20.04.2017 года «О мерах по дальнейшему развитию системы высшего образования» были определены основные направления модернизации и развития высшего образования.

В настоящее время для дальнейшего совершенствования и комплексного развития системы высшего химико-технологического образования нами определены следующие задачи:

– установление тесных перспективных партнерских отношений с ведущими профильными зарубежными научно-образовательными учреждениями, широкое внедрение в учебный процесс передовых педагогических технологий, учебных программ и учебно-методических материалов, основанных на международных образовательных стандартах;

– активное привлечение к научно-педагогической деятельности, проведению мастер-классов, курсов повышения квалификации высококвалифицированных преподавателей и ученых из зарубежных образовательных учреждений-партнеров, организацию на системной основе на их базе стажировки магистрантов, молодых преподавателей и научных кадров, переподготовки и повышения квалификации профессорско-преподавательских кадров отечественных высших образовательных учреждений;

– неуклонное повышение уровня и качества профессионального мастерства педагогических кадров, прохождение повышения квалификации, стажировки педагогических и научных сотрудников, обучение выпускников высших образовательных учреждений по программам PhD и магистратуры за рубежом;

– широкое привлечение к образовательному процессу высших образовательных учреждений и центров переподготовки и повышения квалификации высококвалифицированных зарубежных ученых, преподавателей и специалистов;

– укрепление научного потенциала высших образовательных учреждений, дальнейшее развитие вузовской науки, усиление ее интеграции с академической наукой, повышение эффективности и результативности научно-исследовательской деятельности профессорско-преподавательского состава, вовлечение одаренной студенческой молодежи в занятия научной деятельностью.

Ташкентский химико-технологический институт (ТХТИ), основанный в мае 1991 года на основе химико-технологического факультета Ташкентского политехнического института ТХТИ, является ведущим химико-технологическим вузом Узбекистана. Институт готовит специалистов для предприятий химической, нефтеперерабатывающей, биохимической промышленности, а также промышленности строительных материалов, фарфоро-фаянсовой, мебельный, деревообрабатывающей, масложировой, мукомольной, консервной, мясо-молочной промышленности, а также биотехнологии.

ТХТИ сегодня:

– в настоящее время институт состоит из 6 факультетов, 27 кафедр, академического лицея, где обучается 4450 студентов;

– 380 педагогических сотрудников: кандидатов наук, доцентов, докторантов, в том числе 50 докторов наук и профессоров;

– 14 направлений бакалавриата;

– 22 специальностей магистратуры;

– 14 специальностей докторантуры;

– 4 программы магистратуры по «Двойному диплому» с Белорусским государственным техническим университетом;

– 2 направления подготовки кадров на базе «Совместного факультета с РХТУ им. Д. И. Менделеева в ТХТИ.

Открытие совместной Узбекско-Китайской научно-исследовательской лаборатории «Автоматизированная технология производства модифицированного асфальта» (09.10.2018).

В июне 2016 года был подписан меморандум о сотрудничестве с Шаньдунской Академией наук. На основе подписанных меморандумов о взаимопонимании молодые

ученые ТХТИ – Шерзод Маматов, Хасанов Жахонгир и Мурод Самадий успешно провели научную стажировку в институте Биологии Шандунской Академии Наук и успешно защитили свои докторские диссертации в г. Ташкенте.

В настоящее время молодые исследователи кафедры «Информатика, автоматика и управление» – Фархад Касимов и «Основы механики – машины и оборудование пищевой промышленности» – Омон Бердиев готовятся к стажировке в Институте автоматики Шаньдунской Академии Наук.

На основе подписанного соглашения между ТХТИ и Институтом Автоматики Шаньдунской Академии Наук в феврале 2018 года в ТХТИ привезено оборудование из Китая стоимостью около 140 000 долларов США и открыта современная совместная научно-исследовательская лаборатория.

Повышение квалификации преподавательского состава, обучение и стажировка студентов и педагогических и научных сотрудников. В связи с этим предусмотрено организовать повышение квалификации, стажировку педагогических и научных сотрудников, а также обучение выпускников высших образовательных учреждений по программам PhD и магистратуры в зарубежных образовательных и научных учреждениях.

При поддержке фонда «Эл юрт умиди» 9 преподавателей ТХТИ прошли повышение квалификации и стажировку в зарубежных ВУЗах-партнерах ТХТИ:

Norwish Institute for Language Education (UK);

– Казанском научно-исследовательском национальном университете;
– Могилевском государственном университете продовольствия;
– Университете Латвии.

При поддержке фонда «Эл юрт умиди» проходят обучение в аспирантуре и магистратуре: Абдурахманов Одилжон – РХТУ им. Д. И. Менделеева, аспирантура; Эркинов Фаррух – Университет Ульсан, Корея, магистратура.

Существующие и перспективные направления бакалавриата для совместной подготовки специалистов на основе двойного диплома (в сотрудничестве с Российскими ВУЗами):

НАПРАВЛЕНИЯ БАКАЛАВРИАТА В РФ	НАПРАВЛЕНИЯ БАКАЛАВРИАТА В ТХТИ
09.03.01 – Системы автоматизированного проектирования химических производств	5311000 – Автоматизация и управление производств и технологических процессов (по направлениям производства)
28.03.03 – Наноматериалы	В перспективе
28.03.02 – Наноинженерия • Наноинженерия для химии, фармацевтики и биотехнологии	В перспективе
20.03.01 – Техносферная безопасность	В перспективе
18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии. 18.03.02.01 – Основные процессы химических производств и химическая кибернетика	В перспективе В перспективе

УДК 004.92

Пупыкина А. А.[1], Очеповский А. В.[2], Гущина О. М.[3], Насонов Д. А.[4]
[1]Миланский технический университет, Италия, г. Милан
(e-mail: anna.pupykina@polimi.it),
[2]Тольяттинский государственный университет, Россия, г. Тольятти
(Тел. (8482)546473, e-mail: ochepovsky@mail.ru)
[3]Тольяттинский государственный университет, Россия, г. Тольятти
(Тел. (8482)539181, e-mail: ok_mih@mail.ru),
[4]Тольяттинский государственный университет, Россия, г. Тольятти
(e-mail: senior.nasonow@gmail.com)

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ЗУБНЫХ КОРОНОК ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ 3D-МОДЕЛИ ЧЕЛЮСТИ

Pupykina A. A.[1], Ochepovsky A. V.[2], Gushchina O. M.[3], Nasonov D. A.[4]
[1]Politecnico di Milano, Italy, Milano
(e-mail: anna.pupykina@polimi.it),
[2]Togliatti State University, Russia, Togliatti
(Tel. (8482)546473, e-mail: ochepovsky@mail.ru)
[3]Togliatti State University, Russia, Togliatti
(Tel. (8482)539181, e-mail: ok_mih@mail.ru),
[4]Togliatti State University, Russia, Togliatti
(e-mail: senior.nasonow@gmail.com)

ALGORITHM FOR THE BOUNDARY DETECTION OF DENTAL CROWNS FOR 3D DENTAL MODEL SEGMENTATION

Аннотация. В этой статье представлен алгоритм сегментации цифровой 3D-модели челюсти, использующий нечеткий многокритериальный анализ и Visualization Toolkit (VTK) для выделения границ зубных коронок. Этот алгоритм является частью разработки программного приложения создания 3D-моделей элайнеров. Вычисление контура производится на основе двух точек, выбранных пользователем. Нечеткий многокритериальный анализ с применением парных сравнений вершин сетки цифровой модели направлен на отбор подмножества точек на границе между зубной коронкой и челюстью. VTK позволяет ускорять разработку за счет применения готовых средств визуализации и алгоритмов компьютерной графики. Эксперимент показал, что представленный подход позволяет успешно выделить зубную коронку на цифровой 3D-модели челюсти.

Ключевые слова: цифровая модель, многокритериальный анализ, элайнер, сегментация 3D-модели, матрица попарных сравнений.

Abstract. This paper presents the segmentation algorithm on the 3D digital dental model for separating individual dental crown using a fuzzy multi criteria analysis and Visualization Toolkit (VTK). The aim is to apply the algorithm in the 3D aligner development software package. The digital dental model is produced by 3D scanner in STL format and dental crown contour is calculated based two control points defined by user. Fuzzy multi criteria analysis with pairwise comparison of the mesh points aims to select a subset of points that define the boundary between the dental crown and the jawbone. The VTK provides ease of use of computer graphics algorithms and visualization tools. The experiment has shown that the proposed approach can successfully separate a dental crown on the 3D digital dental model.

Keywords: digital model, multi criteria analysis, aligners, 3D model segmentation, pairwise comparison matrix.

Нескоординированное направление роста зубов (неправильный прикус) может вызывать физиологические, физические и социальные аспекты, влияющие на качество жизни человека, так как здоровье полости рта является основой общего состояния здоровья. На сегодняшний день внимание сосредоточено на наименее агрессивных процедурах ортодонтального лечения, позволяющих пациентам достигать ожидаемых результатов. Современная технология лечения неправильного прикуса с помощью пластиковых элайнеров появилась в США в конце 90-х годов благодаря внедрению компьютерных технологий в стоматологические дисциплины. Компьютерные алгоритмы, используемые при диагностике дефектов полости рта, нуждаются в цифровых моделях челюсти пациента. Существует три наиболее часто используемых пути получения таких моделей:

– компьютерная томография (КТ) и конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ);
– прямое внутриротовое сканирование зубного ряда;
– лазерное/оптическое сканирование гипсовых моделей.

В последние несколько лет КЛКТ получила большую популярность в ортодонтиической практике ввиду возможности трехмерного сканирования челюсти и зубов. В отличие от обыкновенных КТ-сканеров, КЛКТ подходит для использования в клинической стоматологии, где стоимость и доза радиации является серьезным ограничением. Реконструкция цифровой модели челюсти на основе КЛКТ включает в себя анализ множества срезов, на которых область зуба может быть выделена путем изучения интенсивности серого цвета пикселя [2].

Внутриротовые сканеры были введены в стоматологическую практику для замены процедуры снятия слепка челюсти сравнительно недавно. Такой сканер очень прост в использовании и генерирует стереолитографические (STL) файлы, которые применяются для создания цифровых моделей. Специальное программное обеспечение, поставляемое совместно с внутриротовыми сканерами, используется для планирования зубного лечения [3].

Несмотря на это, многие зубные клиники не могут позволить себе использование дорогого оборудования или попросту не хотят полагаться на рабочий процесс, предоставляемый производителями сканеров. Тем не менее планирование зубного лечения могло бы воспользоваться положительными чертами 3D-реконструкции. Несмотря на то, что таким способом можно сканировать только видимые поверхности, у него есть и много плюсов, таких как легкость в использовании, самокалибровка и автоматическая коррекция искажений изображения [4]. В данной работе мы сосредоточимся на цифровых моделях, сгенерированных 3D-сканерами по гипсовым моделям челюсти или, внутриротовыми сканерами в STL-формате.

Коррекция прикуса производится при помощи изменения расположения зубов. Для этого необходимо извлечь модели отдельных зубов из исходной модели. Выделение индивидуальных моделей зубов в модели челюсти является важным этапом перед выполнением перемещения и вращения моделей зубов.

В последнее время были подробно изучены методы сегментации 3D-моделей [5]. В том числе были предложены подходы, предназначенные для решения проблемы выделения зубов. Среди них есть как автоматизированный, на основе проставления узловых точек и сечения плоскостью [6], а также полностью автоматический алгоритм, тоже основанный на методике сечения плоскостью [7].

Эти приемы генерируют горизонтальную плоскость, параллельную оклюзионной плоскости. Эта плоскость может перемещаться пользователем вверх и вниз. Далее для каждой точки цифровой модели челюсти определяется, по какую сторону плоскости она лежит. Следующим шагом программа генерирует вертикальные плоскости, разделяющие зубы. К модели зуба относятся все точки, лежащие между двумя определенными вертикальными плоскостями. Различие между этими двумя подходами заключается в способе определения секущей горизонтальной плоскости. В отличие от алгоритма [6], использующего контрольные точки, выбираемые пользователем для определения расположение плоскости, алгоритм [7] полностью автоматический. Главный недостаток этого метода заключается в том, что контур зубной коронки не может быть получен проверкой пересечения с плоскостью.

Кроме того, можно выделить ряд исследований о выделении моделей зубов в целях идентификации человека. В автоматическом алгоритме сегментации для зубной биометрии [8] зубная область вычисляется при помощи информации о геометрической кривизне. Результаты предварительного анализа данного алгоритма выглядят хорошо. Однако полная реализация контурной модели является довольно сложной задачей, так как выбор коэффициентов модели произволен и получается эмпирическим путем.

Определение контура зубной коронки. Наш подход к извлечению моделей зубов как отдельных объектов основан на определении контура зубной коронки. Определение контура зубной коронки может быть реализовано двумя способами:

– ручное выделение по точкам;
– автоматизированное выделение.

Второй способ позволяет определить границу зубной коронки на основе всего двух точек и состоит из следующих шагов:

– размещение двух точек, определяющих границы зубной коронки вдоль челюстной дуги;
– автоматическое определение контура зубной коронки, основанное на двух точках;
– ручная модификация автоматически построенного контура пользователем.

Для реализации первого способа использован *vtkContourWidget*. Этот виджет VTK позволяет пользователям размещать точки на модели и автоматически соединяет их линией. Кроме того, при изменении положения пользовательских контурных точек, контур автоматически перестраивается. *vtkContourWidget* также может быть использован для реализации второго способа. Для этой цели нам сначала нужно инициализировать виджет множеством точек, соответствующих контуру между зубной коронкой и челюстью. Далее будут описаны детали предлагаемого подхода.

Описание проблемы. Проблема определения контура зуба может быть кратко сформулирована следующим образом. Имеется множество точек $P = \{x, y, z\}$ исходной модели челюсти. Необходимо выбрать подмножество точек $P_c \in P$, которое определяет границу между зубной коронкой и челюстью.

Для решения данной проблемы использован нечеткий многокритериальный анализ с применением попарного сравнения. Многокритериальный анализ – это важная задача принятия решений, разработанная для сложных проблем. Стоит отметить, что намного сложнее определить важность конкретного параметра, чем определить лучший из двух при проведении попарных сравнений.

Нечеткий многокритериальный анализ с применением попарного сравнения точек сетки модели. Попарное сравнение используется во избежание прямого указания значения весовых коэффициентов или оценок. Пусть $P = \{p_0, p_1, ..., p_n\}$ множество точек, являющееся субъектом многокритериального анализа, P_{start} и P_{end} – контрольные точки, определенные пользователем, $C = \{c_0, c_1, c_2, c_3,\}$ множество критериев оценки точек;

c_0 – расстояние до контрольной точки P_{start} или P_{end};

c_1 – значение координаты *y*;

c_2 – угол между завихренностью и вектором $\overrightarrow{P_{start} P_{end}}$;

c_3 – значение градиента.

На рисунке 1 можно заметить, что точки, принадлежащие контуру, расположены в местах, где угол между завихренностью и вектором $\overrightarrow{P_{start} P_{end}}$ меняется и становится близок к 90 градусам. Градиент по координате *Y*, так же как и завихренность, может указать на расположение точек контура. На рисунке 2 видно, что точки контура расположены в местах, где градиент меняется от максимального значения и становится близким к минимальному. Оба параметра дают похожие результаты, но в то же время они могут использоваться совместно для определения точек, которые сложны для распознавания, такие, как области возле контрольных точек.

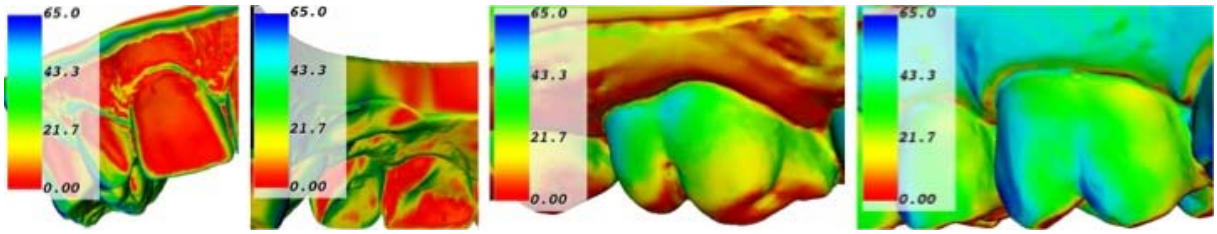


Рис. 1. Отклонение от угла между завихренностью и $\overrightarrow{P_{start} P_{end}}$ от 90 градусов

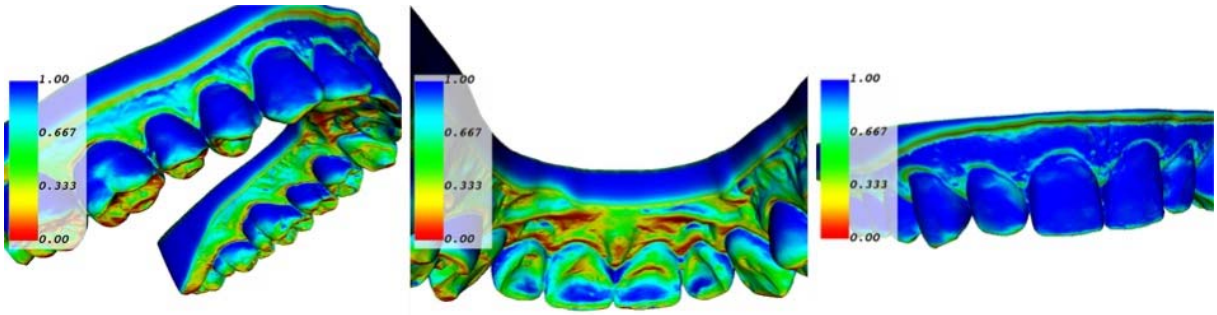


Рис. 2. Градиент по координате *Y*

Для упорядочивания элементов из множества *P* в соответствии с критериями множества *C* предложено использовать следующие шаги:

– зададим нечеткое множество $\widetilde{C}$, определенное на универсальном множестве *P* с функцией степени принадлежности $m^l(p_i)$ для каждого критерия *C*;

– определим функции степени принадлежности нечеткого множества на основе попарных сравнений элементов *P*;

– применим концентрацию $w_l, l = 1...m$ к функциям степени принадлежности для того, чтобы учесть вариативные коэффициенты важности критериев;

– ранжируем все элементы P на основе пересечения нечетких множеств-критериев, опираясь на схему Беллмана–Заде [9].

Для определения функции степени принадлежности необходимо сформировать матрицы попарных сравнений для каждого критерия. Общее число матриц совпадает с количеством параметров. Для параметра c_l матрица попарных сравнений будет выглядеть следующим образом:

$$A(c_l) = \begin{Bmatrix} a_{11}^l & a_{12}^l & \cdots & a_{1n}^l \\ a_{21}^l & a_{22}^l & \cdots & a_{2n}^l \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1}^l & a_{n2}^l & \cdots & a_{nn}^l \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $a_{ij}^l = 1$, если $i = j$, $a_{ij}^l = p_i^l / p_j^l$ для c_3 (для максимизации критерия) и $a_{ij}^l = p_j^l / p_i^l$ для остальных критериев (для минимизации). Матрица попарного сравнения критериев является диагональной, симметричной и транзитивной.

Таким образом, для определения функций степени принадлежности, необходимых для формирования нечеткого множества, может быть применена следующая формула [10]:

$$m^l(p_i) = 1 \big/ \left(a_{1i}^l + a_{1i}^l + ... + a_{ni}^l\right). \quad (2)$$

Коэффициенты относительной важности критериев $w_l, l = 1...m$ таким же образом могут быть рассчитаны по формуле функции степени принадлежности (2) и соответственно должна быть сформирована матрица попарного сравнения критериев (1). Так как в нашем случае нет количественной характеристики важности критерия, мы можем применить девятибалльную шкалу Саати [11]. В таком случае элемент a_{ij}^l матрицы A равен: 1, если критерий c_1 не важнее критерия c_2; 3, если критерий c_1 несильно важнее критерия c_2; 5, если критерий c_1 умеренно важнее критерия c_2; 7, если критерий c_1 значительно важнее критерия c_2; 9, если критерий c_1 критически важен по сравнению с критерием c_2.

Нечеткое множество $\widetilde{D}$, необходимое для анализа точек, определяется как пересечение

$$\widetilde{D} = \left\{ \frac{\min_1^m \left[m^l(p_1)\right]^w}{p_1}, \frac{\min_1^m \left[m^l(p_2)\right]^w}{p_2}, ..., \frac{\min_1^m \left[m^l(p_n)\right]^w}{p_n} \right\},$$

где $m^l(p_i)$ – функция степени принадлежности элемента p_i нечеткому множеству критериев $\widetilde{c}_l$. Степень w производит концентрацию нечеткого множества c_l в соответствии с коэффициентом относительной важности критерия $\widetilde{c}_l \in C$. Анализируя полученное нечеткое множество $\widetilde{D}$, лучшим вариантом по всем критериям будет тот, степень принадлежности которого наибольшая.

Уменьшение количества точек. Анализ всего множества точек может быть очень ресурсозатратным. В целях уменьшения числа точек для проведения многокритериального анализа использован фильтр VTK *vtkPolyDataSilhouette*, который извлекает подмножество границ полигональной сетки для генерации контура (силуэта) соответствующего 3D-объекта. Для получения достаточного множества точек, определяющих контур, *vtkPolyDataSilhouette* должен быть инициализирован для каждого зуба независимо. Определение позиции и фокальной точки камеры позволяют настроить фильтр индивидуально для каждого зуба. Пример применения фильтров *vtkPolyDataSilhouette* для зуба 12 представлен на рис. 3. Направление камеры для каждого случая обозначено стрелкой. Использование *vtkPolyDataSilhouette* значительно снижает число точек для анализа. В то же время главным недостатком данного подхода является недостаток точек в местах, где граница определена нечетко.

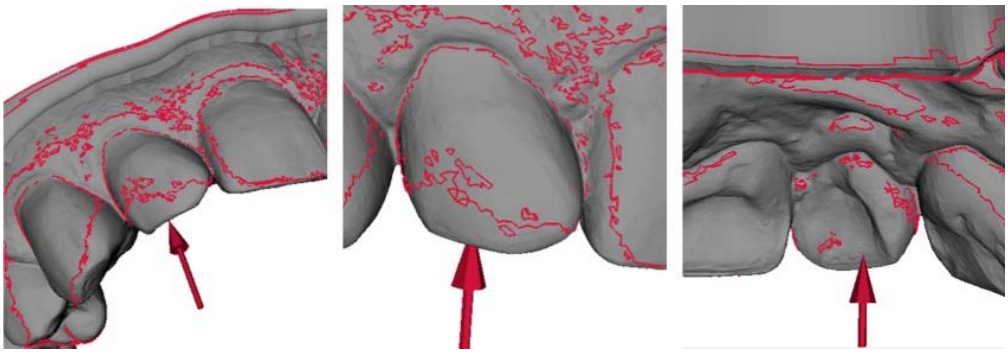


Рис. 3. Применение фильтра vtkPolyDataSilhouette

Эксперимент. Полагаясь на результаты исследования реализованного алгоритма, были сформированы два набора коэффициентов относительной важности. Один из них используется для постепенного спуска от контрольной точки P_{start}, другой для быстрого приближения к точке P_{end}.

Значения попарного сравнения критериев для первого случая следующие: критерий c_0 не важнее критерия c_2; критерий c_0 не важнее критерия c_3; критерий c_1 значительно важнее параметра c_0. Значения попарного сравнения критериев для первого случая следующие: критерий c_0 не сильно важнее критерия c_2; критерий c_0 умеренно важнее критерия c_3; критерий c_0 значительно важнее параметра c_1. В итоге, мы получили следующие матрицы попарного сравнения:

$$A(C_1)=\begin{Bmatrix} 1 & 0{,}14 & 1 & 1 \\ 7 & 1 & 7 & 7 \\ 1 & 0{,}14 & 1 & 1 \\ 1 & 0{,}14 & 1 & 1 \end{Bmatrix},\quad A(C_2)=\begin{Bmatrix} 1 & 7 & 3 & 5 \\ 0{,}14 & 1 & 0{,}43 & 0{,}71 \\ 0{,}33 & 2{,}33 & 1 & 1{,}7 \\ 0{,}2 & 1{,}4 & 0{,}6 & 1 \end{Bmatrix}.$$

По формуле (2) и матрицам $A(C_1)$ и $A(C_2)$ получаем следующие коэффициенты важности: $w_0 = 0{,}1,\ w_1 = 0{,}7,\ w_2 = 0{,}1,\ w_3 = 0{,}1$ и $w_0 = 0{,}6,\ w_1 = 0{,}08,\ w_2 = 0{,}2,\ w_3 = 0{,}12$.

Результирующие контуры представлены на рис. 4 и 5.

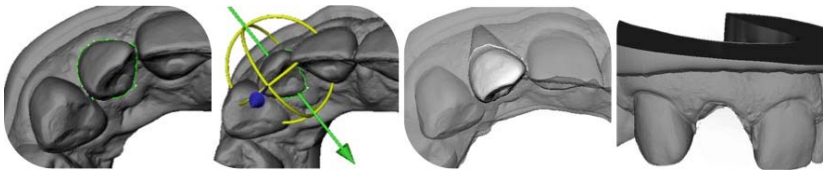


Рис. 4. Контур и сегментирование модели зуба № 12

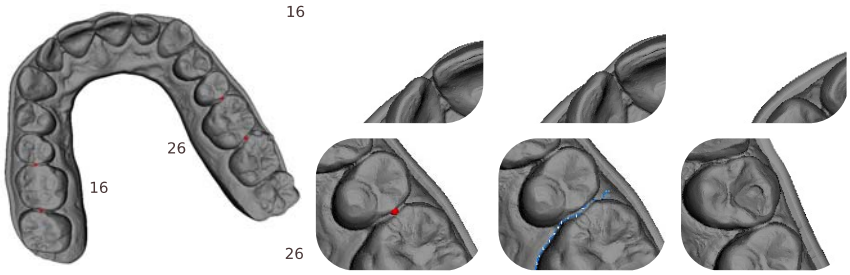


Рис. 5. Контуры и сегментирование для моделей зубов № 16 и 26

Список использованных источников

1. **Letieri, A. S.** Age and aesthetics perception related to different types of orthodontic devices. Is there a relationship? / A. S. Letieri, C. C. Avelar Fernandez, S. O. Aguiar Sales Lima // Journal of the World Federation of Orthodontists. – 2018. – V. 7, № 1. – P. 29 – 33.

2. **Barone, S.** CT segmentation of dental shapes by anatomydriven reformation imaging and Bspline modelling / S. Barone, A. Paoli, A. V. Razionale // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. – 2016. – V. 32, № 6.

3. **Camardella, L. T.** Accuracy and reproducibility of measurements on plaster models and digital models created using an intraoral scanner / L. T. Camardella, H. Breuning, O. de Vasconcellos Vilella // Journal of Orofacial Orthopedics. – 2017. – V. 78, № 3. – P. 211 – 220.

4. **Reliability** of measurements made on scanned cast models using the 3Shape R700 scanner / L. S. Lemos, I. M. Rebello, C. J. Vogel, M. C. Barbosa // Dentomaxillofacial Radiology. – 2015. – V. 44, № 6.

5. **Hackel, T.** Contour Detection in Unstructured 3D Point Clouds / T. Hackel, J. D.Wegner, K. Schindler // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*)*, Las Vegas, NV. – 2016. – V. 1. – P. 1610 – 1618.

6. **Sinthanayothin, C.** Orthodontics treatment simulation by teeth segmentation and setup / C. Sinthanayothin, W. Tharanont // 2008 5th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi. – 2008. – V. 1. – P. 81 – 84.

7. **Wongwaen, N.** Computerized algorithm for 3D teeth segmentation / N. Wongwaen, C. Sinthanayothin // 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, Kyoto. – 2010. – V. 1. – P. 277.

8. **Mairaj** Danish, Wolthusen Stephen D., Busch Christoph. Teeth Segmentation and Feature Extraction for Odontological Biometrics // Proceedings of the 2010 Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Darmstadt. – 2010. – V. 1. – P. 323 – 328.

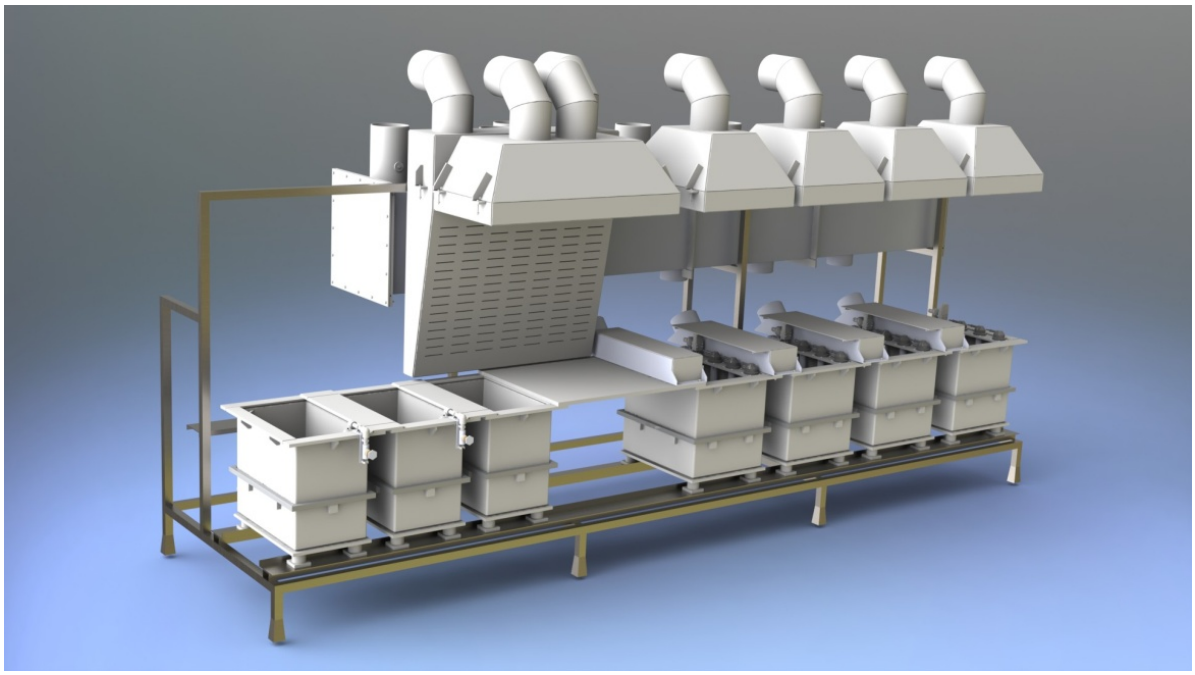
9. **Bellman, R.** Decision Making in a Fuzzy Environment / R. Bellman, L. A. Zadeh // Management Sciences. – 1970. – V. 17. – P. 141 – 164.

10. **Rotshtein, A.** Modication of Saaty method for the construction of fuzzy set membership functions / A. Rotshtein // Fuzzy Logic and Its Applications: International Conference, Zichron, Israel. – 1997. – V. 1. – P. 125 – 130.

11. **Saaty, T. L.** How to make a decision: The analytic hierarchy process / T. L. Saaty // European Journal of Operational Research. – 1990. – V. 48, № 1. – P. 9 – 26.

С е к ц и я I

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



УДК 625.71

Колотвин А. В., Колотвин Д. А.
Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург
(Тел. +7(3532)372513, e-mail: kolotvin@list.ru)

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

Kolotvin A. V., Kolotvin D. A.
Orenburg State University, Russia, Orenburg
(Tel. +7(3532)372513, e-mail: kolotvin@list.ru)

VIRTUAL MODELING AND EVALUATION OF MULTILAYERED PLATES PERFORMANCE

Аннотация. В работе рассмотрены особенности рационального использования трехслойных пластин. Доказана целесообразность использовать средний слой, который выполнен из материала с наименьшим модулем упругости. Приведенные результаты расчетов способны визуально показать возможность работы многослойных пластин без потери прочности конструкции.

Ключевые слова: моделирование, многослойные пластины, трехслойная пластина, прогиб, конечный элемент, напряженно-деформированное состояние, устойчивость.

Abstract. The paper discusses the features of the rational use of three-layer plates. The expediency to use a middle layer, which is made of a material with the lowest modulus of elasticity, is proved. The results of the calculations can visually show the possibility of working multilayer plates without loss of structural strength.

Keywords: modeling, multilayer plates, three-layer plate, deflection, finite element, stress-strain state, stability.

В работе изложены особенности работоспособности многослойных пластин при моделировании трехслойных пластин, средний слой которых выполнен из материала с наименьшим модулем упругости (рис. 1). Такие пластины широко возможно использовать практически в любых областях современной техники, при создании высокопрочных конструкций обладающих высокой степенью защищенности при работе в условиях агрессивных сред.

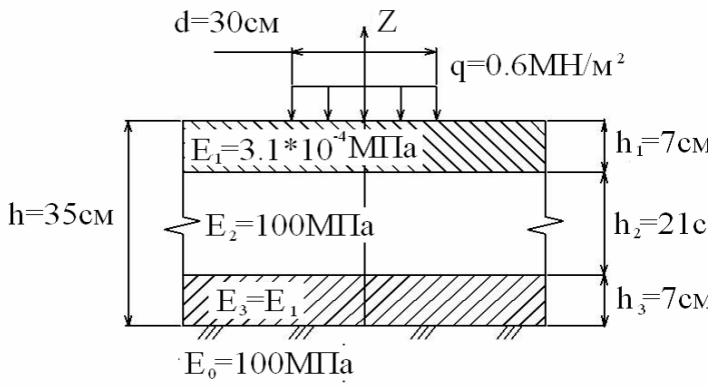


Рис. 1. Трехслойная пластина

Однако следует отметить, что в таких слоистых конструкциях присутствуют слои из высокопрочных материалов, которые воспринимают большую часть нагрузок. Поэтому возникает необходимость определения работоспособности всех слоев конструкции в условиях напряженно-деформированного состояния (НДС).

В основе определения НДС таких пластин лежит теория расчета тонких оболочек с использованием геометрических гипотез, которая существенно упрощает расчет. При решении плоской задачи принято использовать объемный конечный элемент в виде четырехугольника с узлами, в качестве неизвестных выступают перемещения вдоль основных осей и их первые производные по декартовым системам координат. Использованы полиномы Эрмита третей степени для аппроксимации перемещений внутренних точек, а также функционал Лагранжа для получения матрицы жесткости. Для трехслойной пластины определено напряженно-деформированное состояние, на рис. 2 отображено изменение давления и распределение прогибов по поверхности.

При дальнейшем моделировании взята трехслойная пластина, защемленная на левом конце и нагруженная на свободном крае (конце) распределенной нагрузкой (рис. 3). Результаты расчета сведены в табл. 1.

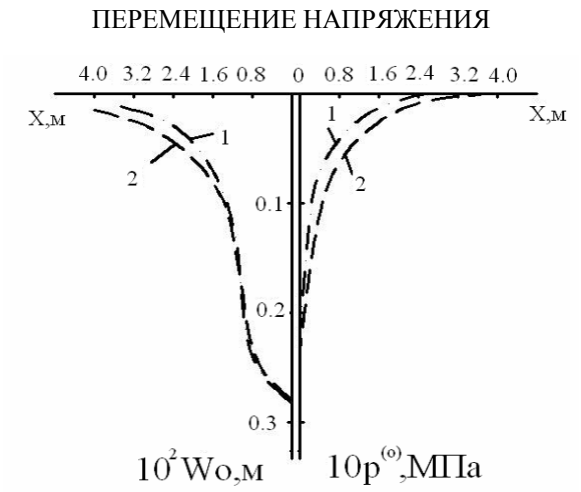


Рис. 2. График напряженно-деформированного состояния пластины

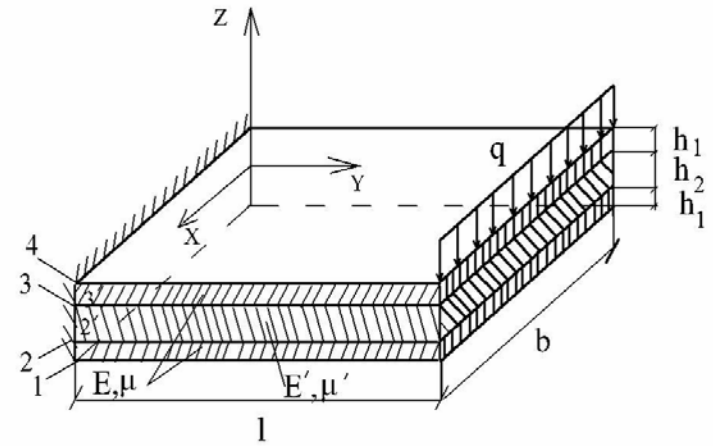


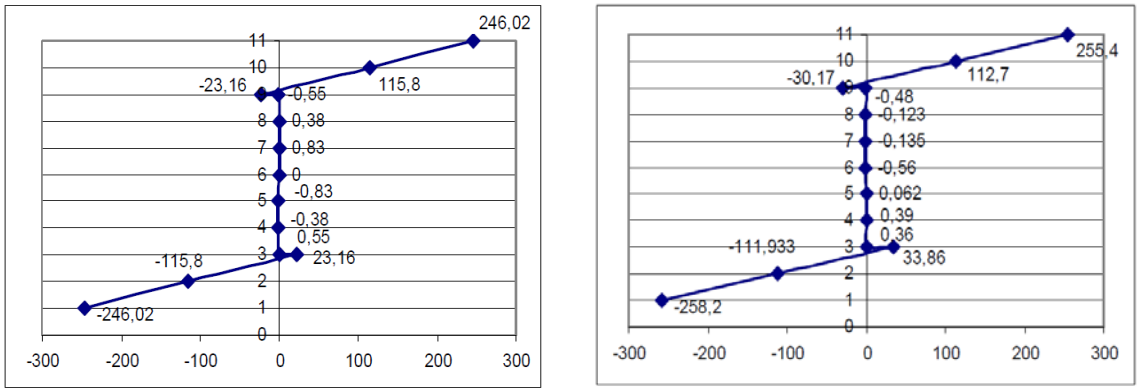
Рис. 3 Расчетная модель трехслойной пластины:
b = 0,2 м; l = 0,2 м; q = 100 Н/см; h_1 = 0,002 м; h_2 = 0,006 м;
$E = 2\times10^5$ МПа; $E' = 2\times10^4$ МПа; $\mu = 0{,}3$; $\mu' = 0{,}25$

1. Результаты расчета

Напряжения, МПа	Точки					
	1	2	2′	3′	3	4
σ_{yy}	–151,049	–85,783	–8,32	8,322	85,783	151,049
σ'_{yy}	1,118	1,163	1,175	–1,163	–1,163	–1,118

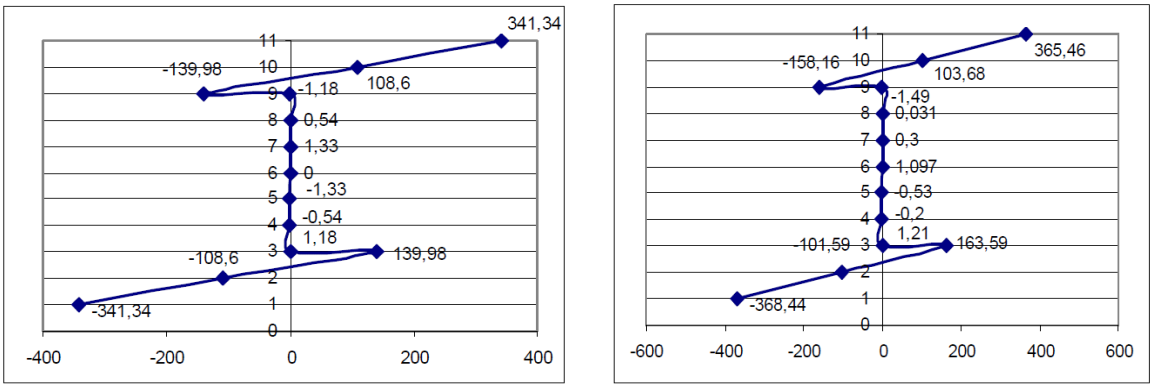
По результатам расчета сложно не заметить скачки в значениях нормальных напряжений в граничных точках. Вычисления проводились с проверкой условий равновесия по силам ($\sum y = 0$), с точностью δ = 0,0039% и по моментам ($\sum M_y = 0$) точность δ = 0,03%.

В ходе дальнейших исследований разработана программа для расчета НДС, в основе которой лежит метод конечно-элементного расчета, по полученным данным нормальных напряжений построены эпюры (рис. 4 – 6).



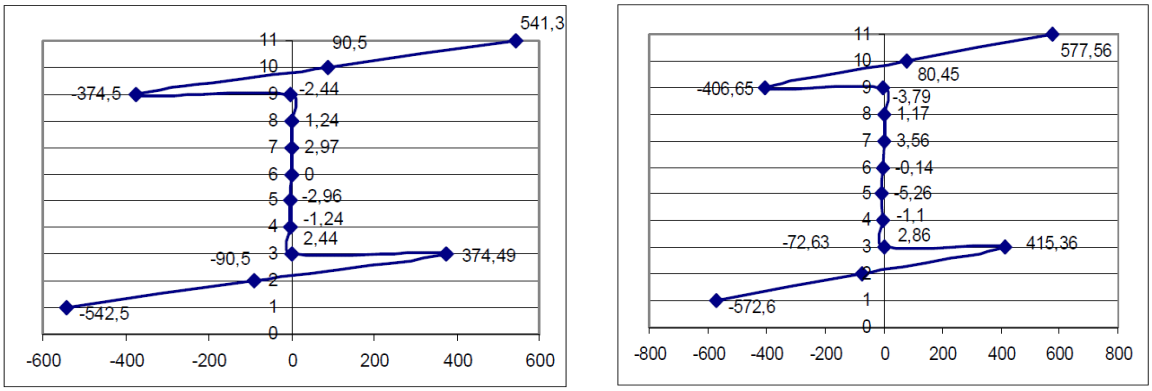
а) *б*)

Рис. 4. Эпюра при *l*/*h* = 20:
а – ручной счет; *б* – в разработанной программе



а) *б*)

Рис. 5. Эпюра при *l*/*h* = 10:
а – ручной счет; *б* – в разработанной программе



а) *б*)

Рис. 6. Эпюра при *l*/*h* = 5:
а – ручной счет; *б* – в разработанной программе

Из построенных выше эпюр видно, что средний слой не работает. Это подтверждает работоспособность трехслойной пластины, средний слой которой выполнен из материала с наименьшим модулем упругости.

Из проведенных исследований отметим следующее.

1. Полученные соотношения между узловыми неизвестными на границе слоев материалов с узловыми неизвестными в виде перемещений и их первых производных свидетельствуют о том, что расчет многослойных пластин возможно выполнить без дополнительных упрощающих гипотез.

2. Полученные соотношения между векторами узловых неизвестных на границе раздела слоев пластины в форме произвольного четырехугольника с узловыми неизвестными в виде перемещений и их первых производных также говорят о возможности расчета пластин и оболочек произвольной толщины без принятия гипотез о способе деформирования волокна вдоль нормали к срединной поверхности оболочки.

Все это характеризует эффективность применения трехслойной пластины, средний слой которой выполнен из материала с наименьшим модулем упругости, в случае деформации чистого или поперечного изгиба. Необходимо отметить, что в условиях сдвига пластина ведет себя иначе.

Список использованных источников

1. **Колотвин, А. В.** Модель упругой оболочки, находящейся в напряженно-деформированном состоянии / А. В. Колотвин, Е. А. Орлова // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : матер. VI Всерос. науч.-практ. конф. ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет». – 2013. – С. 423–424.

2. **Колотвин, А. В.** Моделирование и расчет ферменной металлоконструкции башенного крана в APM WINMACHINE для оптимизации элементов / А. В. Колотвин, Д. М. Исекенова, К. Н. Соловьев // Фундаментальные основы механики. – 2016. – № 1. – С. 124 – 126.

3. **El'chaninov, P. N.** Strength calculations for material with variable elastic properties / P. N. El'chaninov, M. I. Klimov, A. V. Kolotvin // Russian Engineering Research. – 2010. – Т. 30, № 12. – С. 1259 – 1262.

References

1. **Kolotvin, A. V.** Model of an elastic shell in a stress-strain state / A. V. Kolotvin, E. A. Orlova // Computer integration of production and IPI-technology Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Federal State Budgetary Establishment of Higher Professional Education “Orenburg State University”. – 2013. – P. 423–424.

2. **Kolotvin, A. V.** Modeling and calculation of the metal truss tower crane in APM WINMACHINE to optimize the elements / A. V. Kolotvin, D. M. Isekenova, K. N. Solovyov // Fundamental foundations of mechanics. – 2016. – № 1. – P. 124 – 126.

3. **El'chaninov, P. N.** Strength calculations for material with variable elastic properties / P. N. El'chaninov, M. I. Klimov, A. V. Kolotvin // Russian Engineering Research. – 2010. – T. 30, № 12. – P. 1259 – 1262.

УДК 536.21

Никулин С. С., Левин А. Г., Кузнецов А. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)63-04-48, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОЛИМЕРНОМ ИЗДЕЛИИ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Nikulin S. S., Levin A. G., Kuznetsov A. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)63-04-48, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

MODELING OF A TEMPERATURE FIELD IN A POLYMERIC PRODUCT WITH METALIZED COATING

Аннотация. В статье представлено распределение температуры в полимерном изделии от действия круглого нагревателя постоянной мощности, действующего на поверхности полимерного покрытия. Численное исследование позволяет сделать вывод об одномерном распространении тепла по толщине покрытия и реализации режима регуляризации теплопереноса для локальной области изделия.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, поливинилхлорид, температурное поле, тепловой анализ, численный расчет.

Abstract. The article presents the temperature distribution in the polymer product from the action of a circular heater of constant power acting on the surface of the polymer coating. Numerical research allows us to conclude that the one-dimensional heat propagation through the coating thickness and the implementation of the regularization of heat transfer for the local area of the product.

Keywords: non-destructive testing, polyvinyl chloride, temperature field, thermal analysis, numerical calculation.

Существуют различные методы неразрушающего теплового контроля (НК), с помощью которых возможно определять теплофизические свойства (ТФС) полимерных материалов (ПМ) [1]. ТФС определяются в результате математической обработки термограмм, по формулам, полученным в результате решения краевых задач теплопроводности.

В работе представлены результаты численного исследования температурных полей, возникающих в полимерных изделиях. Рассмотрена возможность применения математической модели одномерного распространения тепла в двухслойном полимерном изделии для определения ТФС полимерного материала [2, 3].

На поверхность объекта исследования оказывается тепловое воздействие от источника тепла постоянной мощности, расположенного в основании измерительного зонда (ИЗ). В плоскости контакта измерительного зонда и полимерного изделия расположены термопреобразователи (ТП), регистрирующие температуру на различных расстояниях от центра нагревателя. Геометрические размеры конструктивных элементов зонда и полимерного изделия выбраны такими, что их можно считать полуограниченными.

Метод НК полимерных изделий основан на следующих предположениях.

На термограмме имеются участки, на которых обеспечивается высокая точность совпадения с результатами вычислений по аналитическим моделям. На них тепловые режимы выходят на стадию регуляризации и характеризуются независимостью от времени отношения теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности. Данное свойство доказано А. В. Лыковым [4]. В методах НК рассматривается регуляризация тепловых потоков только в определенной области. В нашем случае можно проводить анализ, используя участки термограмм, соответствующие регуляризации теплового режима в области нагревателя. Наличие стадии регуляризации теплового процесса можно выявить численными методами.

Ранее были получены решения краевой задачи нестационарной теплопроводности в системе двух тел, нагреваемых через бесконечный плоский нагреватель тепловым потоком постоянной мощности, в форме, пригодной для использования на рабочем участке термограммы. Решения были использованы для получения математических выражений для расчета толщины покрытий [3].

Численное моделирование температурных полей методом конечных элементов проводилось с помощью пакета программ ELCUT Student.

Выбранный программный пакет представляет собой интегрированную диалоговую систему, предназначенную для моделирования двумерных тепловых, электромагнитных и других полей методом конечных элементов. Метод конечных элементов является одним из наиболее широко используемых численных методов для решения уравнений математической физики в частных производных. Пакет программ ELCUT имеет удобный и простой в освоении интерфейс. Пользователь может достаточно быстро описать задачу, ее геометрию, свойства сред, граничные и другие условия. Пакет ELCUT обладает большим быстродействием и позволяет решать задачи с высокой точностью [5].

Рассматривается изделие – пластина из вспененного поливинилхлорида (ПВХ), имеющая покрытие в виде металлизированной полимерной пленки. Выбраны следующие условия моделирования. Шаг по времени 1 с. Время нагрева 3000 с. Начальная температура 20 °С. Тепловой поток на нагревателе 2000 Вт/м^2. Размеры объекта исследования: толщина покрытия 0,1 мм, толщина пластины 5 мм. Нагреватель радиусом 8 мм, высотой 1 мм. Размер теплоизоляции: высота 20 мм, радиус 20 мм. Принимаем, что все элементы схемы находятся в идеальном тепловом контакте друг с другом. Боковые поверхности тел имеют тепловую изоляцию. Теплофизические свойства материалов, используемых при моделировании объекта исследования, приведены в табл. 1.

1. Теплофизические свойства объектов

Объект	Материал	Тепло-проводность λ_1, Вт/(м·К)	Теплоемкость с, Дж/(кг·К)	Плотность ρ, кг/м^3
Теплоизоляция	Рипор	0,028	1270	50
Нагреватель	Медь	400	385	8500
Покрытие	Металлизированная пленка	2	1500	1600
Пластина	ПВХ вспененный	0,08	1500	700

В результате расчета получаем поле, на котором можно отобразить изотермы, векторы градиента температуры или теплового потока, а также цветную карту температур, градиента температуры или теплового потока. Также можно построить таблицу и график по времени этих параметров для любой точки поля.

На рисунке 1 представлена термограмма, полученная в точке, расположенной на оси нагревателя в плоскости контакта измерительного зонда и покрытия.

На рисунке 2 представлено температурное поле в моделируемой системе для момента времени 100 с.

Анализ результатов численного исследования показал наличие одномерного распространения тепла в области, расположенной вблизи нагревателя [6].

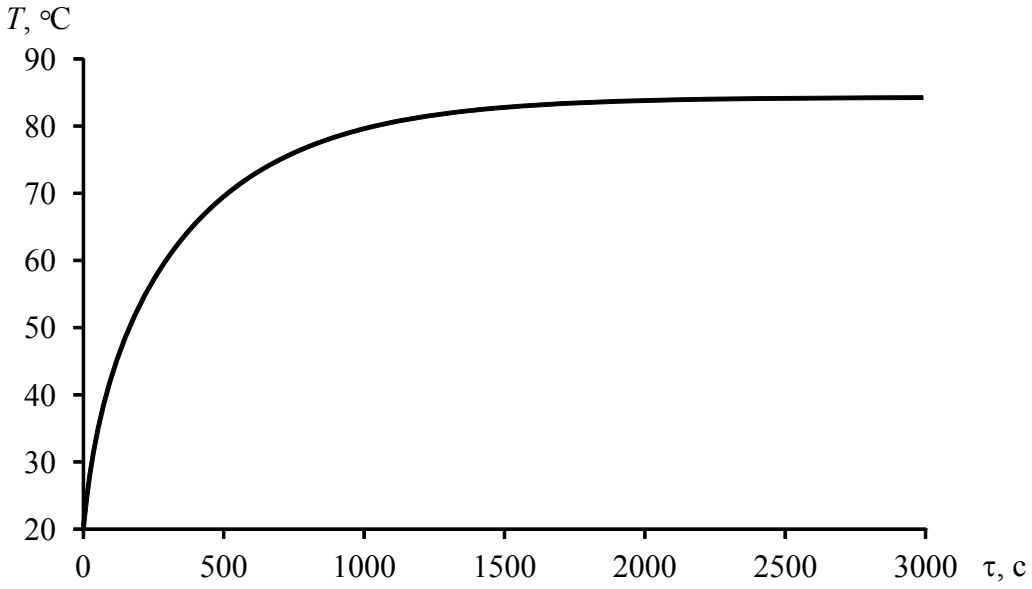


Рис. 1. Термограмма

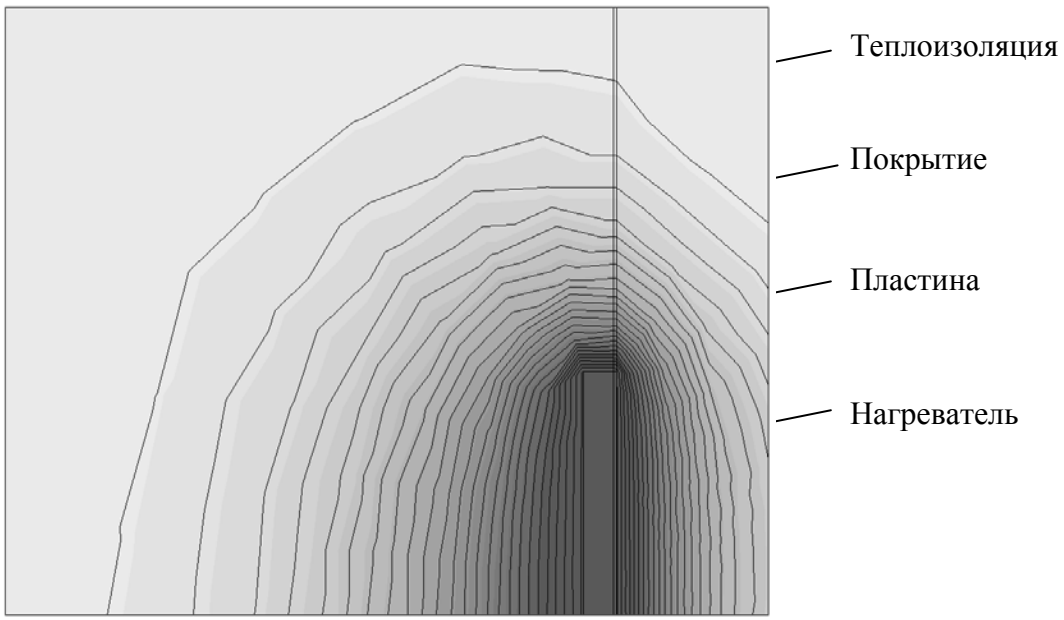


Рис. 2. Температурное поле для момента времени 100 секунд

Таким образом, используя решение краевой задачи нестационарной теплопроводности. можно получить математические выражения для расчета теплофизических свойств или толщины покрытий. Также можно выявлять наличие посторонних включений под слоем покрытия.

Список использованных источников

1. **Жуков, Н. П.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

2. **Моделирование** теплопереноса в методе неразрушающего теплофизического контроля. Ч. I. Стадия нагрева / Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков, А. С. Чех, С. С. Никулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 13, № 1. – С. 39 – 45.

3. **Моделирование** теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. О. Антонов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2013. – Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.

4. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа. – 1967. – 599 с.

5. **ELCUT:** Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 6.3. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2018. – 296 с.

6. **Определение** условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н. Ф. Майникова, Н. П. Жуков, А. А. Балашов, С. С. Никулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3-1. – С. 610 – 616.

References

1. **Zhukov, N. P.** Mnogomodel'nye metody i sredstvanerazrushayushchegokontrolyateplofizicheskikhsvoistvmaterialov i izdelii / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova // [The multimethodsand means of nondestructive kontrolya thermo-physical properties of materialsand products]. – M. : Mashinostroenie-1, 2004. – 288 p.

2. **Modelirovaniye** teploperenosa v metode nerazrushayushchego teplofizicheskogo kontrolya. Ch. I. Stadiya nagreva / N. F. Maynikova, N. P. Zhukov, A. S. Chekh, S. S. Nikulin // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – T. 13, № 1. – S. 39 – 45.

3. **Modelirovanie** teploperenosa v metode nerazrushayuwego kontrolya dvuxslojnyx materialov / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova, I. V. Rogov, A. O. Antonov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2013. – T.19, № 3. – S. 506 – 511.

4. **Lykov, A.V.** Teoriya teploprovodnosti / A.V. Lykov. – M. : Vysshayashkola. – 1967. – 599 s.

5. **Proizvodstvennyi** kooperativ TOR. ELCUT: Modelirovanie dvumernykh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 6.3. Rukovodstvo pol'zovatelya [Simulation of two-dimensional field using finite element method.Version 6.3. User Manual]. – St. Petersburg : Proizvodstvennyi kooperativ TOR, 2018. – 296 p.

УДК 66.045

Ламскова М. И.[1], Филимонов М. И.[1, 2], Новиков А. Е.[1, 2, 3],
Самофалова Л. В.[1], Павлова С. В.[1]
[1]Волгоградский технический университет, Россия, Волгоград,
[2]Всероссийский НИИ орошаемого земледелия, Россия, Волгоград,
[3]Российский университет дружбы народов, Россия, Москва
(Тел. 89275173220, e-mail: lamskov@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ–ТВЕРДОЕ ТЕЛО В БАТАРЕЕ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Lamskova M. I.[1], Filimonov M. I.[1, 2], Novikov A. E.[1, 2, 3],
Samofalova L. V.[1], Pavlova S. V.[1]
[1]Volgograd State Technological University, Russia, Volgograd,
[2]All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Russia, Volgograd,
[3]Peoples' Friendship University of Russia, Russia, Moscow
(Tel. 89275173220, e-mail: lamskov@yandex.ru)

MODELING OF THE SEPARATION FOR SYSTEM THE LIQUID–SOLID IN THE BATTERY OF HYDROCYCLONES

Аннотация. Рассмотрена математическая модель процесса разделения системы жидкость–твердое тело в батарее гидроциклонов со сменными парами вставок, меняющими диаметры входного и сливного патрубков. Для описания зависимости общей степени очистки от фактора разделения и среднего времени пребывания частиц в сепарационной зоне предложен параметр P, равный произведению этих показателей.

Ключевые слова: батарея гидроциклонов, фактор разделения, среднее время пребывания частиц в сепарационной зоне, локальная и общая степени очистки.

Abstract. A mathematical model of the process of separating a liquid-solid system in a battery of hydrocyclones with interchangeable pairs of inserts that change the diameters of the inlet and drain nozzles is considered. To describe the dependence of the total degree of purification on the separation factor and the average residence time of particles in the separation zone, the parameter P is proposed, which is equal to the product of these indicators.

Keywords: battery of hydrocyclones, separation factor, residence time of the particles in the separation zone, local and total degree of purification.

Введение. Гидромеханические процессы разделения неоднородных систем являются неотъемлемой частью технологических процессов химической, нефтехимической и других отраслей промышленности. Для их реализации широкое распространение получили гидроциклоны, что обусловлено рядом преимуществ: простота в изготовлении и эксплуатации, компактность, высокая производительность [1 – 5].

При очистке тонкодисперсных суспензий для достижения требуемой степени очистки зачастую оказывается недостаточным одного аппарата и необходимо производить разделение суспензии в батарее гидроциклонов. В последнее время в целях регулирования степени очистки гидроциклоны снабжаются несколькими парами сменных вставок с переменными размерами входного и сливного патрубков [6].

Таким образом, цель исследования состоит в составлении математической модели процесса разделения системы жидкость–твердое тело в батарее гидроциклонов с постоянным диаметром корпуса и переменными размерами сливного и питающего патрубков, обеспечивающих заданную степень очистки по частицам дисперсной фазы.

Экспериментальная часть. В алгоритм расчета гидроциклонов входят его геометрические параметры (рис. 1): внутренний радиус корпуса, наружный радиус насадки сливного патрубка, эквивалентный диаметр питающего патрубка и высота сепарационной зоны.

В справочной литературе, например [6, 7], приведены основные геометрические параметры для гидроциклонов класса НГАСУ типа ГНС с 3 – 5 парами размеров сменных питающего и сливного патрубков и рекомендуемый диапазон расходов очищаемой воды.

В качестве примера произведем расчет гидроциклона типа ГНС-125 производительностью q_V = 20 м^3/ч с диапазоном диаметров уловленных частиц от 6,67 до 311 мк и допускаемого расхода (от 4,4 до 21,1 м^3/ч). Исходные данные по суспензии приведены в табл. 1.

Рассмотрим математическую модель разделения системы жидкость–твердое тело батареи гидроциклонов.

Производительность одного аппарата определяется по формуле

$$q_{V1} = q_V / n.$$

Расчет номинального диаметра частиц d_0 (частиц, улавливаемых на 100%).

Скорость движения жидкости во входном патрубке

$$\upsilon_{вх} = \frac{q_v / 3600}{\pi R_n^2}.$$

Тангенциальная средняя окружная скорость потока:

$$\upsilon_{ок} = \frac{3{,}15 \cdot \upsilon_{вх} \cdot R_n / R_н}{(L / 2R_н)^{0{,}32}}.$$

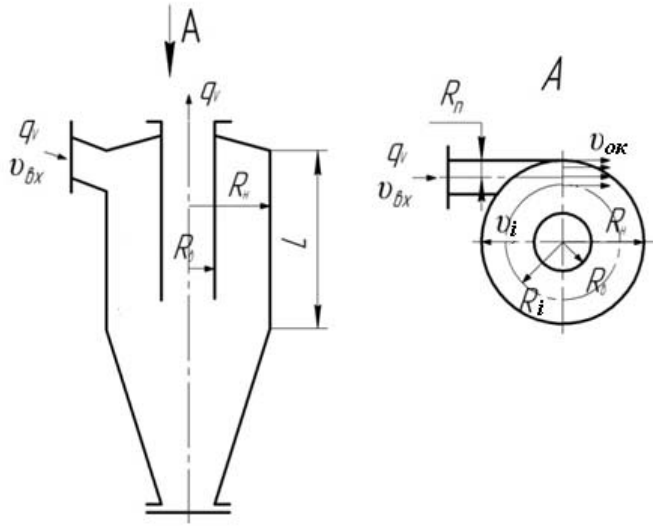


Рис. 1. Схема гидроциклона с геометрическими параметрами и профилями скоростей

Фактор разделения гидроциклона:

$$\Phi = \upsilon_{ок}^2 / g \cdot R_н .$$

Из условия равенства времени пребывания (как отношения объема зоны сепарации к расходу): $\tau = 3600 \cdot \pi \cdot L \cdot (R_н^2 - R_в^2) / q_V$, и времени осаждения частиц номинального диаметра в случае, когда путь осаждения наибольший и равен $(R_н - R_в)$: $\tau_{ос} = (R_н - R_в) / \upsilon_{ос}$, получаем уравнение для скорости центробежного осаждения частиц номинального диаметра

$$\upsilon_{ос} = \frac{q_V}{3600} \Big/ [\pi \cdot L \cdot (R_н + R_в)].$$

Число Лященко для частиц номинального диаметра:

$$La_0 = (\upsilon_{ос}^3 \cdot \rho^2) / [g \cdot \Phi \cdot \mu \cdot (\rho - \rho_к)].$$

Число Архимеда для частиц номинального диаметра определяется из трансцендентного уравнения Тодеса методом половинного деления [8]:

$$La_0 = Ar_0^2 / [18 + 0{,}61 \cdot \sqrt{Ar_0}\,]^3.$$

Номинальный диаметр уловленных частиц:

$$d_0 = \sqrt[3]{(Ar_0 \cdot \mu^2) / [g \cdot \Phi \cdot \rho \cdot (\rho_к - \rho)]}.$$

Число Рейнольдса для частиц номинального диаметра:

$$\mathrm{Re}_0 = (\upsilon_{ос} \cdot \rho \cdot d_0) / \mu .$$

Расчет локальных и общей степеней очистки для частиц диаметром d_i, меньше номинального.

Число Архимеда для частиц диаметром $d_i < d_0$:

$$Ar(i) = Ar_0 \cdot (d_i / d_0)^3.$$

Число Рейнольдса для частиц диаметром d_i:

$$\mathrm{Re}(i) = Ar(i) / [18 + 0{,}61 \cdot \sqrt{Ar(i)}\,] \ .$$

Скорость осаждения частиц диаметром d_i в центробежном поле:

$$\upsilon_i = (\mathrm{Re}(i) \cdot \mu) / (\rho \cdot d_i).$$

Время центробежного осаждения частиц диаметром d_i с траектории $R(i)$, где $R_в < R(i) < R_н$ (см. рис. 1):

$$\tau_i = [R_н - R_{(i)}] / \upsilon_i .$$

Приравнивая правые части формул для расчета времени центробежного осаждения и времени пребывания частиц диаметром d_i, получаем пропорцию

$$\frac{R_н - R_{(i)}}{R_н - R_в} = \frac{\upsilon_i}{\upsilon_{oc}}.$$

При условии равномерного распределения частиц каждой фракции по объему очищаемой жидкости получаем, что левая часть последней пропорции численно равна локальной степени очистки для частиц данной фракции. Тогда локальная степень улавливания частиц диаметром d_i будет определяться следующим образом:

$$d_{(i)} < d_0, \quad \chi_{(i)} = \upsilon(i)/\upsilon_{oc};$$

$$d_{(i)} \geq d_0, \quad \chi_{(i)} = 1.$$

Относительная концентрация уловленных частиц:

$$C_к(i) = \chi(i) \cdot C(i)$$

и общая степень улавливания частиц:

$$\chi = \sum_{i=1}^{m} C_к(i).$$

Результаты расчетов и их обсуждение. В таблице 1 представлены результаты расчета одного гидроциклона и батареи из двух, трех и четырех гидроциклонов. Для одного гидроциклона рассматриваемого типа (ГНС-125) общая степень очистки (χ_1 = 0,66) ниже заданного значения (χ = 0,8) на 14%; в батарее из двух гидроциклонов (χ_2 = 0,56) ниже, чем в одном аппарате на 10% и ниже необходимой на 24%; в батарее из трех гидроциклонов общая степень очистки (χ_3 = 0,59) меньше необходимой на 21%, а вот в батарее из четырех аппаратов, степень очистки (χ_4 = 0,802) становится больше требуемой. При этом фактор разделения для батареи гидроциклонов уменьшается нелинейно – по сравнению с одним гидроциклоном ($Ф_1$ = 16) соответственно в 2,56 раза для двух ($Ф_2$ = 6,27); в 3,51 раза для трех аппаратов ($Ф_3$ = 4,56) и в 2,56 раза для четырех ($Ф_4$ = 6,27). Среднее время пребывания частиц наоборот монотонно возрастает с ростом числа гидроциклонов в батарее: для n = 2 увеличивается в 2,14 раза, для n = 3 – в 3,34 раза, для n = 4 – в 4,57 раза по сравнению с одним аппаратом.

Оценка общей степени очистки одиночных гидроциклонов сводится к сравнению соответствующих факторов разделения, чем выше этот показатель, тем выше общая степень очистки в соответствующем аппарате. При оценке общей степени очистки батареи гидроциклонов с одинаковым диаметром корпусов необходимо учитывать не только фактор разделения, но и среднее время пребывания жидкости в сепарационной зоне. В связи с чем, предложен параметр Р, равный произведению этих показателей, т.е.

$$Р = Ф \cdot \tau_0.$$

В такой интерпретации зависимость общей степени очистки суспензии от числа гидроциклонов в батарее согласуется с изменением параметра Р.

На рисунке 2 представлены графики плотности распределения частиц в исходной суспензии, доли уловленных частиц в одном гидроциклоне и в батарее из четырех аппаратов.

1. Исходные данные и расчетные показатели работы батареи ГНС-125[9, 10]

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
Производительность по суспензии	$м^3/ч$	q_v	20			
Плотность суспензии	$кг/м^3$	ρ	1000			
Плотность частиц дисперсной фазы	$кг/м^3$	$\rho_ч$	2000			
Вязкость суспензии	Па·с	μ	0,001			
Число фракций	–	n	12			
Требуемая степень очистки	–	η	0,8			
Число гидроциклонов	–	m	1	2	3	4
Радиус корпуса	м	$R_н$	0,0625			
Радиус выходного патрубка	м	$R_в$	0,025	0,02	0,016	0,0125
Эквивалентный радиус входного патрубка	м	$R_{вх}$	0,02	0,016	0,0125	0,008
Высота сепарационной зоны	м	L	0,375	0,375	0,375	0,375
Производительность каждого гидроциклона в батарее	$м^3/ч$	$q_{v(i)}$	20,0	10,0	6,67	5,0
Скорость во входном патрубке	м/с	$\upsilon_{вх}$	4,42	3,46	3,77	6,91
Вращательная скорость	м/с	υ_φ	3,14	1,96	1,67	1,96
Интегральная степень очистки	–	$\chi_{(i)}$	0,66	0,56	0,59	0,802
Фактор разделения	–	Φ	16,0	6,27	4,56	6,27
Номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100%	мк	d_0	96,2	105,4	101,1	78,8
Время пребывания частиц	с	τ_0	0,695	1,49	2,32	3,18
$\Phi\tau_0$	с	P	11,2	9,32	10,6	19,9

Отношение площадей, ограниченной осью абсцисс и кривыми *2* и *3*, к площади, ограниченной осью абсцисс и кривой *1*, характеризует общую степень очистки. Разница площадей под кривыми *2* и *3* соответствует разнице в 14% между общей степенью очистки от частиц твердой фазы в одном гидроциклоне и в батарее из четырех аппаратов.

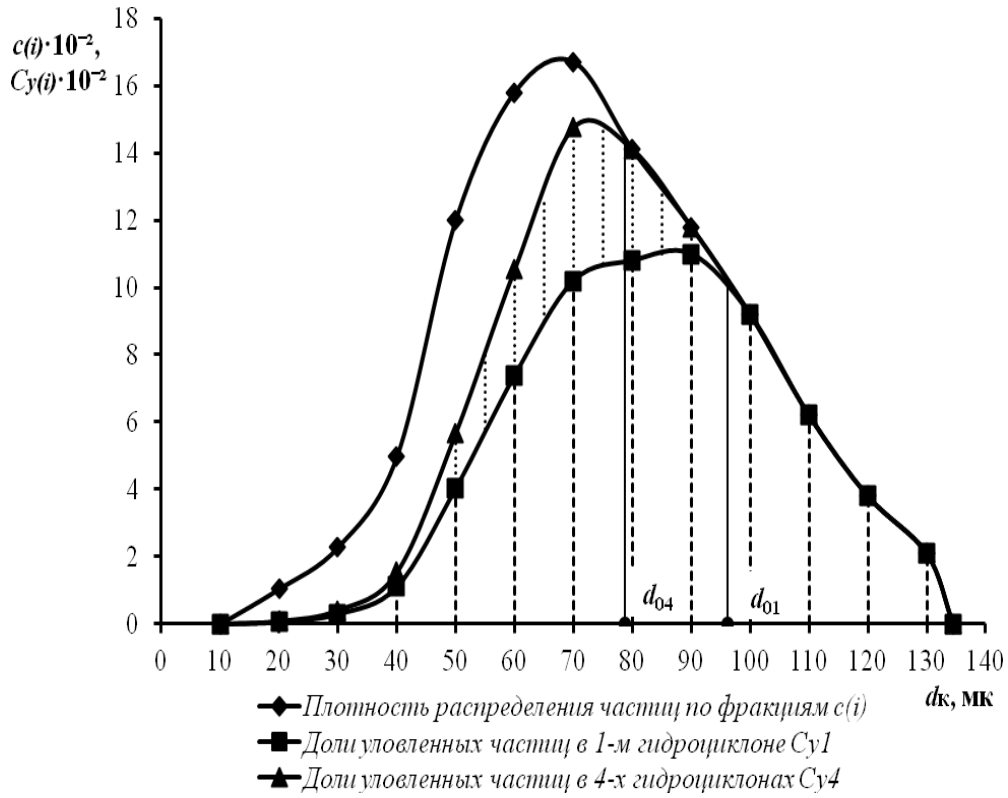


Рис. 2. Плотность распределения частиц в суспензии по фракциям и графики долей уловленных частиц в 1-м гидроциклоне и в батарее из 4-х гидроциклонов (d_{01} и d_{04} – номинальные диаметры частиц в 1-м гидроциклоне и в батарее из 4-х гидроциклонов соответственно)

Как видно из представленных результатов расчетов, на производительность и эффективность разделения гетерогенных систем в гидроциклоне оказывает влияние размеры сливного и входного питающего патрубка, так как от последнего зависит величина скорости потока в питающем патрубке, которая определяет вращательное движение жидкости с частицами в аппарате.

Заключение. Таким образом, для каждого типа гидроциклона в заданном диапазоне возможной производительности необходимо с увеличением числа аппаратов в батарее выбирать из справочника соответственно уменьшающиеся величины диаметров питающего и сливного патрубка. В этом случае уменьшение фактора разделения компенсируется увеличением времени пребывания жидкости в сепарационной зоне и, при некотором числе гидроциклонов, общая степень очистки в батарее становится выше, чем в одном аппарате.

Список использованных источников

1. **Hydrocyclones**: Analysis and Applications // Edited by L. Svarovsky and M. T. Thew. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1992. – 440 p.

2. **Bradley D.** The Hydrocyclone / D. Bradley. – L. : Pergamon press, 1965. – 331 p.

3. **Neesse, Th.** Advances in the Theory and Practice of Hydrocyclone Technique / Th. Neesse, F. Donhauser // Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress Rom / Italien Juli 2000; Bd. A. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2000. – P. 69 – 76.

4. **Терновский, И. Г.** Гидроциклонирование / И. Г. Терновский, А. М. Кутепов. – М. : Наука, 1994. – 350 с.

5. **Лагуткин, М. Г.** Применение гидроциклонов с приемным бункером для очистки оборотной воды от механических примесей / М. Г. Лагуткин, С. Ю. Булычев, В. М. Пигарев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 3 – 5.

6. **Тимонин, А. С.** Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во «Ноосфера», 2015. – Т. 2. – 1126 с.

7. **Шестов, Р. Н.** Гидроциклоны / Р. Н. Шестов. – Л. : Машиностроение, 1967. – 80 с.

8. **Голованчиков, А. Б.** Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Ч. 2. Моделирование гидромеханических процессов : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков. – Волгоград : Царицын, 1995. – 121 с.

9. **Моделирование** гидродинамических процессов в центробежном поле гидроциклонов : монография / А. Б. Голованчиков, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова и др. ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 200 с.

10. **Расчет** батареи гидроциклонов, обеспечивающих заданную степень очистки по частицам дисперсной фазы / А. Б. Голованчиков, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, М. И. Филимонов // Химическая технология. – 2018. – № 5. – С. 235 – 240.

References

1. **Hydrocyclones**: Analysis and Applications // Edited by L. Svarovsky and M. T. Thew. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1992. – 440 p.

2. **Bradley D.** The Hydrocyclone / D. Bradley. – L. : Pergamon press, 1965. – 331 p.

3. **Neesse, Th.** Advances in the Theory and Practice of Hydrocyclone Technique / Th. Neesse, F. Donhauser // Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress Rom / Italien Juli 2000; Bd. A. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2000. – P. 69 – 76.

4. **Ternovskij, I. G.** Gidrociklonirovanie / I. G. Ternovskij, A. M. Kutepov. – M. : Nauka, 1994. – 350 s.

5. **Lagutkin, M. G.** Primenenie gidrociklonov s priyomnym bunkerom dlya ochistki oborotnoj vody ot mexanicheskix primesej / M. G. Lagutkin, S. Yu. Bulychyov, V. M. Pigaryov // Ximicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2004. – № 11. – S. 3 – 5.

6. **Timonin, A. S.** Inzhenerno-ekologicheskij spravochnik / A. S. Timonin. – Kaluga : Izdatelstvo “Noosfera”, 2015. – T. 2. – 1126 s.

7. **Shestov, P. H.** Gidrociklony / P. H. Shestov. – L. : Mashinostroenie, 1967. – 80 s.

8. **Golovanchikov, A. B.** Primenenie EVM v ximicheskoj texnologii i ekologii. Ch. 2. Modelirovanie gidromexanicheskix processov : ucheb. posobie / A. B. Golovanchikov. – Volgograd : Czaricyn, 1995. – 121 s.

9. **Modelirovanie** gidrodinamicheskix processov v centrobezhnom pole gidrociklonov: monografiya / A. B. Golovanchikov, A. E. Novikov, M. I. Lamskova i dr. ; VolgGTU. – Volgograd, 2017. – 200 s.

10. **Raschet** batarei gidrociklonov, obespechivayushhix zadannuyu stepen ochistki po chasticzam dispersnoj fazy / A. B. Golovanchikov, A. E. Novikov, M. I. Lamskova, M. I. Filimonov // Ximicheskaya texnologiya. – 2018. – № 5. – S. 235 – 240.

УДК 004.925

Тимохин П. Ю., Финагин Л. А.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

СВЕРХБОЛЬШИЕ ТЕКСТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОГНЕЙ НОЧНЫХ ГОРОДОВ ЗЕМЛИ В КОСМИЧЕСКИХ ВИДЕОТРЕНАЖЕРАХ

Timokhin P. Yu., Finagin L. A.
Scientific Research Institute for System Analysis
of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
(Tel. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

EXTRA LARGE TEXTURES FOR MODELING OF NIGHT CITY LIGHTS OF THE EARTH IN SPACE VIDEO SIMULATORS

Аннотация. В статье рассматривается задача моделирования в космических видеотренажерах визуальных свойств земной поверхности в темное время суток (огней ночных городов) с помощью сверхбольших текстур. Предложен эффективный распределенный метод создания набора тайлов сверхбольших текстур, направленный на обеспечение визуализации сложных космических виртуальных сцен в масштабе реального времени. На основе разработанного метода был создан программный комплекс и проведена его успешная апробация. Предложенное решение может быть использовано в космических видеотренажерах, а также системах виртуального окружения.

Ключевые слова: визуализация, распределенные вычисления, видеотренажер, виртуальная модель, Земля, реальное время.

Abstract. The paper deals with the problem of modeling in space simulators night-time visual properties of the Earth surface (night city lights) using extra large textures. An effective, distributed method to create a tileset of extra large texture, aimed to provide the visualization of complex space virtual scenes in real-time mode, is proposed. The method developed was implemented in a program complex and successfully tested. The proposed solution can be used in space simulators, as well as in virtual environment systems.

Keywords: visualization, distributed computing, video simulator, virtual model, Earth, real-time.

Введение. Одной из важных задач современных космических видеотренажерных комплексов является моделирование в масштабе реального времени визуальных свойств земной поверхности в темное время суток, в частности, огней ночных городов. На основе данного явления космонавты осуществляют мониторинг светового загрязнения Земли с борта Международной космической станции (МКС), а также реализуют дополнительный визуальный контроль изменения ориентации при навигации и маневрах в космическом пространстве [1].

Эффективным путем решения этой задачи является визуализация виртуального прототипа Земли – динамически освещаемой трехмерной полигональной модели земной поверхности с высоко детализированной текстурой огней ночных городов (с разрешением от 150 м/пиксел и выше [2]), созданной на основе детальных спутниковых снимков. На рисунке 1 показан внешний вид такой текстуры.

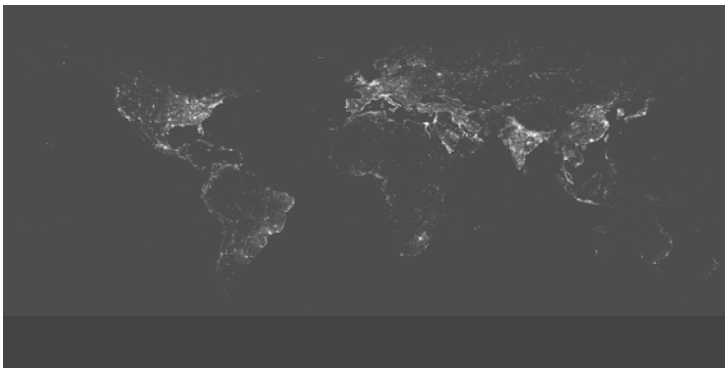


Рис. 1. Текстурная карта огней ночных городов Земли

Проблема состоит в том, что современные видеокарты не могут обрабатывать целиком текстуры таких больших размеров и объемов (*сверхбольшие текстуры*), поэтому требуются распределенные методы и алгоритмы, реализующие создание, эффективную подкачку (в видеопамять) и визуализацию в масштабе реального времени *тайлов* сверхбольшой текстуры – небольших ее участков одинакового размера.

При разработке таких методов и алгоритмов моделирования огней ночных городов необходимо учитывать, что исходная текстура (см. рис. 1) не содержит ни изображения подстилающей земной поверхности, ни информации о цвете огней ночных городов: текстура задана в градациях серого цвета, где белый цвет соответствует наибольшей яркости самосвечения ночных городов, а черный цвет – ее отсутствию. Распространенный подход состоит в создании отдельной ночной текстуры Земли – затемненной копии дневной текстуры Земли с нанесенной на нее колоризованной картой огней ночных городов [3, 4]. В случае сверхбольших текстур это приводит к необходимости подкачки и визуализации удвоенного количества тайлов, что препятствует синтезу в масштабе реального времени (со скоростью не менее 25 кадров в секунду) изображений сложных космических виртуальных сцен, содержащих полигональные модели МКС и Земли (около 2 млн. полигонов).

Анализ построенной гистограммы карты огней ночных городов (рис. 2) показал, что площадь огней на карте (количество ненулевых текселов) составляет всего 3%, в то время как площадь суши на дневной текстуре Земли составляет около 30%. Ввиду этого целесообразно иметь отдельный набор тайлов текстуры ночных огней городов (причем только тех, которые не содержат полностью черные участки) и в процессе визуализации добавлять из него в дневную текстуру Земли информацию о ночных огнях городов. В данной работе предлагается метод создания такого набора тайлов.

Рис. 2. Гистограмма текстуры огней ночных городов

Метод создания набора тайлов сверхбольшой текстуры огней ночных городов. В данной работе исходной является текстурная карта огней ночных городов размера 86 400×43 200 текселов (около 500 м/пиксел), наиболее детальная из имеющихся в настоящее время в открытом доступе [3]. Процесс создания набора тайлов такой текстуры включает в себя следующие шаги.

1. Увеличение размеров (разрешения) исходной карты огней ночных городов до размеров дневной текстуры Земли с помощью распределенной фрактальной интерполяции [5]. Для этого исходное изображение разбивается на крупные пересекающиеся квадратные блоки (область пересечения выбирается такой, чтобы она покрывала окрестность, используемую алгоритмом фрактальной интерполяции), а затем выполняется увеличение полученных блоков, удаление областей пересечения и склейка оставшихся участков в новую текстуру. При этом обработка блоков равномерно распределяется между однотипными вычислительными узлами, объединенными в локальную сеть. По сравнению с распространенными методами (билинейная и бикубическая интерполяция) увеличение изображения с помощью фрактальной интерполяции не подвержено артефактам «блочности» и позволяет сохранить четкие границы городов и прилегающих к ним освещенных областей. Отметим, что после разбиения исходного изображения блоки, не содержащие информацию об огнях ночных городов, отбрасываются, а соответствующие им области в результирующей увеличенной текстуре заливаются черным цветом.

2. Разбиение увеличенной текстурной карты огней ночных городов на тайлы размера, оптимального для визуализации в масштабе реального времени «бега» подстилающей поверхности Земли, наблюдаемой из космоса (в данной работе размеры тайла составляют 512×512 текселов). При этом создается массив смещений тайлов, размера, равного количеству тайлов, в который для каждого тайла записывается количество стоящих перед ним непустых (полностью черных) тайлов (для пустых тайлов записывается – 1).

3. Сжатие тайлов с помощью метода S3TC (S3 Texture Compression) в формате DXT1. Данный формат обеспечивает сжатие с фиксированным размером выходных данных (6:1 для 24-битных изображений и 8:1 – для 32-битных) и поддерживает аппаратное декодирование на видеокартах, что позволяет существенно повысить эффективность подкачки тайлов. В процессе сжатия изображение тайла разбивается на непересекающиеся блоки размером 4×4 тексела, и в каждом блоке текселы квантуются на ограниченное число значений. В блоки добавляется однобитный альфа-канал, в который записывается 0, если блок состоит полностью из текселов черного цвета и 1 – в остальных случаях. Это позволяет ускорить декодирование областей тайла, не содержащих информацию об огнях ночных городов.

4. Объединение сжатых тайлов в тайловые группы. Чтобы уменьшить количество медленных операций открытия/закрытия файлов тайлов, снижающих эффективность подкачки, сжатые изображения непустых тайлов объединяются в группы большего размера – *тайловые группы*. При этом устанавливается максимальный размер тайловой группы (в данной работе 3 Гб), по достижении которого заполнение текущей группы завершается и начинается заполнение следующей группы, и т.д., пока не закончатся тайлы (последняя тайловая группа может быть заполнена частично). Отметим, что добавление каждого сжатого изображения тайла осуществляется без служебной информации (заголовка dds-файла). Она записывается один раз и хранится вместе с массивом смещений тайлов в отдельном файле, который используется в процессе визуализации для извлечения тайлов из тайловых групп.

Рис. 3. Визуализация модели Земли с огнями ночных городов

После выполнения описанной последовательности шагов из исходной текстуры создается ряд текстур уменьшенных размеров, где каждая следующая текстура имеет размеры, вдвое меньшие предыдущей (мип-текстуры). Использование мип-текстур позволяет повысить качество и скорость визуализации огней ночных городов за счет предотвращения потери мелких деталей на удаленных от наблюдателя участках модели земной поверхности и уменьшения количества тайлов, необходимых для визуализации этих участков. Для каждой мип-текстуры выполняются шаги 2 – 4, в результате которых также создаются тайловые группы. Эти группы вместе с тайловыми группами исходной текстуры образуют набор тайлов текстурной карты огней ночных городов.

Заключение. В работе предложен эффективный, распределенный метод создания набора тайлов сверхбольших текстур огней ночных городов, используемых для моделирования визуальных свойств земной поверхности в темное время суток в космических видеотренажерных комплексах. Предложенный метод включает в себя повышение разрешения исходной текстуры огней ночных городов с помощью распределенной фрактальной интерполяции, разбиение увеличенной текстуры на непустые тайлы, сжатие тайлов и объединение сжатых тайлов в тайловые группы. Разработанный метод был реализован в программном комплексе, с помощью которого был создан набор тайлов текстуры огней ночных городов размера 86 400×43 200 текселов. С помощью подготовленного набора тайлов была смоделирована ночная сторона земной поверхности и выполнена ее визуализация в режиме реального времени в составе сложной космической виртуальной сцены, содержащей детализированную трехмерную полигональную модель МКС (см. рис. 3). Проведенная апробация подтвердила, что разработанное решение отвечает требованиям, предъявляемым к системам визуализации космических виртуальных сцен и может быть применено в космических видеотренажерах, а также системах виртуального окружения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № *17-07-00243*).

Список использованных источников

1. **Коваленок, В. В.** Результативность визуально-инструментальных наблюдений в долговременных пилотируемых полетах / В. В. Коваленок, А. С. Иванченков, С. В. Авакян // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 4(21). – С. 103 – 117.

2. **Митин, А. И.** Пути повышения адекватности моделирования визуальных условий мониторинга земной поверхности на тренажере служебного модуля российского сегмента Международной космической станции / А. И. Митин, В. И. Брагин // Пилотируемые полеты в космос. – 2014. – № 3. – С. 60 – 70.

3. **NASA** Earth Observatory: Earth at Night. URL: https://earthob-servatory.nasa.gov/Features/NightLights/ (review date: 29.09.2018).

4. **Rost, R. J.** OpenGL Shading Language (3rd Edition) / R. J. Rost, B. Licea-Kane. – Boston, USA : Addison Wesley Professional, 2009. – P. 792.

5. **Тимохин, П. Ю.** Метод распределенного синтеза увеличенных сверхбольших текстур Земли на основе наборов перекрытых тайлов / П. Ю. Тимохин, А. В. Мальцев // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – Вып. 4, т. I. – С. 424 – 428.

References

1. **Kovalenok, V. V.** Effectiveness of Visual-Instrumental Observations in Long-Term Manned Space Flights / V. V. Kovalenok, A. S. Ivanchenkov, S. V. Avakyan // Pilotiruemye polety v kosmos [Manned Spaceflight]. – 2016. – № 4(21). – S. 103 – 117.

2. **Mitin, A. I.** Ways of Improving the Adequacy of Modeling Visual Conditions of the Earth Surface Monitoring on the Service Module Simulator of the ISS RS / A. I. Mitin, V. I. Bragin // Pilotiruemye polety v kosmos [Manned Spaceflight]. – 2014. – № 3. – S. 60 – 70.

3. **NASA** Earth Observatory: Earth at Night. URL: https://earthob-servatory.nasa.gov/Features/NightLights/ (review date: 29.09.2018).

4. **Rost, R. J.** OpenGL Shading Language (3rd Edition) / R. J. Rost, B. Licea-Kane. – Boston, USA : Addison Wesley Professional, 2009. – P. 792.

5. **Timokhin. P. Y.** A method of distributed synthesis of upsampled extra-large Earth textures based on sets of overlapped tiles / P. Y. Timokhin, A. V. Maltsev // Virtual'noe model., prototip. i prom. dizajn. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Tambov. – 2017. – № 4, V. I. – S. 424 – 428.

УДК 004.925

Тимохин П. Ю., Омельченко Д. В.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ В МАСШТАБЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ НА ЭКРАНАХ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Timokhin P. Yu., Omelchenko D. V.
Scientific Research Institute for System Analysis
of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
(Tel. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

A REAL-TIME METHOD FOR ULTRA-HD VISUALIZATION OF THE RESULTS OF UNSTABLE OIL DISPLACEMENT SIMULATIONS

Аннотация. В работе рассматривается задача синтеза в масштабе реального времени изображений сверхвысокого разрешения результатов моделирования неустойчивого вытеснения нефти из пористых сред. Предложен новый, распределенный метод визуализации полигональной модели изоповерхности насыщенности вытесняющей жидкости на экранах сверхвысокой четкости, основанный на распараллеливании потоков «шагающих кубиков» на GPU с использованием программируемой тесселяции графических примитивов. На основе предложенного метода был создан программный комплекс и проведена его успешная апробация. Предложенное решение может быть использовано в исследованиях специалистов из нефтегазовой отрасли, при создании виртуальных лабораторий, систем виртуального окружения, образовательных приложений и др.

Ключевые слова: вытеснение нефти, визуализация, изоповерхность, реальное время, GPU, программируемая тесселяция, шейдеры.

Abstract. The paper deals with the problem of real-time synthesis of ultra-hd images of resulting data obtained in simulation of unstable oil displacement from porous media. A new, distributed method to visualize a polygonal model of the isosurface of the saturation of displacing liquid on ultra-hd screens was proposed. The method is based on parallelizing of the “marching cubes” threads on the GPU using programmable tessellation of graphic primitives. The method proposed was implemented in a program complex and successfully tested. The proposed solution can be used in researches of specialists from the oil and gas industry as well as in virtual laboratories, virtual environment systems, educational applications, etc.

Keywords: oil displacement, visualization, isosurface, real-time, GPU, programmable tessellation, shaders.

Введение. В условиях возрастающей сложности добычи углеводородов высокий приоритет приобретают цифровые технологии, направленные на повышение нефтеотдачи нефтеносных пластов [1]. В частности, в мировой индустрии широко востребованы технологии, основанные на компьютерном моделировании и визуализации процессов неустойчивого вытеснения нефти из пористых сред водой и полимерными раство-

рами [2]. Важной задачей при создании таких технологий является разработка методов визуализации в масштабе реального времени результатов моделирования вытеснения нефти на экранах сверхвысокой четкости (4K, UHD). Одной из ключевых является визуализация *изоповерхности* насыщенности вытесняющей жидкости – поверхности постоянного значения поля насыщенности вытесняющей жидкости, получаемого в результате каждого шага моделирования вытеснения нефти. Основными подходами к решению этой задачи являются испускание лучей через пикселы экрана до пересечения с изоповерхностью («бросание лучей», ray casting [3]) и построение полигональной модели изоповерхности в ячейках трехмерной сетки (*рендер-сетки*) из типовых наборов треугольников («шагающие кубики», marching cubes [4]). Первый подход позволяет получать изображения изоповерхности высокого качества, однако скорость синтеза таких изображений сильно зависит от разрешения экрана и существенно снижается на экранах сверхвысокой четкости, что препятствует визуализации изоповерхности в режиме реального времени (со скоростью не менее 25 кадров в секунду). При втором подходе качество синтезируемых изображений изоповерхности определяется детализацией рендер-сетки: чем она выше, тем менее ломаные контуры имеет визуализируемая модель изоповерхности. На экранах сверхвысокой четкости это особенно заметно, поэтому для получения качественных изображений в масштабе реального времени необходимы эффективные методы, реализующие построение полигональной модели изоповерхности в ячейках детализированной рендер-сетки с использованием распределенных вычислений и распараллеливания графических расчетов на современных многоядерных графических процессорах (GPU).

В данной работе предлагается новый распределенный метод решения этой задачи, в котором расчет «шагающих кубиков» в ячейках рендер-сетки выполняется параллельно, независимо друг от друга на ядрах GPU с использованием современной технологии программируемой тесселяции графических примитивов [5]. Графические расчеты в предлагаемом решении реализованы на языке GLSL с использованием графической библиотеки Open GL версии 4.0.

Полигональная модель участка изоповерхности в ячейке рендер-сетки. Рассмотрим задачу визуализации полигональной модели поверхности некоторого постоянного значения S^* поля насыщенности вытесняющей жидкости. Это поле задается рендер-сеткой R размера $m \times n \times q$ ячеек, каждой вершине которой соответствует некоторое значение S насыщенности вытесняющей жидкости. Мы будем выполнять построение полигональной модели изоповерхности только в тех ячейках (кубах) рендер-сетки R, для всех 8 вершин которых не выполняется $S < S^*$ или $S \geq S^*$, т.е. в ячейках, которые не лежат полностью по одну из сторон от изоповерхности.

Рассмотрим некоторую $R_{i,j,k}$ ячейку. Пронумеруем вершины этой ячейки целыми числами от 0 до 7, а ребра – от 0 до 11. Вершину ячейки, для которой $S < S^*$, промаркируем битовым значением, равным 1, в противном случае – 0. Обозначим через K конфигурацию из 8 записанных подряд полученных битов. Каждому значению K (от 0 до 255) однозначно соответствует набор треугольников (полигонов), который будет являться участком полигональной модели изоповерхности. Каждый такой набор включает в себя от 0 до 5 треугольников (вершины треугольника лежат на ребрах ячейки, на одном ребре – не более одной вершины) и задается последовательностью

из 16 индексов: по три индекса ребра ячейки на треугольник и индекс (–1) конца последовательности. Все 256 таких последовательностей образуют таблицу *T* наборов треугольников (ее можно найти в [4]). Координаты P вершины треугольника, заданной в таблице *T* некоторым индексом *e* ребра ячейки, находятся как

$$P = V_a + \frac{S^* - S(V_a)}{S(V_b) - S(V_a)}(V_b - V_a), \tag{1}$$

где V_a и V_b – координаты вершин *e*-го ребра ячейки, а $S(V_a)$ и $S(V_b)$ – значения насыщенности вытесняющей жидкости, соответствующие вершинам V_a и V_b.

Обозначим через $W_{i,j,k}$ графический поток, выполняющий построение участка полигональной модели изоповерхности в $R_{i,j,k}$-й ячейке рендер-сетки (поток «шагающих кубиков»). Тогда построить полигональную модель изоповерхности можно, создав и выполнив все такие потоки «шагающих кубиков».

Создание и выполнение потоков «шагающих кубиков». В данной работе предлагается создавать потоки «шагающих кубиков» путем программируемой тесселяции (разбиения) патчей-квадов – прямоугольных параметрических графических примитивов (далее – патчей). Запрограммировав определенным образом графический конвейер GPU, один патч можно разбить на регулярную сетку размером до $d \times d$ вершин, где $d = l_{\max} + 1$, а $l_{\max}$ – максимальный *уровень тесселяции* – наибольшее количество отрезков, на которое GPU может разбить сторону патча (не менее 64 в Open GL 4.0). Особенность такой тесселяции состоит в том, что каждая полученная вершина обрабатывается в отдельном графическом потоке, который также можно запрограммировать.

Чтобы получить $m \times n \times q$ потоков «шагающих кубиков», мы создаем трехмерный массив патчей размера $m_P = \lceil m/d \rceil$ строк, $n_P = \lceil n/d \rceil$ столбцов и $q_P = q$ слоев (см. рис. 1).

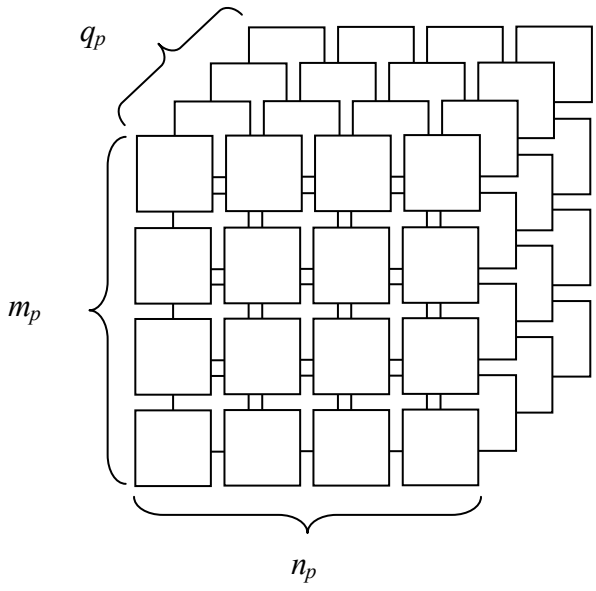


Рис. 1. Трехмерный массив патчей

Данный массив патчей в каждом кадре визуализации отправляется на графический конвейер GPU, на котором патчи распределяются между ядрами GPU и обрабатываются с помощью разработанного комплекса шейдерных программ. Данный комплекс включает в себя шейдер управления тесселяцией, шейдер вычисления тесселяции, геометрический и фрагментный шейдеры.

В шейдере **управления тесселяцией (УТ)** выполняется расчет параметров, определяющих размеры двухмерной сетки вершин (группы потоков «шагающих кубиков»), а также тройка индексов (i_P, j_P, k_P) строки, столбца и слоя патча, необходимая для последующей привязки созданных потоков к ячейкам рендер-сетки. Размеры группы потоков определяются уровнями l_W и l_H тесселяции сторон патча по ширине и высоте, и вычисляются как наибольшие количества отрезков, на которые возможно разбить стороны патча (по ширине и высоте), чтобы суммарные размеры полученных в результате групп потоков не выходили за размеры рендер-сетки. Тройка (i_P, j_P, k_P) индексов вычисляется, исходя из размеров m_P, n_P, q_P трехмерного массива патчей и порядкового номера $gl_PrimitiveID \in [0, m_P n_P q_P - 1]$, который автоматически присваивается каждому патчу при поступлении на графический конвейер.

Шейдер **вычисления тесселяции (ВТ)** обрабатывает каждую вершину, полученную в результате тесселяции патча, и осуществляет привязку созданного вместе с вершиной потока к соответствующей ему ячейке рендер-сетки. Привязка реализуется путем маркировки вершины тройкой (i, j, k) индексов строки, столбца и слоя ячейки:

$$i = i_P \cdot (l_{\max} + 1) + i_V,\ j = j_P \cdot (l_{\max} + 1) + j_V,\ k = k_P, \tag{2}$$

где i_P, j_P, k_P – переданные из УТ-шейдера индексы строки, столбца и слоя патча, а i_V и j_V – индексы строки и столбца вершины в сетке вершин, полученной из патча:

$$i_V = \lfloor l_H \cdot v + bias \rfloor,$$
$$j_V = \lfloor l_W \cdot u + bias \rfloor,$$

где $u, v \in [0,1]$ – нормализованные вещественные координаты вершины, определяющие ее положение в исходном патче (рассчитываются автоматически при тесселяции патча), а *bias* – константа, компенсирующая погрешность машинного представления вещественных чисел.

Геометрический шейдер выполняет обработку каждой маркированной вершины, в результате которой вершина либо заменяется построенным участком полигональной модели изоповерхности, либо отбрасывается, и построения геометрии не происходит. В начале обработки геометрический шейдер выполняет расчет номера *K* типового набора треугольников:

$$K = \sum_{p=0}^{7} \left(2^p \cdot \left(S(V_p) < S^* \right) \right), \tag{3}$$

где *p* – это порядковый номер вершины ячейки рендер-сетки, заданной маркирующей тройкой (i, j, k), а $S(V_0), ..., S(V_7)$ – значения насыщенности вытесняющей жидкости,

соответствующие вершинам этой ячейки. Если $K = 0$ или $K = 255$ (случаи, когда ячейка располагается полностью по одну сторону от изоповерхности), то построения геометрии в этой ячейке рендер-сетки не происходит. Во всех остальных случаях по таблице T определяется соответствующий номеру K набор треугольников, по формуле (1) вычисляются координаты вершин этих треугольников и выполняется их построение (более подробно генерация треугольников с помощью геометрического шейдера описана в [5]). Отметим, что перед началом визуализации трехмерное поле насыщенности S вытесняющей жидкости загружается в видеопамять в виде вещественной 3d-текстуры, а таблица T наборов треугольников – в виде целочисленной 2d-текстуры.

Сгенерированные геометрическим шейдером треугольники автоматически разбиваются графическим конвейером на фрагменты изображения, каждый из которых обрабатывается **фрагментным шейдером**. В данном шейдере выполняется расчет цвета фрагмента результирующего изображения модели изоповерхности на основе затенения по Фонгу [5].

Результаты. Предложенный метод был реализован в программном комплексе визуализации результатов моделирования неустойчивого вытеснения нефти из пористых сред. С помощью созданного комплекса было проведено исследование изменения изоповерхности насыщенности вытесняющей жидкости на последовательности из 73 шагов, полученных в результате моделирования процесса вытеснения нефти водой на сетке размера 100×100×100 ячеек. Построение и визуализация модели изоповерхности проводились при разрешении 3840×2160 пикселов с помощью видеокарты NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti, средняя скорость синтеза изображений составила около 100 кадров в секунду. На рисунке 2 показан кадр визуализации, соответствующий моменту прорыва фронта вытеснения: на модели изоповерхности видны характерные языки («пальцы») прорывающейся вытесняющей жидкости.

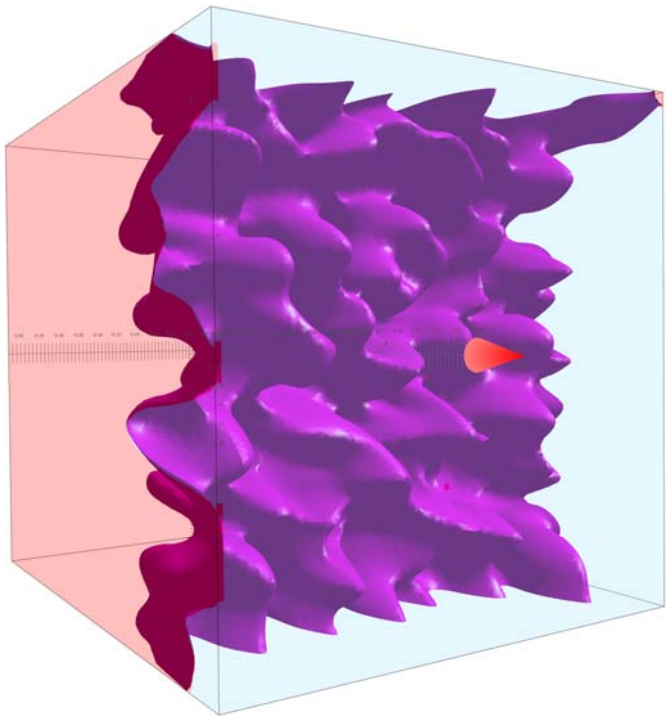


Рис. 2. Пример кадра визуализации модели изоповерхности на Ultra HD экране

Заключение. В работе предложен новый распределенный метод построения и визуализации на GPU полигональной модели изоповерхности, который обеспечивает синтез в масштабе реального времени качественных изображений изоповерхности на экранах сверхвысокой четкости. Предложенное решение основано на создании и выполнении на GPU потоков «шагающих кубиков» с помощью разработанного комплекса тесселяционных, геометрического и фрагментного шейдеров. Новизна работы состоит в распараллеливании потоков «шагающих кубиков» на ядрах GPU с помощью программируемой тесселяции патчей-квадов (прямоугольных параметрических графических примитивов), которая имеет высокую вычислительную мощность за счет аппаратной поддержки на уровне архитектуры GPU и низкие накладные расходы видеопамяти. На основе предложенного метода был реализован программный комплекс-визуализатор и была проведена его апробация на данных, полученных в результате моделирования неустойчивого вытеснения нефти водой. Апробация подтвердила, что созданные методы и алгоритмы отвечают требованиям, предъявляемым к визуализации результатов моделирования неустойчивого вытеснения нефти. Разработанное решение может быть использовано при проведении исследований в нефтегазовой отрасли, а также при создании виртуальных лабораторий, систем виртуального окружения, образовательных приложений и др.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (*проект № 16-29-15099-офи_м*).

Список использованных источников

1. **Бетелин, В. Б.** Цифровое месторождение – путь к трудноизвлекаемым запасам углеводородов / В. Б. Бетелин // Инновации. – 2014. – № 1. – С. 37–38.
2. **Моделирование** и визуализация процесса вытеснения нефти из пористой среды / М. В. Михайлюк, П. Ю. Тимохин, А. В. Мальцев и др. // Вестник кибернетики. – 2016. – № 3. – С. 35 – 41.
3. **Interactive** Ray Tracing for Isosurface Rendering / S. Parker, P. Shirley, Y. Livnat et al. // Proc. of the IEEE Visualization 98 (VIZ'98). – 1998. – P. 233 – 238.
4. **Bourke P.** Polygonising a scalar field / P. Bourke. – URL : http://paulbourke.net/geometry/polygonise/ (дата обращения: 10.10.2018).
5. **Bailey, M.** Graphics Shaders: Theory and Practice, Second Edition / M. Bailey, S. Cunningham // CRC Press. – 2011. – 518 p.

References

1. **Betelin, V. B.** Cifrovoe mestorozhdenie – put' k trudnoizvlekaemym zapasam uglevodorodov / V. B. Betelin // Innovacii. – 2014. – № 1. – S. 37–38.
2. **Modeling** and visualization of process of oil displacement from porous medium / M. V. Mikhaylyuk, P. Yu. Timokhin, A. V. Maltsev, et al. // Proceedings in Cybernetics International Journal. – 2016. – № 3 (23). – P. 35 – 41.
3. **Interactive** Ray Tracing for Isosurface Rendering / S. Parker, P. Shirley, Y. Livnat et al. // Proc. of the IEEE Visualization 98 (VIZ'98). – 1998. – P. 233 – 238.
4. **Bourke P.** Polygonising a scalar field / P. Bourke. – URL : http://paulbourke.net/geometry/polygonise/ (дата обращения: 10.10.2018).
5. **Bailey, M.** Graphics Shaders: Theory and Practice, Second Edition / M. Bailey, S. Cunningham // CRC Press. – 2011. – 518 p.

УДК 519.711

Седых И. А..[1], Демахин Д. С.[2]
[1]Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк
(Тел. (4742) 328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru),
[2]Воронежский государственный университет, Россия, г. Воронеж
(Тел. (495) 5395519, e-mail: demakhin.ds@gmail.com)

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ДВУХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

Sedykh I. A.[1], Demakhin D. S.[2]
[1]Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk
(Tel. (4742) 328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru),
[2]Voronezh State University, Russia, Voronezh
(Tel. (495) 5395519, e-mail: demakhin.ds@gmail.com)

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE SIMULATON MODEL OF THE PROCESS OF FORMAION OF TRANSPORT FLOWS AT TWO CROSSROADS

Аннотация. В работе приведена программная реализация имитационной модели транспортной системы, состоящей из группы перекрестков. Модель представлена дискретной системой, а именно: вероятностной временной иерархической раскрашенной сетью Петри. Данная математическая структура используется для описания транспортной системы, представленной группой перекрестков с гибким алгоритмом формирования транспортных потоков. В качестве альтернативы для управления и регулирования автотранспорта могут быть использованы прикладные результаты, в связи с этим построение таких моделей является перспективным направлением на сегодняшний день. Результаты, полученные в процессе моделирования, свидетельствуют об адекватности реализованной модели. Итогом данной работы является программа, написанная на языке C++, реализующая алгоритм формирования транспортных потоков на двух перекрестках.

Ключевые слова: программа, имитационное моделирование, сети Петри, дискретные системы, временные сети Петри, инфраструктурный объект, иерархические сети Петри, раскрашенные сети Петри, вероятностные сети Петри.

Abstract. The paper presents the software implementation of a simulation model of a transport system consisting of a group of intersections. The model is represented by a discrete system, namely, a probabilistic temporal hierarchical colored Petri net. This mathematical structure is used to describe a transport system represented by a group of intersections with a flexible algorithm for generating traffic flows. As an alternative, the applied results can be used to control and regulate motor transport; therefore, the construction of such models is a promising direction for today. The results obtained during the simulation indicate the adequacy of the implemented model. The result of this work is a program written in C ++ language that implements an algorithm for the formation of traffic flows at two intersections.

Keywords: program, simulation modeling, Petri nets, discrete systems, temporary Petri nets, infrastructure object, herarchical Petri nets, colored Petri nets, probabilistic Petri nets.

Введение. Компьютерные программы в том или ином виде используются повсеместно. Несмотря на различные сложности, возникающие при их разработке, ни у кого не возникает мысли отказаться от этого. Это вызвано тем, что готовый продукт экономит

огромное количество времени и других ресурсов, что перекрывает большинство недостатков, возникающих при создании программы. В моделировании динамических систем без программирования расчеты становятся громоздкими или вообще не выполнимыми. В связи с этим написание программы является необходимым и важным шагом при разработке, тестировании или моделировании различных систем.

Имитационная модель группы перекрестков. Ранее в [1] была описана схема перекрестка, реальный и модифицированный алгоритмы его функционирования. В дальнейшем этот инфраструктурный объект был представлен в виде сети Петри [2]. Были проведены предварительные расчеты, которые показали позитивные результаты. В дальнейшем в [3] был разработан алгоритм на основе дискретной системы и реализована программа для одного инфраструктурного объекта. По результатам не было выявлено серьезных противоречий, которые бы в корне меняли поведение ранее смоделированной системы. Следующим шагом была разработка системы и алгоритма [4] ее функционирования для нескольких перекрестков. В данной статье приведена программная реализация такой системы.

Проведение экспериментов. Для построения имитационной модели была написана программа на языке C++, реализующая функционирование двух перекрестков, с гибкой системой формирования транспортных потоков на каждом из них. Ниже приведено описание основных классов и их методов. При этом будут использованы следующие сокращения: ИО – инфраструктурный объект; СП – сети Петри; МС – моделируемая система; Ф – функция; СГ – светофорная группа; УМ – управляющий маркер. Ниже рассмотрим подробнее приведенные классы.

«Petri_Net» – основной класс, содержащий в себе структурирующую информацию о моделируемой системе. В нем содержатся данные о количестве и типе инфраструктурных объектов, входящих в систему, а также указано их взаимное месторасположение относительно друг друга и характер связей между ними. Ниже на рис. 1 приведены методы данного класса, а на рис. 2 – переменные-члены. Этот класс выполняет функции сети Петри второго уровня.

Следующий для рассмотрения класс – «Infrastructure_facility». Его функциональные особенности схожи с алгоритмом сети Петри первого уровня. Количество объектов данного класса соответствует числу инфраструктурных объектов. В каждом таком объекте содержится информация о количестве полос с входными потоками машин, количество выходных направлений, число светофорных групп, все вероятностные характеристики, используемые на данном уровне сети. Объекты данного класса по своему являются интерпретаторами соответствующих инфраструктурных объектов, а потому также хранят информацию о своем порядковом номере в моделируемой системе и типе, к которому они принадлежат. Данный класс достаточно объемен, поэтому приведем лишь фрагменты его методов на рис. 3 и его переменных-членов на рис. 4.

Далее рассмотрим класс «Transition». Его функциональной задачей является реализация алгоритмов работы переходов сети Петри. Объекты данного класса содержат информацию о состоянии перехода: заблокирован, активен и не активен, а также времени его блокировки. Все методы и переменные-члены класса изображены ниже на рис. 5.

```
Petri_Net();
~Petri_Net();
// (Ф) загрузки структуры (МС)
void F_Download_Structure_Of_The_Transport_System(ifstream &Download);
// (Ф) создания нового (ИО)
void F_If_The_Creation_Of_The_Real_Object(ifstream &Download, int current_column, int current_row, int current_object);
// (Ф) работы (МС)
void F_function(int The_system);
// (Ф) вычета единицы во времени ожидания маркеров
void F_minus_time_global(int TR, vector <Mark> T_num_mark);
// (Ф) въезда машин на инфраструктурный объект
void F_of_cars_entering_the_IF(int TR, vector <Mark> T_num_mark);
```

Рис. 1. Методы класса «Petri_Net»

```
// число ИО в системе
unsigned int number_of_objects;
// макс. число ИО в системе по колонкам и строчкам соответственно
unsigned int maximum_number_of_objects_in_a_column, maximum_number_of_objects_per_row;
// Матричная интерпретация моделируемой системы (МС)
vector <vector <Infrastructure_facility>> M_of_objects;
// Вектор адресов (ИО) расположенных по возрастанию (ИО)
vector <Infrastructure_facility*> Vec_adress_of_objects;
// Матрица типов (ИО) в (МС)
vector <vector <int>> T_object_type_matrix;
// матрицы связей между (ИО):
// [] - номер (ИО) откуда,
// [] - номер (ИО) куда, сейчас нету
// element - номер перехода исходящего направления
vector <unsigned int> T_bond_matrix;
// матрица с вероят-м распр-м въезжающих машин
// для (ИО)
// [] - номер (ИО)
// [] - число дорого- цветов на данном (ИО)
// element - вероятность перекраски машины в этот цвет
vector <vector <int>> F_Matrix_Of_Probabilities_input;
// итеративная маркировка в позициях - перекрестках(ИО)
vector <vector <Mark>> Mark_in_pos_global;
// итеративная маркировка в переходах - переездах между (ИО)
vector <vector <Mark>> Mark_in_tr_global;
```

Рис. 2. Переменные-члены класса «Petri_Net»

```
//  (Ф) формирующая матрицы инцидентности
void F_Incidence_Matrix();
// (Ф) формирующая вектор задержек
void F_Initial_Matrix_Of_Delays();
// (Ф) загрузки начальной маркироваки для данного (ИО)
void F_Initial_Marking();
// (Ф) загрузки для данного (ИО) матрицы вероятностей распределения исходящих потоков
void F_Matrix_Of_Probabilities();
// (Ф) формирования матриц R для одного цвета(road)
vector <vector <int>> F_Incidence_Matrix_For_One_road(vector <vector <int>> M_inced, ifstream &F_Loading_incident_matrix);
// (Ф) расчета матрицы R для текщего (ИО)
void F_Matrix_Of_net_res();
// (Ф) загрузки для данного (ИО) необходимой
// матрицы задержек
vector <int> F_Delay_Matrix(ifstream &Loading);
// (Ф) загрузки граничных таймингoвых свойств объекта:
// макс. время задержки (СГ), макс. и мин. время работы (СГ)
void F_Timing_Properties_Of_The_Object();
// (Ф) загрузки вероятностного алгоритма въезда на
// перекресток транспорта
void F_algorithm_of_entrance_to_the_intersection();
// (Ф) реализующая функционирования моделируемого алгоритма
void F_Functioning_of_the_algorithm(ofstream &F_save_input, ofstream &F_save_output);
```

Рис. 3. Фрагмент методов класса «Infrastructure_facility»

```
// количество позиций и переходов для (СП)
int num_positions, num_transitions;
// количество цевтов - полос на данном (ИО)
int num_roads;
// порядковый номер (ИО) в (МС)
int object_number;
// количество регулируемых групп на данном (ИО)
int number_of_managed_groups;
// тип (ИО) в унифицированной системе распределения
int object_type;
// время работы зеленого сигнала, определеннное алгоритмом,
// для  (СГ) которая будет активирована
int Time;
// Количество исходящих потоков / направлений
int T_num_of_outgoing_streams;
// вероятностное распределение входных потоков, для генерации
vector <int> V_num_of_entering;
// вектора матриц инцидентности R+, R-, R
vector <vector <vector <int>>> Positive_matrix_of_incidence, Negative_matrix_of_incidence, Matrix_net_res;
```

Рис. 4. Фрагмент переменных-членов класса «Infrastructure_facility»

```
class Transition
{
public:
    Transition();
    Transition(TOTS Transition_state_new);
    ~Transition();

    // Изменение состояние перехода: заблокирован, активен, неактивен
    void Transition_state_change(TOTS Transition_state_new) { Transition_state = Transition_state_new; }

    // Текщее состояние перехода:
    // заблокирован, активен, неактивен
    TOTS F_state_of_transition_curr() { return Transition_state; }
private:
    TOTS Transition_state;
};
```

Рис. 5. Методы и переменные-члены класса «Transition»

Далее остановимся на классе «MARK». Его объекты представлены маркерами, каждый из которых является машиной или УМ в системе. Каждый такой объект-маркер несет в себе информацию о текущем цвете, местоположении в моделируемой системе – порядковый номер инфраструктурного объекта, оставшемся времени блокировки – задержки. Все методы и переменные-члены данного класса изображены на рис. 6.

```
class Mark
{
public:
    Mark() {}
    Mark(int Initial_road, int Current_Global_Location);
    ~Mark();

    // получение характеристик маркера
    int F_curren_marker_road() { return T_curr_marker_road; }
    int F_curr_global_location_marker() { return T_curr_global_location; }
    int F_curr_tame_blocked() { return T_curr_tame_blocked; }

    // изменение характеристик маркера
    void F_Ch_curr_road_Of_The_Marker(int road) { T_curr_marker_road = road; }
    void F_Ch_curr_global_location_marker(int Location) { T_curr_global_location = Location; }
    void F_Ch_curr_tame_blocked(int T_Time) { T_curr_tame_blocked = T_Time; }

private:
    int T_curr_marker_road;     // текущий цвет маркера
    int T_curr_global_location; // номер (ИО) в системе на котором находиться маркер
    int T_curr_tame_blocked;    // оставшееся время блокировки
};
```

Рис. 6. Методы и переменные-члены класса «MARK»

Ниже в таблице 1 приведен фрагмент результатов данных с первого перекрестка.

В соответствии с табл. 1, в первых четырех столбцах приведены максимальные значения машин по каждой СГ на каждом шаге выбора активируемой СГ перекрестка. В следующих четырех столбцах приведены значения времени ожидания соответствующих светофорных групп СГ. Далее идет столбец времени работы зеленого сигнала. Последний столбец показывает, на какой СГ будет включен зеленый сигнал. Аналогичный файл данных сформирован и для второго перекрестка.

Заключение. Итогом данной работы является программа, написанная на языке C++, реализующая алгоритм формирования транспортных потоков на двух перекрестках.

1. Фрагмент результатов имитационной модели для первого перекрестка

M_1	M_2	M_2	M_2	T_1	T_2	T_3	T_4	L	K	t
11	7	14	9	114	0	76	38	35	3	426
14	7	2	11	152	38	0	76	35	1	461
6	11	6	11	0	76	38	114	31	2	496
11	1	6	14	34	0	72	148	35	4	527
13	4	8	3	72	38	110	0	35	1	562
4	7	11	5	0	76	148	38	31	3	597
7	8	5	8	34	110	0	72	20	2	628
9	1	6	10	57	0	23	95	23	4	648
13	2	7	2	83	26	49	0	35	1	671
6	6	13	3	0	64	87	38	35	3	706
7	8	5	8	38	102	0	76	20	4	741
8	9	7	1	61	125	23	0	20	2	761
8	2	9	2	84	0	46	23	23	3	781
9	6	0	4	110	26	0	49	20	1	804
2	8	1	7	0	49	23	72	20	2	824
3	2	2	8	23	0	46	95	20	4	844
7	4	4	2	46	23	69	0	20	1	864
0	8	6	5	0	46	92	23	20	2	884
2	9	9	8	23	0	115	46	20	3	904
4	3	3	11	46	23	0	69	29	4	924

Список использованных источников

1. **Седых, И. А.** Гибкое управление светофорной системой перекрестка на основе нейронных сетей / И. А. Седых, Д. С. Демахин // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 1(47). – С. 94 – 100.

2. **Седых, И. А.** Иерархические раскрашенные временные сети Петри на основе окрестностных моделей / И. А. Седых, Е. С. Аникеев // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2(52). – С. 83 – 89.

3. **Демахин, Д. С.** Применение нейронных сетей для управления сигналами светофора на перекрестке / Д. С. Демахин, И. А. Седых // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета : в 2-х ч. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2016. – Ч. 1. – С. 352 – 355.

4. **Седых, И. А.** Имитационная модель двух перекрестков на основе сетей Петри / И. А. Седых, Д. С. Демахин // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2017. – № 4. – С. 31 – 37.

References

1. **Sedykh, I. A.** Gibkoe upravlenie svetofornoj sistemoj perekrestka na osnove nejronnyh setej / I. A. Sedykh, D. S. Demakhin // Avtomatizaciya processov upravleniya. – 2017. – № 1(47). – S. 94 – 100.

2. **Sedykh, I. A.** Ierarhicheskie raskrashennye vremennye seti Petri na osnove okrestnostnyh modelej / I. A. Sedykh, E. S. Anikeev // Avtomatizaciya processov upravleniya. – 2018. – № 2(52). – S. 83 – 89.

3. **Demakhin, D. S.** Primenenie nejronnyh setej dlya upravleniya signalami svetofora na perekrestke / D. S. Demakhin, I. A. Sedykh // Sbornik tezisov dokladov nauchnoj konfe-rencii studentov i aspirantov Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: V 2-h ch. Ch. 1. – Lipeck : Lipeckij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2016. – S. 352 – 355.

4. **Sedykh, I. A.** Imitacionnaya model' dvuh perekrestkov na osnove setej Petri / I. A. Sedykh, D. S. Demakhin // Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii. – 2017. – № 4. – S. 31 – 37.

УДК 004.925

Ершов Д. А., Никитенко М. С.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, г. Москва
(Тел. 8(925)0242117, e-mail: huntlier@yandex.ru)

МЕТОДЫ ТАЙЛОВОЙ И КЛАСТЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН

Ershov D. A., Nikitenko M. S.
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Russia, Moscow
(Tel. 8(925)0242117, e-mail: huntlier@yandex.ru)

METHODS OF TILED AND CLUSTERED SHADING OF COMPLEX 3D SCENES

Аннотация. В статье рассмотрены методы расчета освещенности сложных трехмерных сцен с большим количеством источников света, приведены их достоинства и недостатки, а также предложен способ их ускорения. Методы прямой визуализации (forward rendering) и отложенного расчета освещенности (deferred shading) не способны обеспечить эффективный расчет освещенности сцен с большим количество источников света. Методы тайловой и кластерной визуализации (tiled and clustered shading) позволяют существенно ускорить процесс расчета за счет отсечения источников света, не влияющих на освещенность внутри определенных ячеек трехмерного пространства, разбиение на которые выполняется с помощью тайлов или кластеров соответственно. Узким местом данных методов является этап отсечения источников света, выполняемый их полным перебором для каждой ячейки пространства. Данный этап возможно ускорить за счет рассмотренного в статье метода.

Ключевые слова: визуализация, освещение и затенение, кластерная визуализация, тайловая визуализация, прямая визуализация, отложенное освещение и затенение.

Abstract. The article describes methods of shading complex three-dimensional scenes with large number of light sources, their advantages and disadvantages, and also proposed a way to accelerate them. Forward and deferred rendering techniques are unable to provide effective calculation of the illumination of scenes with large number of light sources. Tiled and clustered shading techniques significantly speed up the process of shading by culling light sources that don’t affect the illumination inside certain cells of three-dimensional space, which divided into tiles or clusters respectively. The bottleneck of these methods is light sources culling stage, performed by their complete enumeration for each cell of the space. This stage can be accelerated due to the method discussed in the article.

Keywords: rendering, lighting, shading, clustered shading, tiled shading, forward rendering, deferred shading.

Введение. Современные системы визуализации стремятся достичь фотореалистичной графики, для чего очень важен корректный расчет освещенности объектов сцены. Полноценный расчет глобального освещения сцены с учетом косвенного (вторичного) освещения возможен лишь с использованием методов трассировки лучей, однако он занимает большое количество времени из-за большой вычислительной сложности данных методов.

В основе методов визуализации в реальном времени лежит процесс проецирования трехмерной сцены на плоскость и растеризация. Трехмерная сцена за счет математических преобразований проецируется на плоскость, после чего происходит процесс растеризации, в ходе которого спроецированная геометрия разбивается на отдельные фрагменты, соответствующие пикселам. Однако при выполнении операции проецирования теряется информация о той части сцены, которую не видит виртуальный наблюдатель (виртуальная камера), из-за чего невозможно выполнение расчета косвенного освещения без применения дополнительных методов.

Одной из важных проблем при визуализации является расчет освещенности от большого количества источников света. При расчете конечного цвета каждого пиксела требуется знать информацию о всех источниках света, влияющих на освещенность объекта, которому этот пиксел принадлежит. Обработку источников света, влияющих на определенный объект, невозможно выполнить параллельно в пределах графического конвейера при непосредственном расчете освещенности. Современные методы визуализации по-разному решают данную проблему.

Классические методы визуализации. *Прямая визуализация* (*forward rendering*) [1, 2] – традиционный метод визуализации, который поддерживают многие современные системы. При прямой визуализации в процессе обработки геометрических объектов сцены выполняется расчет освещенности каждого видимого фрагмента каждого объекта. Расчет освещенности выполняется последовательным перебором всех источников света в сцене и расчетом вклада каждого из них в общую освещенность фрагмента. Однако не осуществляется отсечение источников света, не влияющих на конечную освещенность фрагментов финального изображения.

Данный метод является очень простым для реализации, поддерживает аппаратное сглаживание и отображение полупрозрачных объектов. Но он не подходит для визуализации сцен, содержащих большое количество геометрических объектов и источников света. Время визуализации оказывается пропорциональным количеству геометрических объектов в сцене, умноженному на число источников света.

Отложенное освещение (*deferred shading*) [1, 2] – это метод, представляющий иной подход к визуализации, основная идея которого заключается в отделении этапа растеризации геометрических объектов от этапа расчета освещенности фрагментов финального изображения. На первом этапе выполняется растеризация геометрических параметров объектов сцены в несколько полноэкранных изображений, формирующих геометрический буфер (G-buffer, geometry buffer). На втором этапе данные о сцене считываются из геометрического буфера, и выполняется расчет освещенности сцены за счет растеризации ограничивающих объемов источников света.

Данный метод намного лучше справляется со сценами, содержащими большое количество геометрических объектов, но большое количество источников света все равно негативно сказывается на скорости его работы. Помимо этого, данный метод имеет ряд ограничений, связанных с невозможностью использования аппаратного сглаживания и отсутствием поддержки отображения полупрозрачных объектов, что приходится выполнять с помощью прямой визуализации.

Методы тайловой и кластерной визуализации. Данные методы позволяют справиться с недостатками расчета освещенности классических методов визуализации, при этом не теряют преимуществ каждого из методов. Они используются как надстройка над классическими методами, позволяющая выполнять эффективное отсечение источников света.

Тайловая визуализация [2 – 4] заключается в разбиении экранного пространства на квадратные участки (тайлы). На основе информации о глубине сцены выполняется определение ограничивающих объемов тайлов – усеченных пирамид. Размер тайлов выбирается так, чтобы сохранять баланс между использованием памяти и эффективностью осуществления вычислений. При использовании тайлов малого размера (8×8 пикселов) возрастает общее количество тайлов и количество используемой памяти, но возрастает точность отсечения источников света.

Отсечение источников света выполняется за счет присвоения тайлам только тех источников света, которые могут повлиять на освещенность фрагментов геометрии сцены, находящихся внутри этих тайлов. Присвоение выполняется в несколько этапов. Первоначально вычисляются максимальное и минимальное значения глубины фрагментов внутри тайла, после чего возможно построение усеченной пирамиды тайла. Далее выполняется проверка пересечения ограничивающих объемов источников света с усеченной пирамидой тайлов, благодаря чему формируется локальный список источников света тайла. Данный этап эффективно распараллеливается за счет использования разделяемой памяти графического процессора.

После этого возможно выполнение визуализации всех геометрических объектов сцены с расчетом освещенности только от тех источников света, которые присутствуют в локальном списке тайла, которому принадлежит рассчитываемый фрагмент финального изображения. Однако для тайлов, фрагменты которых существенно отличаются по глубине, усеченная пирамида получается слишком длинной, из-за чего пересекается с большим количеством ограничивающих объемов источников света, которые не влияют на освещенность внутри тайла. Это существенно снижает эффективность отсечения обрабатываемых источников света.

Кластерная визуализация [2, 5] позволяет решить проблемы тайловой визуализации. Каждый кластер имеет фиксированную глубину, что снижает количество источников света, не влияющих на освещенность внутри тайла. Перед началом визуализации выполняется построение параллельных осям ограничивающих параллелепипедов (AABB – Axis-Aligned Bounding Box) кластеров в пространстве камеры, разбивая пирамиду видимости на множество частей. Построение кластерной сетки в пространстве камеры позволяет избежать перестроения AABB на каждом кадре визуализации. Присвоение источников света выполняется также в несколько этапов, как и в методе тайловой визуализации. Первоначально выполняется предварительное построение буфера глубины сцены за счет визуализации всех геометрических объектов в отдельное полноэкранное изображение. Параллельно с этим на стадии обработки фрагментов графического конвейера осуществляется определение уникальных (активных) кластеров за счет вычисления трехмерного индекса кластера, которому принадлежит обрабатываемый фрагмент, и маркировки кластера. На стадии присвоения источников света уникальным кластерам выполняется перебор всех источников света и проверка пересечения ограничивающих объемов источников света с AABB кластеров, за счет чего формируется локальный список источников света для каждого кластера.

При визуализации всех геометрических объектов сцены расчет освещенности выполняется только от тех источников освещения, которые находятся в локальном списке кластера, которому принадлежит рассчитываемый фрагмент финального изображения. Этапы данного метода эффективно распараллеливаются и выполняются полностью на GPU, что позволяет избежать лишнего копирования данных между CPU и GPU.

Ускорение обработки источников света. Узким местом методов тайловой и кластерной визуализации является этап присвоения источников света тайлам или кластерам соответственно. Рассмотрим данный этап подробнее в методе кластерной визуализации. Присвоение выполняется методом грубой силы (brute-force), т.е. полным перебором всех источников света, выполняемым параллельно в пределах каждого кластера, в ходе которого осуществляется проверка пересечений.

Данный этап можно существенно ускорить за счет построения иерархии ограничивающих объемов (BVH – Bounding Volume Hierarchy) источников света, присутствующих в сцене. Тогда на стадии присвоения источников света будет выполняться обход дерева ограничивающих объемов источников света, что позволит быстро определять подмножество источников света, потенциально пересекающихся с ограничивающим объемом кластера. Таким образом, проверка пересечения осуществляется только с теми источниками света, которые содержатся в узле BVH, пересекающимся с ограничивающим объемом кластера.

Иерархия ограничивающих объемов должна перестраиваться при любом изменении позиции или ориентации источников света относительно виртуальной камеры. Для эффективного построения иерархии ограничивающих объемов необходимо вычислить код Мортона для каждого из источников света на основе его позиции в пространстве. Код Мортона (порядок Мортона) [6] – это функция, задающая взаимно однозначное отображение многомерных данных в одномерное пространство с сохранением локальности данных. После вычисления кодов Мортона необходимо выполнить их сортировку. Для этого используется гибридная сортировка, позволяющая максимально эффективно использовать ресурсы GPU. Первоначально выполняется поразрядная сортировка [7], позволяющая получить отдельные отсортированные группы кодов. После этого осуществляется сортировка слиянием [8], результатом которой является полностью отсортированная последовательность кодов Мортона. Построение уровней BVH выполняется параллельной обработкой линейных участков отсортированной последовательности кодов Мортона благодаря свойству пространственной локальности данных.

С помощью данной оптимизации возможна визуализация трехмерных сцен, содержащих более миллиона источников света, в реальном времени. Оптимизированный метод также эффективно справляется и с малым количеством источников света. Аналогичная оптимизация применима к методу тайловой визуализации.

Заключение. В результате проведенного исследования разработан способ оптимизации методов тайловой и кластерной визуализации за счет использования иерархии ограничивающих объемов источников света, а также эффективный способ ее построения непосредственно на GPU с применением кодов Мортона и гибридной сортировки. На основе предложенного способа разработана программная реализация улучшенного метода кластерной визуализации, полноценно использующая вычислительные шейдерные программы для выполнения всех этапов метода непосредственно на GPU, а также эффективно взаимодействующая с различными типами памяти GPU на каждом из этапов. Данная программная реализация протестирована и прошла профилирование с использованием встроенных средств системы визуализации, разработанной в рамках магистерской диссертации.

Список использованных источников

6. **Engel, W.** GPU Pro 4: Advanced Rendering Techniques / W. Engel, A. K. Peters // CRC Press, 2013. – 370 p.

7. **Real-Time** Rendering, Fourth Edition / T. Akenine-Moller, E. Haines, N. Hoffman et al. // CRC Press, 2018. – 1198 p.

8. **Olsson. O.** Tiled Shading / O. Olsson, U. Assarsson // Journal of Graphics, GPU and Game Tools. – 2011. – V. 15, № 4. – P. 235 – 251.

9. **Takahiro, H.** Forward+: Bringing Deferred Lighting to the Next Level / H. Takahiro, J. McKee, J. Yang // Eurographics 2012 – Short Papers. Ed. By Carlos Andujar and Enrico Puppo. The Eurographics Association.

10. **Olsson, O.** Clustered Deferred and Forward Shading / O. Olsson, M. Billeter, U. Assarsson // Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics. – 2012. – C. 1 – 10.

11. **Morton, G.** A computer Oriented Geodetic Data Base; and a New Technique in File Sequencing / G. Morton. – Ottawa, Canada 1ed. : IBM Ltd. – 1966.

12. **Harris, M.** Parallel Prefix Sum (Scan) with CUDA / M. Harris, S. Sengupta, J. Owens // GPU Gems 3. Ed. By Hubert Nguyen. – 2007. – 1st ed. Addison-Wesley. – P. 871 – 873.

13. **Green, O.** GPU Merge Path – A GPU Merging Algorithm / O. Green, R. McColl, D. Bader // Proceeding of the 26th ACM international conference on Supercomputing – ICS ‘12.

УДК 625.7

Колотвин Д. А., Решетов С. Ю., Клещарева А. В.
Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург
(Тел. +7(3532)372513, e-mail: kolotvin@list.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕХА ПО РЕМОНТУ И ОБСЛУЖИВАНИЮ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Kolotvin D. A., Reshetov S. Yu., Kleschereva A. V.
Orenburg State University, Russia, Orenburg
(Tel. +7(3532)372513, e-mail: kolotvin@list.ru)

MODELING REPAIR AND MAINTENANCE WORKSHOP OF LORRES

Аннотация. В работе рассмотрены особенности моделирования каркаса производственного корпуса и несущих конструкции цеха. В зависимости от климатических условий и для обеспечения пространственной устойчивости и жесткости каркаса подобраны поперечные сечения элементов конструкции. По требованию заказчика и другими нормативными документами выполнен проект цеха, выбран сортамент стальных элементов конструкции, включающий номенклатуру поперечных сечений.

Ключевые слова: проект, жесткость, элементы конструкции, каркас, поперечное сечение элементов конструкции.

Abstract. The paper discusses the features of the frame of the production building and the supporting structures of the workshop. Depending on the climatic conditions, the cross-sections of the structural elements were selected to ensure the spatial stability and rigidity of the frame. At the request of the customer, the regulatory documents and design of the workshop were completed; a range of steel structural elements, including a cross-section nomenclature was selected.

Keywords: project, rigidity, structural elements, frame, cross-section of structural elements.

В связи с повышением конкуренции между предприятиями, работающими в направлении ремонта грузовых автомобилей, требуется незамедлительная реакция, которая зачастую связана с перевооружением или запуском нового оборудования. Строительство таких цехов подходит и удачно вписывается в сложившуюся ситуацию, так как возведение и реконструкция таких комплексов требует минимальных вложений средств и времени, в отличие от типовых, абсолютное большинство которых морально устарели и требуют дорогостоящих реконструкций.

Возникает необходимость решать вопросы, связанные с экономией потребляемых ресурсов за счет применения прогрессивных систем инженерного оборудования, утепления зданий, преобразования архитектурного художественного облика производственных зданий.

Кроме этого, применение достаточно легких и легко разбираемых металлоконструкций дает возможность менять объемно планировочные решения, пристраивать другие модули, переносить здания, что позволяет мобильно реагировать на запросы эксплуатационных предприятий и конъюктуру рынка.

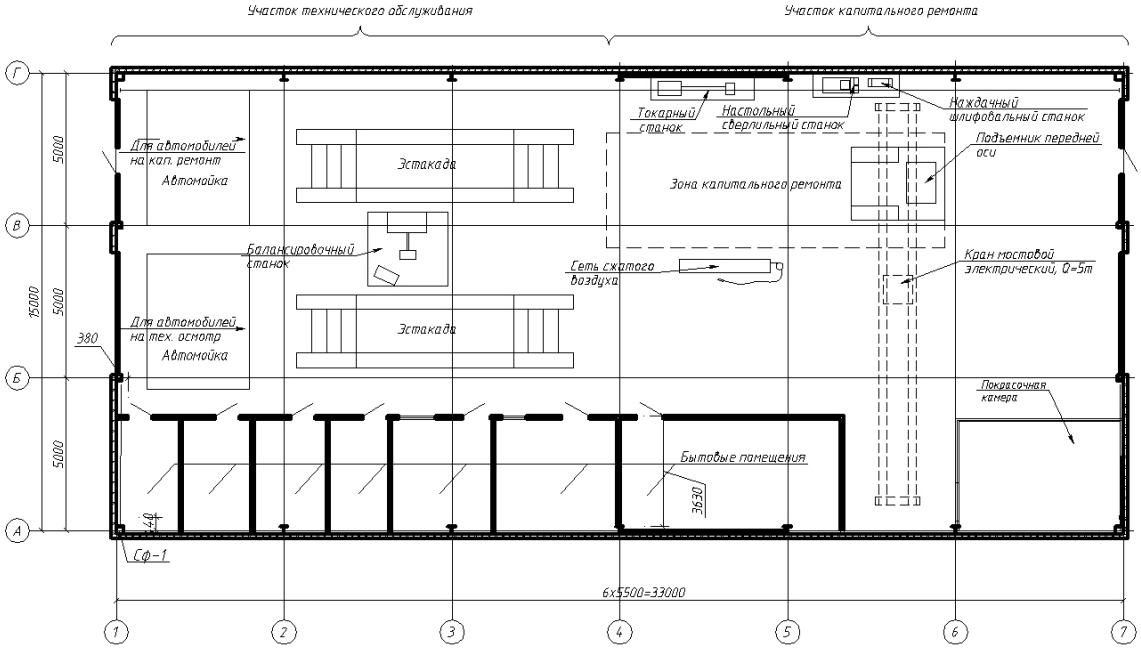


Рис. 1. Цех обслуживания грузовых автомобилей

Основными этапами технологического процесса таких объектов являются: визуальный осмотр, диагностика и выявление дефектов как в кузовной и ходовой частях, так и в двигателе, покраска и замена деталей, разборка и сборка двигателей. Выявленные дефекты устраняются на участке капитального ремонта. Предполагается, что проект содержит два ремонтных участка: участок технического обслуживания и участок капитального ремонта с расположенным спецоборудованием.

На начальном этапе проектирования задаем исходные данные:

Район строительства …… город Оренбург
Климатический район …….. III А
Снеговой район IV, кПа …….. 2,4
Ветровой район III, кПа ……... 0,38
Нормативная глубина промерзания грунтов, см …….. 180
Зона влажности 3 ……. сухая
Температура наиболее холодной пятидневки, °С …… –31
Температура отопительного периода, сут. …… 201
Режим помещения …… Т – нормальный 1 = 18 Ф < 60%
Степень эксплуатации ……. А
Степень долговечности ……... II
Степень огнестойкости …… II
Класс здания ……. II

Каркас производственного корпуса представляется в виде пространственной системы, состоящей из колонн, подкрановых балок и несущих конструкций покрытия.

В статическом отношении сборный каркас представляет собой совокупность поперечных и продольных рам.

Поперечные рамы воспринимают нагрузки от покрытия, снега, кранов, ветра, от массы наружных стен.

Продольные рамы обеспечивают устойчивость поперечных рам, воспринимают ветровые нагрузки и динамические воздействия от торможения кранов.

Устойчивость и пространственная жесткость каркаса обеспечивается совместной работой поперечных рам, связанных между собой продольными связями, подкрановыми балками и элементами покрытия.

Сборная конструкция каркаса здания изготовлена и принята в соответствии с номенклатурой индустриальных изделий.

Цех имеет два воротных проема со стороны фасада по оси *1* и симметрично расположенные проемы со стороны фасада по оси *7* для проезда автомобилей. Вход в здание осуществляется через двери, установленные в воротах. Поперечные рамы стального каркаса здания образованы стойками (колоннами) и связанными с ними сквозными ригелями, в качестве которых применены односкатные стропильные фермы. Шаг колонн – 5,500 м, полезная высота – 7,100 м. Для установки мостового крана в цехе предусмотрены подкрановые пути на отметке верхней грани подкрановой балки +6,000 м. Предполагаемая грузоподъемность крана – 5 т. Между осями *1 – 4* и *А–Б* из силикатного кирпича построены бытовые помещения с размерами в плане 3,630×16,500 м, высотой 2,900 м.

Кровля ремонтно-производственного цеха односкатная, утепленная со скатом от оси *А* к оси *Г*. В качестве кровельной панели применены термопанели «монолит» с базальтовым волокном толщиной 160 мм. Из этих же термопанелей выполнены стены здания. Стыки панелей заделаны нащельниками с уплотнением силиконовым герметиком.

В качестве несущей конструкции покрытия рамного каркаса установлены фермы трапецеидального очертания с треугольной решеткой. Колонны поперечных рам в осях *2 – 6* выполнены из двутавра 25Ш1 по СТО АСЧМ 20-93, которые вместе с фахверковыми стойками по осям *1*, *7* (труба 150×8) образуют каркас здания. Подкрановые сплошные сварные балки с ездой поверху, выполненные из двутавра № 25 с поперечными ребрами, опираются на консоли l = 200, приваренные к колоннам. Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечиваются анкеровкой колонн и стоек фахверка к железобетонным фундаментам, болтовым соединением фермы к колоннам, горизонтальными связями, установленными в плоскостях верхних и нижних поясов ферм. Дополнительно жесткость обеспечивается: в продольном направлении – прогонами из швеллера № 22, опертыми на узлы верхнего пояса ферм и швеллера № 18 в осях *А*, *Г*, вертикальными связями между фермами и колоннами в осях *4–5*; в поперечном направлении – вертикальными связями между стойками фахверка. Вертикальные связи между колоннами выполнены из трубы ГОСТ 10704–91, диаметром 159 мм с толщиной стенки 6 мм.

Стальные оконные переплеты – имеют размеры 2,2×5,5м. Они состоят из рамы с глухими и открывающимися створками. Остекление тройное, стекла в переплетах окантованы резиновыми прокладками и крепятся к переплету с помощью алюминиевых нащельников. Переплеты из спаренных гнутых профилей.

Полы выполняют из бетонного покрытия. В качестве грунтового основания применяется щебень утрамбованный. Подстилающим слоем служит бетонная подготовка толщиной 200 мм с последующим шлифованием.

При техническом обслуживании и ремонте грузовых автомобилей длина цеха должна составлять не менее 33 м со сквозным проездом. Ширина цеха принимается

из расчета свободного размещения параллельно двух технологических линий (10 м) и достаточным местом для установки ремонтного оборудования, инструментальных ящиков и подсобных помещений. Таким образом, площадь цеха должна составлять не менее 450 м^2. Принимаем размеры здания, прямоугольного в плане, 15,00×33,00 м с двумя сквозными проездами. Высота здания определяется наличием крана или подкрановой балки. Одно из условий заказчика проекта – использовать имеющиеся двутавровые балки и швеллеры длиной 5,50…5,80 м – предопределило выбор шага колонн в 5,50 м, а наличие большого количества уголков различного сечения – позволило принять стропильную ферму в качестве несущей конструкции покрытия.

На начальном этапе данной работы проанализирован рынок строительных конструкций согласно предварительному расчету выбран сортамент стальных элементов конструкции, включающий номенклатуру поперечных сечений (табл. 1).

Технические характеристики

Рабочая площадь, м^2 …….... 450
Площадь застройки, м^2 ……. 495
Строительный объем, м^3 …….. 4700

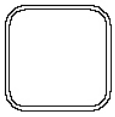
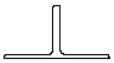
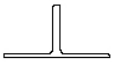
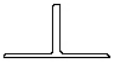
Высота цеха от уровня пола до низа стропильной фермы:

$$H_0 = (H_2 + H_1) = 1100 + 6000 = 7100 \text{ мм},$$

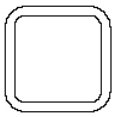
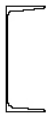
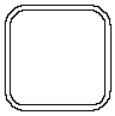
где H_1 – наименьшая отметка головки кранового рельса, которая задается по условиям технологического процесса (обуславливается требуемой высотой подъема деталей автомобилей над уровнем пола).

В результате данной работы выполнена компоновка пространственного каркаса в целях дальнейшего реального проектирования и изучения напряженно-деформированного состояния смонтированных конструкций цеха при их непосредственной эксплуатации.

1. Поперечные сечения элементов

Тип элемента	Поперечное сечение	Графическое представление
Стойка С-1	Двутавр 25 Ш1	
Рама фахверка	Труба 150×8	
Ферма Ф-1		
Верхний пояс в осях Г-В	Спаренный уголок 100×8	
Верхний пояс в осях В-Б	Спаренный уголок 63×5	
Верхний пояс в осях Б-А	Спаренный уголок 50×5	
Раскосы	Спаренный уголок 80×6	

Продолжение табл. 1

Тип элемента	Поперечное сечение	Графическое представление
Стойки	Квадратная труба 50×5	
Нижний пояс	Спаренный уголок 63×5; спаренный уголок 100×8	
Прогоны	Швеллер с уклоном полок № 22	
Подкрановые балки	Двутавр 25Б1	
Связи по верхним и нижним поясам	Квадратная труба 100×6	

Список использованных источников

1. **Колотвин, А. В.** Модель упругой оболочки, находящейся в напряженно-деформированном состоянии / А. В. Колотвин, Е. А. Орлова // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : матер. VI Всерос. науч.-практ. конф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет». – 2013. – С. 423–424.

2. **Ельчанинов, П. Н.** Расчеты на прочность при различных видах нагружения с учетом разномодульности материала / П. Н. Ельчанинов, М. И. Климов, А. В. Колотвин // СТИН. – 2010. – № 9. – С. 12 – 16.

3. **El'chaninov, P. N.** Strength calculations for material with variable elastic properties / P. N. El'chaninov, M. I. Klimov, A. V. Kolotvin // Russian Engineering Research. – 2010. – V. 30, № 12. – P. 1259 – 1262.

References

1. **Kolotvin, A. V.** Model of an elastic shell in a stress-strain state / A. V. Kolotvin, E. A. Orlova // Computer integration of production and IPI-technology Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Federal State Budgetary Establishment of Higher Professional Education “Orenburg State University”. – 2013. – P. 423–424.

2. **El'chaninov, P. N.** Strength calculations for various types of loading, taking into account the different modulus of the material / P. N. El'chaninov, M. I. Klimov, A. V. Kolotvin // STIN. – 2010. – № 9. – P. 12 – 16.

3. **El'chaninov, P. N.** Strength calculations for material with variable elastic properties / P. N. El'chaninov, M. I. Klimov, A. V. Kolotvin // Russian Engineering Research. – 2010. – V. 30, № 12. – P. 1259 – 1262.

УДК 004.94

Бельченко Ф. М., Сосенушкин С. Е.
Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Россия, г. Москва
(E-mail: philepp@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Belchenko F. M., Sosenushkin S. E.
Moscow State University of Technology “STANKIN” (Russian Federation)
(E-mail: philepp@mail.ru)

APPLICATION OF PROFESSIONAL COMPUTER GRAPHICS AND MODELING FOR DEVELOPMENT OF VIRTUAL MODELS OF ROBOTIC COMPLEX

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования работы роботов. Рассмотрены известные средства моделирования. Проанализированы возможности программы Blender для разработки робототехнических моделей. Проведен анализ экономической эффективности различных средств моделирования. Изучен опыт других организаций в вопросах работы с Blender.

Ключевые слова: моделирование, разработка, робототехника, графика, движок.

Abstract. The article discusses the issues of modeling the work of robots. The well-known modeling tools are considered. The possibilities of the Blender program for the development of robotic models are analyzed. The analysis of the economic efficiency of various modeling tools has been made. The experience of other organizations in working with Blender has been studied.

Keywords: modeling, development, robotics, graphics, engine.

Введение. Робототехника является сложным технологическим направлением. Она объединяет в себе большое количество других инженерных направлений. В связи с этим при разработке роботов необходимо работать с большим количеством программных средств, к которым относятся: средства разработки программного обеспечения, средства автоматизированного проектирования, программы математических расчетов, симуляторы электронных схем.

После разработки робота требуется провести проверку его работы с помощью компьютерной модели. Для этого в специальных симуляторах создаются условия, близкие к реальному окружению. Данное программное обеспечение позволяет проверять состояние роботов при различных условиях на устойчивость, надежность, точность выполнения различных операций, эффективность взаимодействия с другими роботами и т.д. Многие крупные робототехнические компании создают программы моделирования и симуляции для своих моделей роботов (рис. 1).

Средства моделирования и проектирования роботов являются очень важными направлениями развития робототехники. Они находят применение не только в профессиональной робототехнике, но и любительской [1].

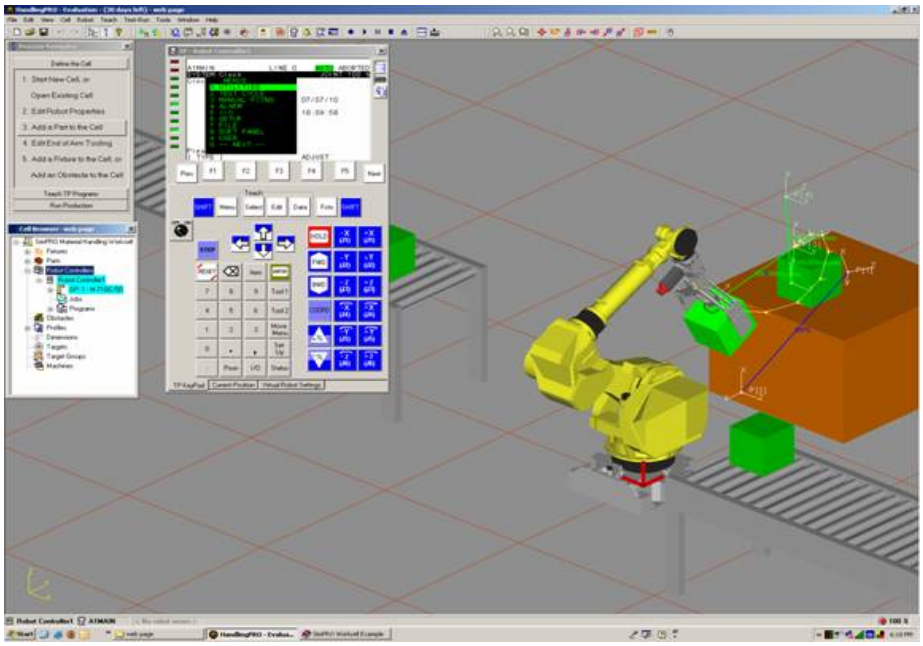


Рис. 1. Пример моделирования в симуляторе Roboguide компании FANUC

Существующие средства моделирования. Среди программ для моделирования роботов можно выделить ROBSIM 5. Она используется для обучения проектированию роботов, включая электрические схемы и программное обеспечение. Также данная программа находит применение и в моделировании работы роботов на различной местности.

Проектирование робота проводится в 3DS MAX, в котором создаются геометрические модели, электронные компоненты и интерфейс пульта управления роботами. У колес, осей и линейных звеньев задаются моменты трения и силы трения, при необходимости накладываются ограничения на перемещение и угол поворота, а также указываются двигатели, которые ими управляют.

В ROBSIM во время испытания можно с помощью виртуального оператора подойти к роботу, включить или выключить на нем различные органы управления, а также с помощью разработанного пульта управления приводить робот в движение (рис. 2) [2].

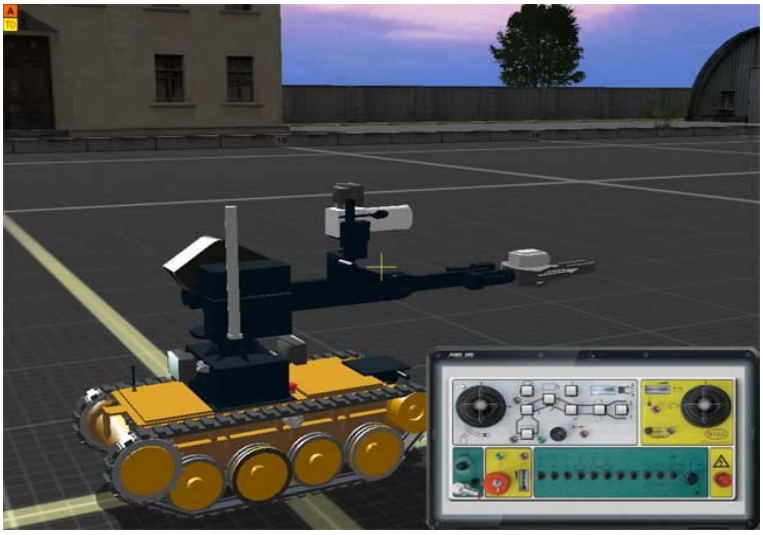


Рис. 2. Работа в режиме виртуального оператора

Большинство существующих средств моделирования имеет ряд недостатков. К наиболее распространенным можно отнести: низкую гибкость, высокую стоимость, плохую оптимизацию работы с графикой. Большинство программ не совместимо со сторонним программным обеспечением (например, программы для ведения математических расчетов). Многие программы были разработаны не так давно специалистами в области робототехники и имеют плохую графическую оптимизацию, что усложняет работу с большим количеством объектов. Следовательно, необходимо изучить альтернативное программное обеспечение, нивелирующее данные недостатки.

О предлагаемых средствах моделирования. К такому программному обеспечению следует отнести Blender. Данная программа предназначена для разработки различных 3D-моделей объектов. Также на ней возможно проводить моделирование различных многозвенных механизмов. Программа является открытой, совместимой со всеми основными операционными системами и имеет возможность подключения программ математического моделирования.

Blender один из самых популярных физических движков Bullet, который предоставляет возможности для твердотельного моделирования. К ним относятся:

– просчет столкновений таких фигур: сфера, параллелепипед, цилиндр, конус, выпуклый корпус и сетка треугольников. Это позволяет вести работу с различными типами звеньев;

– просчет пересечения координат в AABB-деревьях. Данная возможность позволяет вести моделирование столкновений роботов с другими объектами;

– раздельный и непрерывный расчет столкновений;

– модульное строение позволяет подключить собственное физическое ПО.

Экономический и технический анализ. Проведем сравнительный анализ различных средств моделирования роботов. Для сравнения были выбраны еще 3 программы для моделирования: Roboguide, V-rep и ROBSIM 5[3].

Одно из основных преимуществ Blender – возможность создания моделей различных роботов внутри среды. При необходимости возможно подключение программ математических расчетов. Roboguide не предоставляет такой возможности. V-rep и ROBSIM 5 требуют для этой цели подключение внешних программ графического моделирования. Данный критерий может иметь важное значение при расчете экономической эффективности. Связано это с тем, что если на предприятии требуется разработка моделей, то не нужно докупать коммерческие программы для разработки моделей. Разработке моделей ROBSIM 5 требуется установка коммерческой программы 3DS MAX, что значительно повышает стоимость организации рабочего места инженера. Программное обеспечение Roboguide является полностью закрытым и работает только с роботами Fanuc.

Важным сравнительным критерием является стоимость программного обеспечения. Она определяет затраты на моделирование. По этому показателю Blender имеет явное преимущество перед многими средствами моделирования, так как эта среда распространяется бесплатно по открытой лицензии. Roboguide является полностью закрытой и коммерческой. Стоимость за лицензию на один компьютер начинается от 1500 долларов. V-rep является бесплатным только для учебных целей. Для использования на предприятии необходимо покупать лицензию по договорной стоимости. Стоимость лицензии на ROBSIM 5 составляет около 35 долларов.

Еще одним критерием определения экономической эффективности является возможность работы в различных операционных системах. Программы Blender и V-rep могут работать в дистрибутивах Linux и MacOS, что необходимо учитывать при организации рабочего места. Roboguide и ROBSIM 5 могут работать только в операционной системе Windows.

По итогам анализа сведем все результаты в общую таблицу (табл. 1).

1. Анализ средств моделирования работы робототехнических комплексов

Наименование средства моделирования	Возможность создания моделей внутри среды	Стоимость	Возможность подключения внешних программ	Мульти-платформенность
Roboguide	Отсутствует	От 1500$ за минимальную версию	Отсутствует	Windows
Blender	Имеется	Бесплатно. Распространяется по открытой лицензии	Возможно подключение средств разработки ПО, программ математических расчетов	Windows, Linux, MacOS
V-rep	Отсутствует	Бесплатна учебная версия	Возможно подключение средств разработки ПО	Windows, Linux, MacOS
ROBSIM 5	Отсутствует	37$ за коммерческую версию	Подключение среды 3DS MAX	Windows

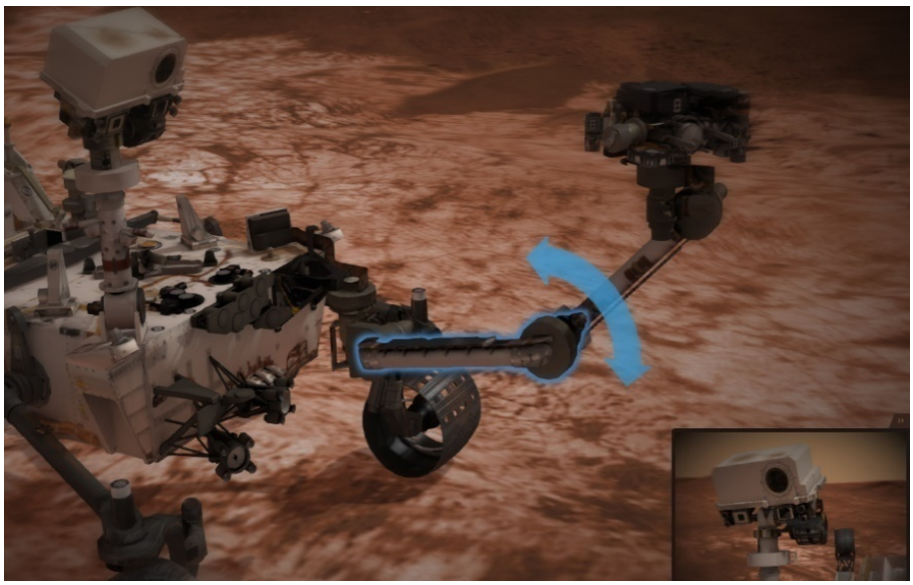


Рис. 3. Модель марсохода в Experience Curiosity

Данное приложение обеспечивает высококачественную и детальную визуализацию планеты с использованием реальных данных исследований NASA за 50 лет и позволяет астрономам, инженерам и студентам изучать особенности марса. Программа имитирует Марс в трехмерном режиме на основе фактических данных Curiosity и NASA Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Управлять камерами и манипулятором в приложении можно как вручную, так и в режиме пользовательского контроля.

Команда NASA уже использует Experience Curiosity, чтобы помочь в выборе возможных посадочных мест для будущих аппаратов агентства. Также приложение будет использоваться как часть объявленного проекта NASA для изучения и выбора кандидатов для первой миссии по отправке человека на Марс в 2030-х годах.

Программное обеспечение Blender и движок Bullet испытывается для работы в рамках развития лаборатории ситуационного моделирования Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники Министерства обороны Российской Федерации. В программе ведутся разработки моделей для виртуального полигона [5, 6]. Разрабатываются модели для наземных робототехнических комплексов военного назначения. Для разработки манипуляторов роботов за основу взята модель робота LBR 4+ (рис. 4).

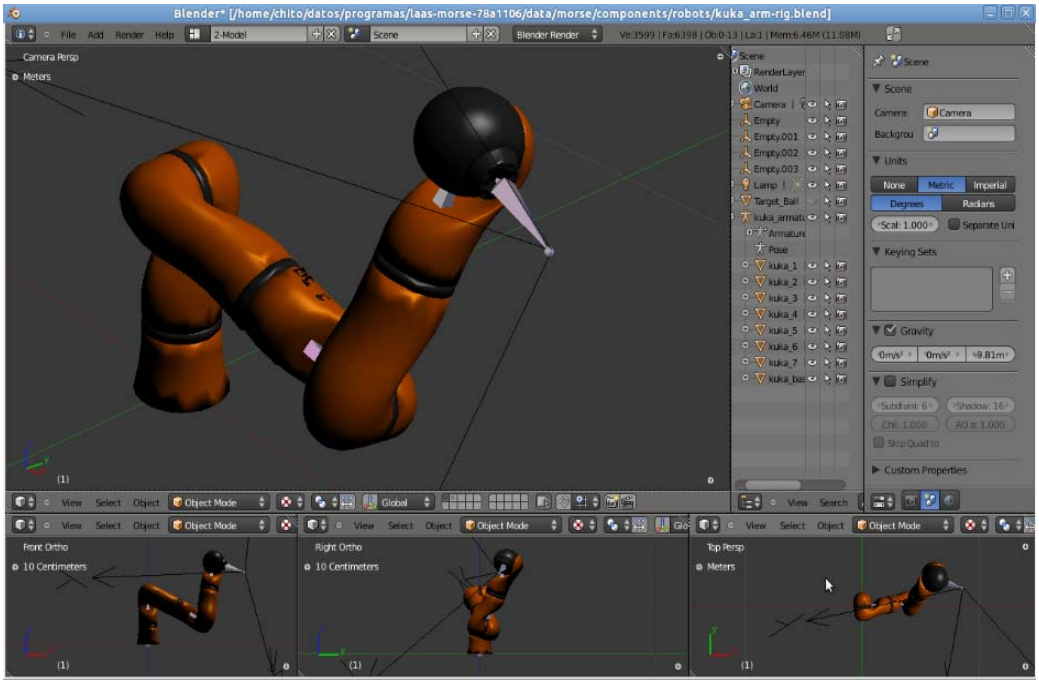


Рис. 4. Многозвенный манипулятора в среде Blender

В данный момент разрабатывается модель на основе кинематической схемы манипулятора (рис. 5). Манипулятор имеет 5 вращательных степеней подвижности. В качестве инструмента используется схват с двумя пальцами. Высота манипулятора составляет 0,45 м. Углы вращения q_1, q_2, …, q_6 равны от 0 до 120 градусов.

Для расчета обратной задачи кинематики будем использовать подвижности q_2, q_3 и q_4. Подвижности q_1 и q_5 не определяют прямолинейные движения в мировой системе координат и их рассчитывать не обязательно. Введем обозначения, где $c_i = \cos q_i$; $s_i = \sin q_i$.

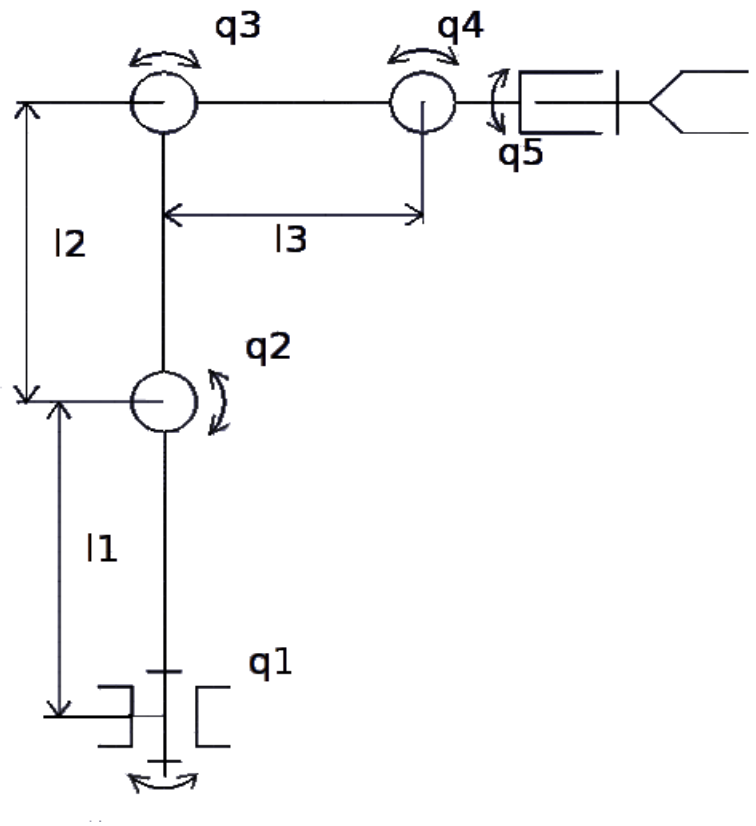


Рис. 5. Кинематическая схема разрабатываемой модели манипулятора

Составим матрицу A_i, определяющую положения звеньев манипулятора:

$$A_i = \begin{pmatrix} c_i & -s_i & l_i c_i \\ s_i & c_i & l_i c_i \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, i = 2, 3, 4, \quad (1)$$

где i – номер звена из кинематической схемы модели манипулятора; l_i – длина i-го звена.

Получаем матрицу T_4, являющуюся решением прямой задачи о положении:

$$T_4 = \begin{pmatrix} c_{234} & -s_{234} & l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_3 c_{234} \\ s_{234} & c_{234} & l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_3 s_{234} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Далее выводим соотношения из матрицы T_4:

$$l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_4 c_{234} = x_4, \quad (2.1)$$

$$l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_4 s_{234} = y_4, \quad (2.2)$$

$$q_2 + q_3 + q_4 = \varphi_4 . \quad (2.3)$$

В данных соотношениях x_4 и y_4 – координаты q_4, а φ_4 – ориентация q_4 относительно начала координат.

Преобразуем полученную систему координат:

$$l_2 c_2 + l_3 l_{23} = x_4 - l_3 c_\varphi = x_3, \quad (3.1)$$

$$l_2 s_2 + l_3 s_{23} = x_4 - l_3 s_\varphi = y_3. \quad (3.2)$$

Решением обратной задачи будут являться следующие соотношения:

$$c_2 = \frac{1}{2l_2l_3}(x_3^2 + y_3^2 - l_2^2 - l_3^2), \tag{4.1}$$

$$x_3c_2 + y_3s_2 = l_2 + l_3c_3. \tag{4.2}$$

Последнее соотношение представляет уравнение относительно обобщенной координаты q_2, поскольку правая часть известна в силу (4.1), то решением является соотношение

$$\cos(q_1 - \Psi) = \frac{l_2+l_3c_3}{\sqrt{x_3^2+y_3^2}}, \tag{4.3}$$

где $\Psi = \operatorname{atan} 2(y_3, x_3)$.

Далее из (4.3) находим

$$q_4 = \varphi_4 - q_2 - q_3 . \tag{4.4}$$

В дальнейшем будет проводиться работа по моделированию сервоприводов TowerPro MG995R и программирование движений модели манипулятора. Уже завершены разработки кода для прототипа манипулятора (рис. 6) и далее осуществляется перенос кода в среду Blender.

После окончания разработки будет проведено сравнение виртуальной модели с реальным прототипом манипулятора (рис. 7) [7].

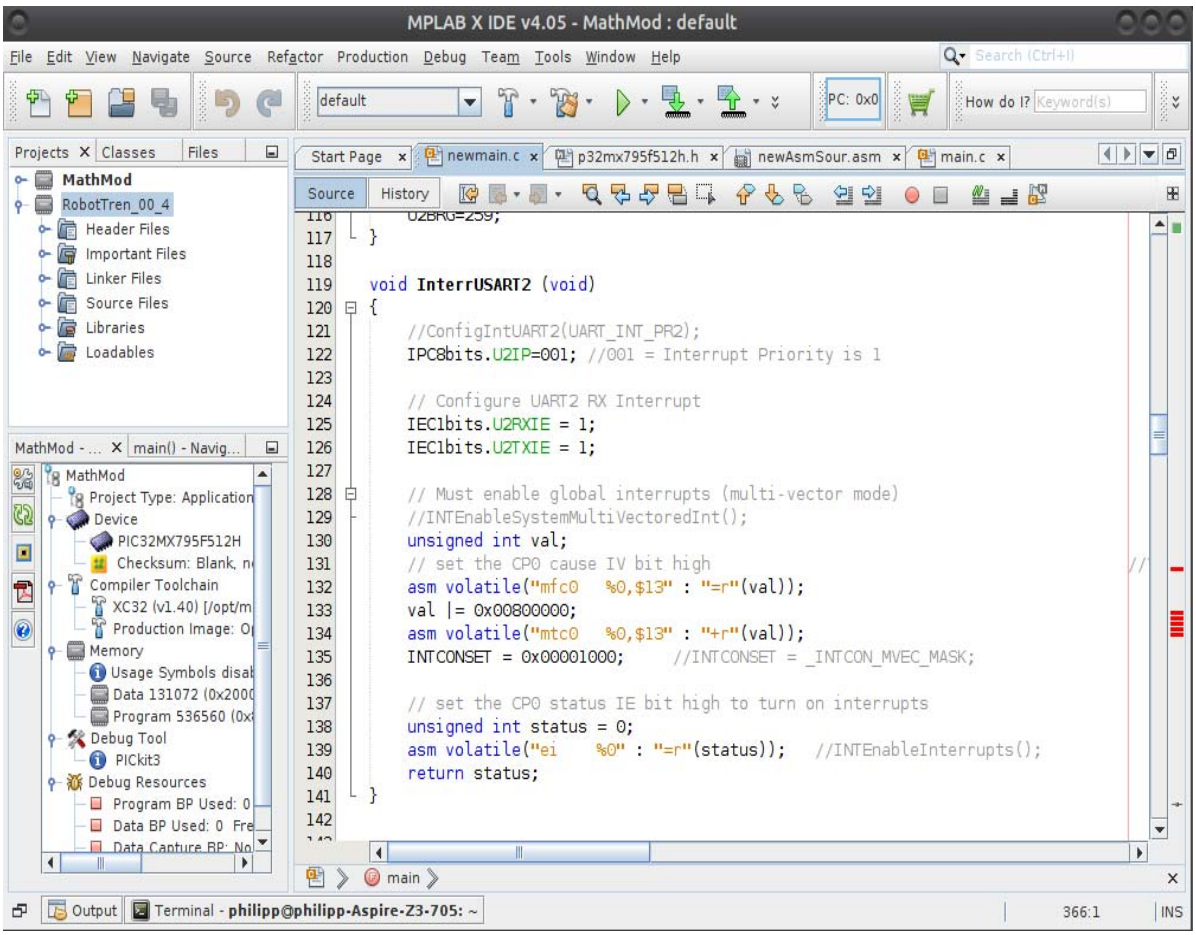


Рис. 6. Разработанный код в среде среды MPlabX

Рис. 7. Прототип разрабатываемого манипулятора

Заключение. Моделирование роботов является сложной задачей, которая требует использования сложного и функционального программного обеспечения. Зачастую не хватает возможностей существующих программ. Высокий интерес может представлять программное обеспечение, которое изначально могло разрабатываться под другие задачи, но при этом имеет большое количество инструментов для моделирования роботов. Зачастую оно даже превосходит стандартные средства по некоторым параметрам.

В работе было рассмотрено одно из таких средств, которое может найти массовое применение в робототехнических разработках в будущем благодаря своей доступности и высоким техническим возможностям. Был проведен сравнительный анализ с другими средствами моделирования. Разработана математическая модель манипулятора, с которой в дальнейшем будут проводиться работы по моделированию робототехнических комплексов. Проведен обзор опыта использования рассматриваемого средства моделирования.

Список использованных источников

1. **Юревич, Е. И.** Основы робототехники / Е. И. Юревич. – 3-е изд. – БВХ-Петербург, 2010. – 360 с.

2. **Евстигнеев, Д. В.** Системы управления интеллектуальных мобильных роботов в среде Dyn-SoftRobSim 5 : учеб. пособие / Д. В. Евстигнеев. – М. , 2014. – 190 с.

3. **Вигерс, К.** Разработка требований к программному обеспечению / К. Вигерс, Д. Битти ; пер. с англ. – 3-е изд., доп. – Издательство «Русская редакция» ; СПб. : БВХ-Петербург, 2014. – 736 с.

4. **New** Online Exploring Tools Bring NASA's Journey to Mars to New Generation. https://www.nasa.gov/press-release/new-online-exploring-tools-bring-nasas-journey-to-mars-to-new-generation (Aug. 5, 2015 RELEASE 15-164).

5. **Kharin, A.,** Kharina O., Sosenushkin S., Rodyukov A., Belchenko F. Development of the enterprises' human potential on the basis of joint scientific-educational complexes with universities, EDULEARN18 Proceedings. – Valencia, Spain, 2018. – P. 7664 – 7668.

6. **Pozdneev, B.,** Busina F., Sutyagin M., Ovchinnikov P., Sosenushkin S., Obuhova E., Levchenko A., Sharovatov V. Knowledge management and competency development based on personal e-portfolio, ICERI2017 Proceedings, Valencia, Spain, 2017. – P. 3928 – 3937.

7. **Sosenushkin, S.,** Belchenko F., Rodyukov A., Kharin A., Kharina O. 2018 Developing a robotics simulator for industrial robot operator training, EDULEARN18 Proceedings, Valencia, Spain, 2018. – P. 7693 – 7699.

References

1. **Yurevich, E. I.** Osnovy robototekhniki. – 3-e izd. – BVH-Peterburg, 2010. – 360 s.

2. **Evstigneev, D. V.** Sistemy upravleniya intellektual'nyh mobil'nyh robotov v srede Dyn-SoftRobSim 5: Ucheb. posobie. – Moskva, 2014. – 190 s.

3. **Vigers, K.** Bitti D. Razrabotka trebovanij k programmnomu obespecheniyu. 3-e izd., dopolnennoe / Per. s angl. – Izdatel'stvo “Russkaya redakciya”. – SPb. : BVH-Peterburg, 2014. – 736 str. : il.

4. **New** Online Exploring Tools Bring NASA's Journey to Mars to New Generation. https://www.nasa.gov/press-release/new-online-exploring-tools-bring-nasas-journey-to-mars-to-new-generation (Aug. 5, 2015 RELEASE 15-164).

5. **Kharin, A.**, Kharina O., Sosenushkin S., Rodyukov A., Belchenko F. Development of the enterprises' human potential on the basis of joint scientific-educational complexes with universities, EDULEARN18 Proceedings, Valencia, Spain, 2018. – P. 7664 – 7668.

6. **Pozdneev, B.**, Busina F., Sutyagin M., Ovchinnikov P., Sosenushkin S., Obuhova E., Levchenko A., Sharovatov V. Knowledge management and competency development based on personal e-portfolio, ICERI2017 Proceedings. – Valencia, Spain, 2017. – P. 3928 – 3937.

7. **Sosenushkin, S.**, Belchenko F., Rodyukov A., Kharin A., Kharina O. 2018 Developing a robotics simulator for industrial robot operator training, EDULEARN18 Proceedings, Valencia, Spain, 2018. – P. 7693 – 7699.

УДК 62-69

Алехин П. А., Хлебников В. А., Хрусталев Р. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8-910-855-39-51, e-mail: pavel.aleh@yandex.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАДИАТОРОВ ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Alekhin P. A., Khlebnikov V. A., Khrustalev R. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8-910-855-39-51, e-mail: pavel.aleh@yandex.ru)

PROSPECTS OF APPLICATION OF METHODS OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION FOR CREATION OF NEW DESIGNS OF COOLING RADIATORS

Аннотация. В статье рассматривается использование модели твердого изотропного тела с пенализацией для решения задачи топологической оптимизации стационарной теплопроводности плоской металлической пластины с условием Дирихле на боковой границе. Практическое использование результатов решения этой задачи связано с созданием принципиально новых конструкций радиаторов пассивного охлаждения. Найденная геометрия оптимальной топологии была изготовлена с использованием технологии проволочной электроэрозионной резки. Эта конструкция отличается сложной «дендрической» геометрией и является не пригодной для изготовления с помощью токарной и фрезерной обработки. Поэтому представляет интерес сравнение эффективности теплоотвода сложного топологически оптимизированного радиатора и традиционных конструкций.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, радиатор охлаждения, температурное поле, электроэрозионная лазерная резка, моделирование.

Abstract. The article deals with the use of a model of a solid isotropic body with penalization to solve the problem of topological optimization of the stationary thermal conductivity of a flat metal plate with the Dirichlet condition on the side boundary. The ractical use of the results of the solutions is associated with the creation of fundamentally new designs of passive cooling radiators. The found geometry of the optimal topology was made using wire electrical discharge cutting technology. This design is characterized by a complex “cylindrical” geometry and is unsuitable for manufacturing by turning and milling. Therefore, it is interesting to compare the efficiency of heat sink complex topologically optimized radiator and traditional designs.

Keywords: topology optimization, heat sink, temperature field, wire electrical discharge machining.

Введение. Организация теплообмена является важной задачей при проектировании современных микроэлектронных систем по причине их постоянной миниатюризации и повышения удельной мощности [1]. В связи с этим одним из подходов при создании новых конструкций является использование принудительной конвекции и различных схем жидкостного охлаждения [2]. Несмотря на значительную интенсификацию теплообмена, такой подход не всегда оправдан, поскольку связан с дополнительными затратами энергии на работу вентиляторов, наличием шума и вероятностью механических

поломок. Поэтому там, где это возможно, предпочтение отдается естественному охлаждению [3].

Для организации теплоотвода часто используются радиаторы. Их изготавливают на основе теплопроводящих материалов, таких как медь и алюминий. Радиаторы функционируют путем рассеивания тепла с помощью жидкостного охлаждения, естественной конвекции, принудительной конвекции или излучения. [4]

Таким образом, вызывает интерес применение новых эффективных методов проектирования конструкций охлаждения. Здесь необходимо отметить относительно новый метод топологической оптимизации (ТО), заключающийся в нахождении распределения материала внутри заданной области при выполнении ряда ограничений [5]. Применение ТО для оптимизации тепловых процессов в радиаторах охлаждения описано в работе [6]. В данной работе ставится задача создания новой конструкции радиатора пассивного охлаждения и сравнение ее эффективности с традиционными конструкциями ребристых радиаторов (см. рис. 1).

Рис. 1. Традиционная конструкция ребристого радиатора

Для изготовления традиционных радиаторов часто используются готовые прессованные алюминиевые профили с различной формой поперечного сечения, от которых отрезается заготовка требуемой длины. В силовой электронной аппаратуре стенки корпуса блока часто выполняются в виде ребристых радиаторов. Алюминий плавят в металлической емкости путем нагрева газовой горелкой. Далее алюминий в жидком агрегатном состоянии заливают в кокиль. После застывания и охлаждения кокиль раскрывается и из него извлекается изделие. Позже поверхность изделия обрабатывается. Мягкий и пластичный алюминий подвергается механообработке.

Надежность многих элементов технических систем (например, компонентов радиоэлектронной аппаратуры) зависит от их температуры. Для каждого элемента в технических условиях указывается предельная температура, при превышении которой элемент нельзя эксплуатировать. Поэтому важной задачей является обеспечение заданных тепловых режимов. Уменьшение размеров и веса блоков, применение интегральных микросхем, интенсивный режим эксплуатации радиоаппаратуры, часто в условиях повы-

шенной температуры окружающей среды – усложняют задачу обеспечения заданного теплового режима радиоэлементов.

Использование методов математического моделирования дает возможность проводить исследования тепловых процессов, протекающих в конструкциях и их элементах, а также определять на этапе проектирования степень соответствия тепловых режимов элементов в выбранной конструкции технических систем заданным условиям.

Рассмотрим двумерную задачу ТО стационарной теплопроводности квадратной пластины (см. рис. 2).

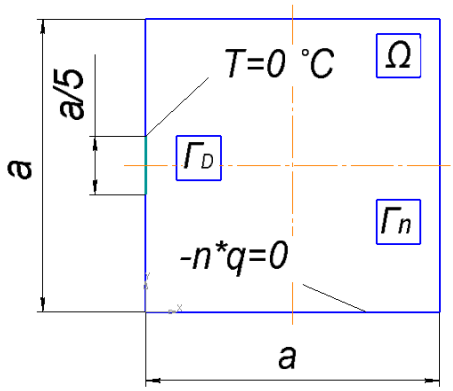


Рис. 2. Геометрия расчетной системы и используемые граничные условия

Такая задача является актуальной, например, для электронных устройств, когда важно обеспечивать заданный температурный режим функционирования компонентов за счет стока тепла через радиатор. В рассматриваемой изотропной расчетной области Ω осуществляется равномерное внутреннее тепловыделение Q. Температура расположенной посередине левой границы Γ_D шириной $0{,}2a$ принималась равной 0 °C. На остальных границах Γ_N теплообмен отсутствовал (условие Неймана). Стационарная теплопроводность в расчетной области описывается следующими уравнениями:

$$\nabla(k\nabla T)+Q=0,\ (x,\ y)\in\Omega, \tag{1}$$

$$T=0,\ (x,\ y)\in\Gamma_D, \tag{2}$$

$$(k\nabla T)n=0,\ (x,\ y)\in\Gamma_N, \tag{3}$$

где $T = T(x, y)$ – температурное поле в точке с координатами (x, y) внутри Ω, k – коэффициент теплопроводности материала пластины. Задача состоит в минимизации средней температуры пластины T_{av} при наличии ограничений на массу $m \le m_p$.

Дискретизация расчетной области осуществлялась двумерными прямоугольными КЭ. Постановка задачи предусматривает использование модели твердого изотропного тела с пенализацией SIMP [7]. В качестве метода оптимизации использован метод глобально сходящихся подвижных асимптот MMA [8], использующий анализ чувствительности целевой функции к варьируемым переменным. В результате решения задачи (1) – (3) получено распределение материала (рис. 3) с представлением данных в цветовой карте в градациях серого. Черный цвет означает присутствие материала, белый – отсутствие. Серый цвет является промежуточной плотностью. Отметим, что данный результат хорошо согласуется с результатами работ [9], [10].

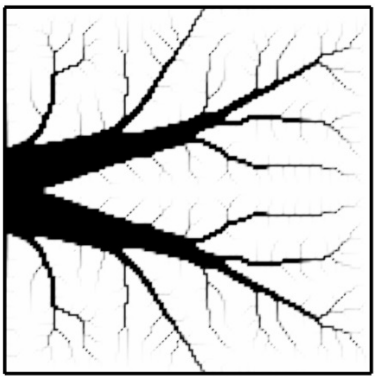


Рис. 3. Распределение материала при решении задачи

Как видно из рисунка, найденное распределение материала отличается сложной «дендрической» геометрией с развитой ветвящейся структурой. Поэтому она не пригодна для изготовления с помощью традиционных технологий фрезерной и токарной обработки металлов. Задача (1) – (3) является двумерной, поэтому в качестве заготовки использована металлическая пластина из стали 3 толщиной 10 мм. После анализа технологий резки металлических заготовок было принято решение о применении проволочной электроэрозионной резки [11] (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM). Эта технология эффективна при изготовлении образцов из твердых листовых металлических материалов, имеющих сложную геометрию [12].

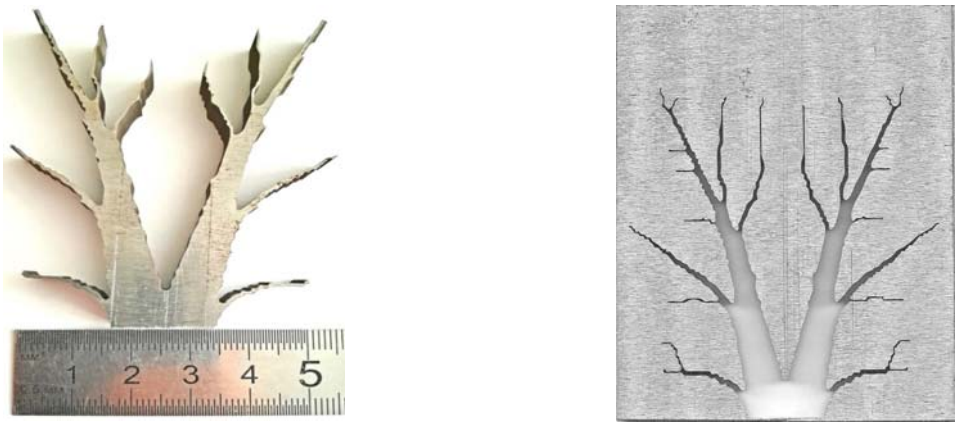
Методология. Была поставлена задача разработки конструкции нескольких конфигураций ребристых радиаторов (см. табл. 1.). Для создания одинаковых условий теплообмена длина L и высота основания d должны совпадать с аналогичными размерами ТО-радиатора (16,5 и 6 мм соответственно). Расстояние между ребрами c и ширина ребра b подбирались таким образом, чтобы расположить заданное количество ребер n. При этом при помощи варьирования высоты заготовки H осуществлялось равенство поверхностей двух типов конструкции. Параметры геометрии разработанных конструкций ребристых радиаторов, называемых в дальнейшем по числу ребер, сведены в табл. 1.

Данные о площади боковых теплоотдающих поверхностей радиаторов и сравнение с изготовленным ТО-радиатором приведены в табл. 1.

Экспериментальная часть. Топологически оптимизированная конструкция радиатора, изготовленная за 4 часа, представлена на рис. 4, *а*. В дальнейшем будем называть этот вариант «ТО-радиатор». В качестве заготовки была использована пластина из стали 3 размером 100×75×10 мм (рис 4, *б*). Ширина горизонтального основания образца составила 16,5 мм.

1. Площадь боковой поверхности традиционных радиаторов, мм^2

ТО-радиатор		**3**	**5**	**6**	**7**	**8**
теория	эксперимент					
7910	5425	3198	4946	6111	7657	8052
Относительно ТО-радиатора, %						
–	100	58,9	91,2	112,6	141,1	148,4



а) *б*)

Рис. 4. ТО-радиатор (*а*) и его заготовка после электроэрозионной резки (*б*)

Необходимо сравнить эффективности теплоотвода ТО-радиатора и конструкций ребристого радиатора из того же материала при условии равенства их поверхностей и использовании технологии WEDM. Варьировались количество ребер и материал радиаторов. Возникла необходимость рассмотреть материалы радиатора с разной теплопроводностью. Задачи стационарной тепловодности решались в двумерной постановке. Задаем равные условия для всех радиаторов Коэффициент теплопроводности на внешней поверхности радиатора равен 15 Вт/(м^2·К), на внутренней 10 Вт/(м^2·К), а также степень черноты 0,2. На опорной поверхности радиаторов задали тепловой поток, равный 30 000 Вт/м^2. В результате решения задач получили температурные поля, из которых определили среднюю температуру для каждого радиатора. Из этих результатов получили график зависимости средней температуры от типа радиатора и его материала.

Обсуждение результатов. Из результатов рис. 5. видно, что ТО-радиатор имеет преимущество в рассеивании тепла относительно ребристых радиаторов 3 (почти в 2 раза), 5 (в 1,3 раза) и 6 (в 1,1 раз). А результаты радиаторов 7 и 8 соизмеримы с ТО-радиатором. Но боковая поверхность данных ребристых радиаторов превышает ТО-радиатор в 1,5 раза.

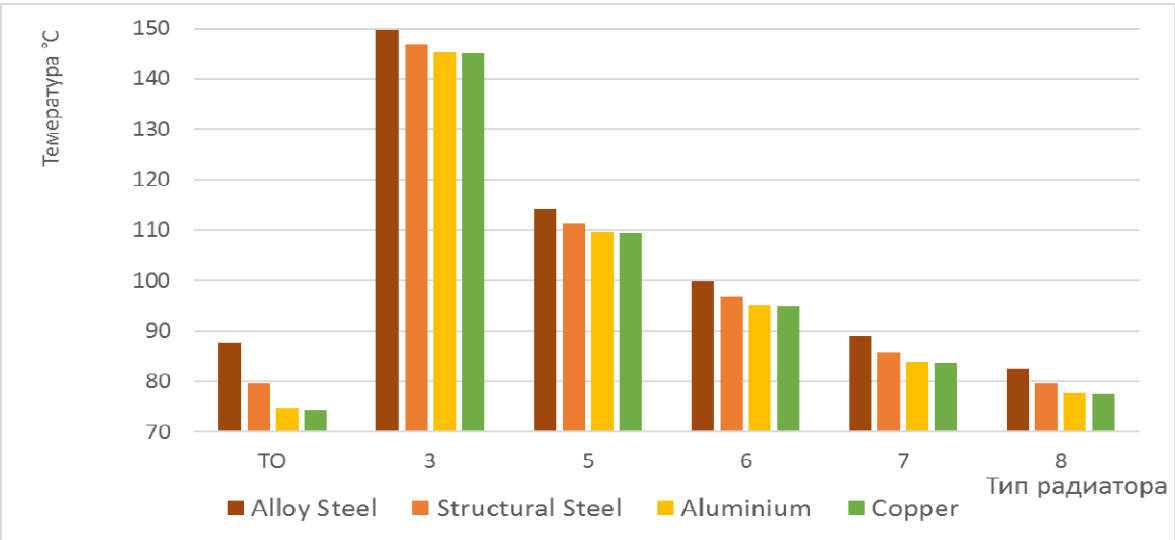


Рис. 5. Зависимость средней температуры от типа радиатора и его материала

Так же, если сравнить ТО-радиатор и радиатор 8 из легированной стали, то более предпочтительным для рассеивания тепла является ребристый радиатор. А если сравнить те же радиаторы из меди, то получаем обратный результат. Так же на рис. 5. видно, что более предпочтительными материалами для производства радиаторов является алюминий, чем медь, легированная и конструкционная стали. Медь является очень дорогим металлом, несмотря на то, что ее теплопроводность сопоставима с алюминием. Сталь, как материал радиатора, не пригодна, так как она не коррозионно-устойчива.

Выводы. Проведенные в работе комплексные экспериментальные исследования показали высокую эффективность применения ТО при создании новых конструкций пассивного охлаждения. Теоретически возможна постановка задачи, более точно описывающая тепловые процессы. При этом эффективность полученных результатов увеличится.

Для радиаторов пассивного охлаждения показано, что при одинаковой массе и площади поверхности эффективность теплоотвода (уменьшение средней температуры образца) по сравнению с традиционными конструкциями увеличивается на 11%.

В связи с этим можно сделать вывод, что снижение материалоемкости и улучшение тепловых режимов функционирования оборудования компенсирует повышенные затраты на изготовление сложной геометрии.

Направления дальнейших исследований – проведение экспериментальных исследований с использованием тепловизионного оборудования, а также рассмотрение расчетной задачи в трехмерной постановке.

Список использованных источников

1. **Santhanakrishnan, M. S.**, Tilford T., Bailey C. Performance assessment of density and level-set topology optimisation methods for three dimensional heat sink design // J. Algorithm. Comput. Technol. – 2018. – V. 12, № 3. – P. 273 – 287.

2. **Dede, E. M.** Multiphysics Topology Optimization of Heat Transfer and Fluid Flow Systems // COMSOL Conference 2009 Boston. Boston, 2009.

3. **Lazarov, B. S.** et al. Experimental validation of additively manufactured optimized shapes for passive cooling // Appl. Energy. Elsevier. – 2018. – V. 226, № April. – P. 330 – 339.

4. **Моделирование** нестационарных тепловых полей электрорадиоэлементов / В. Б. Алмаметов, А. В. Авдеев, А. В. Затылкин и др. // НиКа. – 2010.

5. **Bendsoe, M. P.**, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenisation method // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – V. 71, № 2. – P. 197 – 224.

6. **Koga A. A.** et al. Development of heat sink device by using topology optimization // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd. – 2013. – V. 64. – P. 759 – 772.

7. **Rozvany, G. I. N.**, Zhou M., Birker T. Generalized shape optimization without homogenization // Struct. Optim. – 1992. – V. 4, № 3–4. – P. 250 – 252.

8. **Svanberg K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations // Soc. Ind. Appl. Math. – 2002. – V. 12, № 2. – P. 555 – 573.

9. **Lohan, D. J.**, Dede E. M., Allison J. T. Topology optimization for heat conduction using generative design algorithms // Struct. Multidiscip. Optim. Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2017. – V. 55, № 3. – P. 1063 – 1077.

10. **Dede, E. M.**, Joshi S. N., Zhou F. Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink // J. Mech. Des. – 2015.

11. **Ho, K.** et al. State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM) // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2004. – V. 44, № 12–13. – P. 1247 – 1259.

12. **Abyar Firouzabadi H.**, Parvizian J., Abdullah A. Improving accuracy of curved corners in wire EDM successive cutting // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – V. 76, № 1–4. – P. 447 – 459.

13. **Исламгазина, Л.** Применение различных материалов, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов / Л. Исламгазина // Силовая электроника. – 2005. – V. 5, № 3. – P. 96 – 99.

УДК 532.5.032

Першин В. Ф.[1], Алхило З. А. А.[2], Баранов А. А.[1],
Меметов Н. Р.[1], Туголуков Е. Н.[1]
[1]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89106525377, e-mail: pershin.home@mail.ru),
[2]Куфа университет, Республика Ирак, Эн-Наджаф
(E-mail: zaman.alhilo@uokufa.edu.iq)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОЙ ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ НЕПОДВИЖНЫМ И ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИСКАМИ

Pershin V. F.[1], Alhilo Z. A. A.[2], Baranov A. A.[1],
Memetov N. R.[1], Tugolukov E. N.[1]
[1]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89106525377, e-mail: pershin.home@ mail.ru),
[2]University of Kufa, Iraq, Najaf
(E-mail: zaman.alhilo@uokufa.edu.iq)

SIMULATION OF GRAPHENE-MODIFIED VISCOUS FLUID MOTION IN THE GAP BETWEEN STATIC AND ROTATIONG DISCS

Аннотация. Рассмотрено движение графеносодержащей вязкой жидкости между неподвижным и вращающимся дисками. Составлены исходные дифференциальные уравнения движения элементарного объема жидкости и определены начальные условия. При допущении, что течение в зазоре является течением Куэтта, получено аналитическое решение изменения радиальной и угловой координаты элементарного объема во времени. С использованием математического пакета Maple получены характерные траектории движения элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками при различных расходных характеристиках и геометрии. Рассчитаны скорость, время пребывания и путь, пройденный элементарным объемом, в зависимости от начальной координаты по толщине зазора.

Ключевые слова: вязкая жидкость, графеновые наноструктуры, элементарный объем, траектория.

Abstract. The motion of a graph-containing viscous fluid between the fixed and rotating disks is considered. The initial differential equations of motion for the elementary volume of a liquid are compiled and the initial conditions are determined. Assuming that the current in the gap is the Couette current, we obtain an analytical solution to change the radial and angular coordinates of the elementary volume in time. With the use of the mathematical package Maple, characteristic trajectories of the movement of elementary volumes of fluid in the gap between a fixed and rotating disk with different consumption characteristics and geometry are obtained. Calculated speed, time of stay and the path traveled by an elementary volume, depending on the initial coordinate of the thickness of the gap.

Keywords: viscous liquid, graphene nanostructures, elementary volume, trajectory.

Введение. Начиная с первого механического устройства, смазка была важным элементом для движущихся деталей, используемых в машинах, механических инструментах и транспортных средствах. Основное функциональное назначение смазок – это снижение коэффициента трения между движущимися относительно друг друга поверхностями и уменьшения их износа [1]. Пластичные смазки состоят из жидкой основы (дисперсионной среды), твердого загустителя (дисперсной фазы) и различных добавок или присадок. Для улучшения эксплуатационных свойств в состав смазок вводят присадки различного функционального назначения и твердые добавки. Таким образом, смазки представляют собой сложные многокомпонентные системы, основные свойства которых определяются свойствами дисперсионной среды, дисперсной фазы, присадок и добавок. В качестве дисперсионной среды смазок используют различные смазочные масла и жидкости. Первоначально наноматериалы, в частности графит, применялись только в качестве сухих смазок в очень жестких условиях эксплуатации пар трения. В последние годы многочисленные исследования показали, что возможно управлять размерами, формой и поверхностными свойствами наночастиц, поэтому наночастицы в коллоидных системах открывают большие возможности в регулировании свойств пластичных смазок [2 – 5]. Добавление наночастиц в смазочные масла и пластичные смазки значительно уменьшает межфазное трение и повышает несущую способность деталей, что считается большим потенциалом в качестве смазывающих добавок [6 – 8]. На наш взгляд, при создании пластичных и экологически безопасных смазок весьма перспективными материалами являются такие производные графита, как графен и оксид графена. Данное предположение основано на том, что добавки 0,1% графена в пластичные смазки «Солидол-Ж» и «Литол-24» снижают коэффициент трения скольжения в 1,5–2 раза, уменьшают диаметр пятна износа (уменьшился на 50%), индекс задира (увеличился почти в 2,9 раза), несущая способность увеличилась в 3,8 раза [10, 11]. Одной из основных проблем модифицирования пластичных смазок графеном является равномерное распределение графеновых частиц по всему объему смазки. В данной работе рассматривается вопрос моделирования движения вязкой графеносодержащей жидкости в малом зазоре между неподвижным и вращающимся дисками. Решение данной задачи необходимо для перехода от лабораторных установок к промышленным.

Объект моделирования и постановка задачи. Объектом моделирования является установка для гомогенизации пластичной смазки, модифицированной малослойным или многослойным графеном. Установка состоит из цилиндрического корпуса с плоским днищем, внутри которого соосно расположен диск. Вращение диска осуществляется электроприводом с регулируемой скоростью. В центре днища имеется патрубок, в который под давлением подается пластичная смазка, предварительно смешанная с графеном. Во время обработки смазка проходит в зазоре между днищем (неподвижный диск) и вращающимся диском. Поскольку скорость движения изменяется по высоте зазора практически от нуля, в непосредственной близости к днищу до окружной скорости диска происходит сдвиг одних слоев смазки относительно других и реализуется процесс перераспределения графеновых частиц в смазке или гомогенизация. При проектировании промышленных установок необходимо знать режимные и геометрические параметры, при которых обеспечивается не только заданная производительность, но и требуемое качество смешивания или гомогенизации. Данные параметры можно рассчи-

тать, используя математическую модель процесса смешивания, для которой, прежде всего, необходимо знать параметры движения элементарных объемов в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками.

Постановку задачи моделирования можно сформулировать следующим образом: найти распределение скоростей вязкой жидкости в стационарном режиме в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками как функцию двух координат по радиусу и толщине зазора.

Распределение скоростей позволяет не только перейти к моделированию процесса смешивания графеновых структур с вязкой основой, но и определить геометрические и режимные параметры установки для обеспечения необходимого режима движения.

Математическая модель процесса. На рисунке 1 показана принципиальная схема установки и геометрическая интерпретация движения вязкой жидкости в зазоре между дисками.

Радиальная составляющая скорости из уравнения расхода на радиусе $r(\tau)$:

$$w_{\text{р}} = \frac{V}{2\pi r(\tau)}, \tag{1}$$

где V – объемный расход жидкости.

Касательная составляющая скорости на радиусе $r(\tau)$ в зазоре с координатой x (рис. 1):

$$w_{\text{к}} = \frac{\omega r(\tau) x}{h}. \tag{2}$$

В последнем выражении принято допущение, что касательная составляющая скорости $w_{\text{к}}$ линейно зависит от координаты x по высоте зазора, т.е. проводится аналогия с течением Куэтта.

Модуль результирующей скорости:

$$w = \sqrt{w_{\text{р}}^2 + w_{\text{к}}^2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{V^2}{\pi^2 r^2(\tau) h^2} + \frac{4\omega^2 r^2(\tau) x^2}{h^2}}. \tag{3}$$

Угол α между вектором результирующей скорости и вектором касательной скорости:

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{w_{\text{р}}}{w_{\text{к}}}\right) = \text{arctg}\left(\frac{V}{2\pi r^2(\tau)\omega x}\right). \tag{4}$$

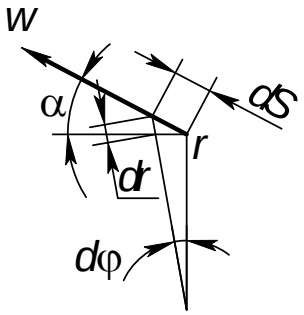


Рис. 1. Схема малых приращений перемещений и углов

Рассматривая малые приращения перемещений *ds* и *dr*, возникающих при движении частицы или микрообъема жидкости в зазоре между вращающимся и неподвижным дисками (рис. 1), можно получить дифференциальное уравнение, описывающее изменение радиальной координаты во времени:

$$ds = wd\tau,$$

$$dr = ds\sin(\alpha),$$

$$\frac{dr(\tau)}{d\tau} = w\sin(\alpha). \tag{5}$$

Подставляя выражения для w и α из уравнений (3) и (4) в дифференциальное уравнение (5), после преобразований и упрощений, с учетом того, что $\sin(\mathrm{arctg}(\arg)) = \frac{\arg}{\sqrt{1+\arg^2}}$, принимает вид

$$\frac{dr(\tau)}{d\tau} = \frac{V}{2\pi r(\tau)h}. \tag{6}$$

Использование начального условия $r(0) = r_0$ позволяет получить решение дифференциального уравнения, отвечающее приросту радиальной координаты $r(\tau)$ в виде

$$r(\tau) = \frac{\sqrt{\pi h(V\tau + r_0^2\pi h)}}{\pi h}. \tag{7}$$

Аналогично по рис. 2, в малых приращениях, с учетом $d\varphi = \sin(d\varphi) = \mathrm{tg}(d\varphi)$ можно получить: $d\varphi = \frac{ds\cos(\alpha)}{r} = \frac{wd\tau\cos(\alpha)}{r}$, или

$$\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{w\cos(\alpha)}{r(\tau)}. \tag{8}$$

Подставляя выражения для w и α из уравнений (3) и (4) в дифференциальное уравнение (8), с учетом того, что $\cos(\mathrm{arctg}(\arg)) = \frac{1}{\sqrt{1+\arg^2}}$, после преобразований и упрощений можно получить

$$\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{\omega x}{h}. \tag{9}$$

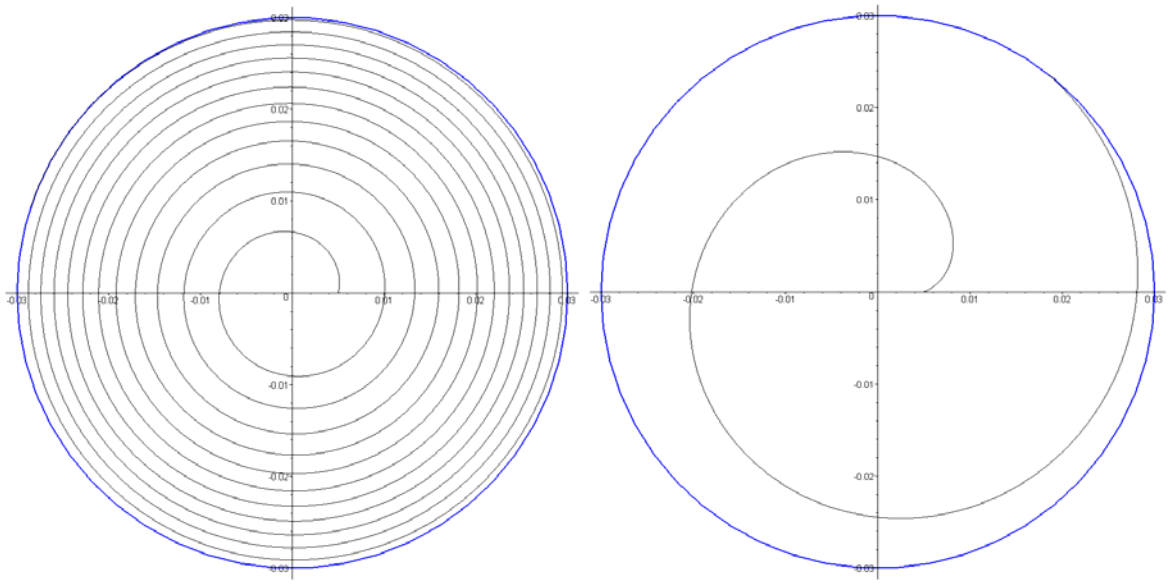
Использование начального условия $\varphi(0) = \varphi_0$, позволяет получить решение дифференциального уравнения, отвечающее изменению во времени угла $\varphi(\tau)$ в виде

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \frac{\omega x\tau}{h}. \tag{10}$$

С использованием решений (7) и (9) легко получить характерные траектории движения частиц и микрообъемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками при различных расходных характеристиках и геометрии. Кроме этого, можно

рассчитать время пребывания частицы в зазоре и путь, пройденный частицей между дисками. С использованием математического пакета Maple получены характерные траектории движения элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками при различных расходных характеристиках и геометрии. Рассчитаны скорость, время пребывания и путь, пройденный элементарным объемом, в зависимости от начальной координаты по толщине зазора.

Результаты расчета и обсуждение. На рисунке 2 представлены характерные траектории движения элементарного объема жидкости, находящиеся на разных расстояниях от неподвижного диска.



а) *б*)

Рис. 2. Траектории движения элементарного объема жидкости между дисками

Траектория, представленная на рис. 3, *а*, рассчитана при следующих параметрах: $V = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ м^3/с; $\omega = 52{,}36$ рад/с (500 об/мин); $R = 0{,}3$ м; $r_0 = 0{,}005$ м; $\varphi_0 = 0$ рад; $h = 0{,}0001$ м; $x = 0{,}00005$ м. При расчете траектории, показанной на рис. 3, *б*, был изменен один параметр, $x = 0{,}000005$ м. Длина траектории, показанной на рис. 3, *а*, равна 1,473 м, а на рис. 3, *б* – 0,52 м, при одинаковом времени пребывания между дисками, равном 2,748 с.

Разница в формах и длинах представленных траекторий подтверждает наличие сдвиговых явлений по высоте зазора. Именно сдвиг одного элементарного объема относительно другого обеспечивает перераспределение графеновых структур по объему вязкой жидкости. Экспериментальные исследования на лабораторной установке с диаметром диска 60 мм при скоростях его вращения от 300 до 1500 об/мин показали удовлетворительную сходимость между расчетными и опытными значениями.

Выводы. Разработана математическая модель движения графеносодержащей вязкой жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками. С использованием математического пакета Maple получены характерные траектории движения элементарных объемов жидкости в зазоре между неподвижным и вращающимся дисками при различных расходных характеристиках и геометрии. Рассчитаны скорость, время пре-

бывания и путь, пройденный элементарным объемом, в зависимости от начальной координаты по толщине зазора. Переход от математической модели к компьютерной позволяет имитировать изменения вязкости жидкости, поступающей в зазор между дисками, которые вызваны изменениями концентраций графита в исходной суспензии. Поскольку указанные изменения носят вероятностный характер, аналитическое решение невозможно. Использование компьютерной модели позволяет имитировать эти изменения.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки в приоритетных областях научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (*Государственный договор* № 14.577.21.0253, 2017, «*Уникальный идентификатор прикладных научных исследований*» *RFMEFI57717X0253*).

Список использованных источников

1. **Abdullah, S. F.** Study on nanoparticles as an additive in lubricant towards sustainability of energy in industrial engineering // J. Energy Environ. – 2009. – № 1. – P. 34 – 37.
2. **Buongiorno, J.**, Venerus, D. C., Prabhat, N., McKrell, T., Townsend, J., Christianson, R., Tolmachev, Y. V., Keblinski, P., Hu, L., Alvarado, J. L., et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. J. Appl. Phys. – 2009, 106.
3. **Chen, Y.**, Zhang, Y.,, Zhang, S., Yu, L., Zhang, P., Zhang, Z. Preparation of nickel-based nanolubricants via a facile in situ one-step route and investigation of their tribological properties. Tribol. Lett. – 2013. – № 51,. – P. 73 – 83.
4. **Ji, X.**, Chen, Y., Zhao, G., Wang, X., Liu, W. Tribological properties of $CaCO_3$ nanoparticles as an additive in lithium grease. Tribol. Lett. – 2011. – № 41. – P. 113 – 119.
5. **Friedman, H.**, Eidelman, O., Feldman, Y., Moshkovich, A., Perfiliev, V., Rapoport, L., Cohen, H., Yoffe, A., Tenne, R. Fabrication of self-lubricating cobalt coatings on metal surfaces.Nanotechnology. – 2007, 18.
6. **Falvo, M. R.**, Taylor, R. M., II, Helser, A., Chi, V., Brooks, F. P., Jr., Washburn, S., Superfine, R. Nanometre-scale rolling and sliding of carbon nanotubes. Nature. – 1999. – № 397. – P. 236 – 238.
7. **Akbulut, M.**, Belman, N., Golan, Y., Israelachvili, J. Frictional properties of confined nanorods.Adv. Mater. – 2006. – № 18. – P. 2589 – 2592.
8. **Peng, D. X.**, Kang, Y., Hwang, R. M., Shyr, S. S., Chang, Y. P. Tribological properties of diamond and SiO_2 nanoparticles added in paraffin. Tribol. Int. – 2009. – № 42. – P. 911 – 917.
9. **Sawyer W. G.**, Argibay N., Burris D. L., Krick B. A. Mechanistic studies in friction and wear of bulk materials // Ann. Rev. Mater. Res. – 2014. – V. 44. – P. 395 – 427.
10. **Al-Saadi D. A. Y.**, Pershin V. F., Salimov B. N., Montaev S. A. Modification of graphite greases graphene nanostructures // J. Friction Wear. – 2017. – V. 38. – P. 418 – 422.
11. **Pershin, V. F.**, Ovchinnikov K. A., Alhilo Z. A., Stolyarov R. A., and Memetov N. R. Development of Environmentally Safe Lubricants Modified by Grapheme // Nanotechnologies in Russia. – 2018. – V. 13, № 5–6. – P. 340 – 344.

УДК 66.081.6

Киселев К. И.[1], Шестаков К. В.[2], Хорохорина И. В.[2], Абоносимов О. А.[2], Лазарев С. И.[2]
[1]Университет Питтсбурга, США, г. Питтсбург
(Тел. +1(412)6244317, e-mail: kiselyov@pitt.edu),
[2]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630370, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССАХ НА ОСНОВЕ ФРИКЦИОННОЙ ТЕОРИИ

Kiselyov K. I.[1], Shestakov K. V.[2], Khorokhorina I. V.[2], Abonosimov O. A.[2], Lazarev S. I.[2]
[1]University of Pittsburg, USA, Pittsburg
(Tel. +1(412)6244317, e-mail: kiselyov@pitt.edu),
[2]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630370, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

MODELING OF TRANSPORT PHENOMENA OF SUBSTANCES IN ELECTROCHEMICAL MEMBRANE PROCESSES ON THE BASIS OF THE FRICTION THEORY

Аннотация. Разработана и представлена усовершенствованная математическая модель для расчета переноса веществ в электрохимических мембранных процессах, основанная на фрикционной модели Шпиглера. Данная модель отличаетсяот представленных в научной литературе тем, что учитывает совокупное влияние давления и электрического поля на процесс переноса частиц растворенного вещества и растворителя и позволяет рассчитать фрикционные коэффициенты взаимодействия анионов, катионов, растворителя и стенок пор мембран между собой. Рассчитанные фрикционные коэффициенты могут использоваться при теоретических расчетах и прогнозировании изменения с течением времени кинетических параметров в процессах баромембранного, электромембранного и электробаромембранного разделения промышленных растворов в различных областях промышленности.

Ключевые слова: математическое моделирование, фрикционная модель, мембрана, перенос ионов, фрикционные коэффициенты.

Abstract. An improved mathematical model for calculating the transfer of substances in electrochemical membrane processes based on the Spiegler friction model is developed and presented. This model differs from those presented in the scientific literature in that it takes into account the combined effect of pressure and electric field on the transfer of particles of the solute and solvent and allows to calculating the friction coefficients of the interaction of anions, cations, and solvent and membrane pore walls among themselves. Calculated friction coefficients can be used in the theoretical calculations and the prediction of change over time of the kinetic parameters of baromembrane, electromembrane and electrobaromembrane separation processes of industrial solutions in various industries.

Keywords: mathematical modeling, friction model, membrane, ions transfer, friction coefficients.

В настоящее время существуют различные математические модели, описывающие механизм массопереноса в мембранах, но все они имеют свои ограничения и допущения. К тому же некоторые модели не всегда могут полностью отразить физику электробаромембранного процесса [1 – 5].

В данной работе для описания транспорта через пористые мембраны будет рассмотрен подход, основанный на фрикционной модели, или, другими словами, модели внутреннего трения [6]. Однако данный подход будет использован уже применительно к электробаромембранному разделению, а не отдельно к баромембранным или электрохимическим процессам, как это имеет место в литературе [5, 7 – 11].

Фрикционная модель базируется на аналогии между движением частиц (ионов, молекул) в сплошной среде и движением тел в вязкой жидкости и была впервые использована для мембран Шпиглером [12, 13]. Его подходы были развиты другими исследователями в работах [14 – 18]. Теория, на которой основана фрикционная модель, формально эквивалентна неравновесной термодинамике в смысле идентичности получающихся уравнений переноса.

К преимуществам фрикционной модели следует отнести более слабую зависимость фрикционных кинетических коэффициентов от концентрации электролита, их четкий физический смысл и независимость от выбранной системы отсчета.

Итак, согласно фрикционной модели [7, 8, 12, 13], все компоненты системы перемещаются относительно друг друга под действием некоторых внешних сил F_i и испытывают взаимное трение. В результате в системе происходит образование внутренних фрикционных сил F_{ij}:

$$F_{ij} = -\overline{c_i} f_{ij}\left(\upsilon_i - \upsilon_j\right), \tag{1}$$

где F_{ij} – сила фрикционного взаимодействия между частицами i и j в единице объема, Н/м^3; $\overline{c_i}$– концентрация частиц i в 1 единице объема системы, моль/м^3; f_{ij} – коэффициент трения, Н·с·моль$^{-1}$·м$^{-1}$; υ_i и υ_j – абсолютные скорости движения частиц i и j, м/с.

Второй аспект теории фрикционной модели заключается в том, что частицы всегда движутся со стационарно постоянной скоростью, и в системе наблюдается баланс приложенной извне внешней силы и сил трения, которые возникают из-за фрикционного взаимодействия частиц i со всеми другими частицами в единице объема системы:

$$\overline{c_i} F_i + \sum F_{ij} = 0, \tag{2}$$

где F_i – движущая сила (электрохимический потенциал) к 1 молю частиц i, Н/моль.

В рассматриваемом случае разделения в отличие от представленного в работе [19] взаимодействие происходит между анионами, катионами растворенного вещества, частицами растворителя и стенками мембраны. Для обозначения видов сил фрикционного взаимодействия (рис. 1) между всеми частицами ведем индексы +, –, ω, m для катионов, анионов, растворителя (воды) и мембраны соответственно.

Перед описанием математической модели примем следующие допущения:

– каждая среднестатистическая частица испытывает действие одних и тех же внешних сил, а поэтому единичный объем не должен включать в себя элементы различных фаз;

– скорость электродных реакций намного выше скорости массопереноса;

– поток жидкости стационарен;

– режим течения жидкости ламинарный с Re < 2300;

– плотность тока существенно ниже критической (i = 1000 А/м^2);

– насос-дозатор обеспечивает беспрерывную подачу разделяемого раствора в межмембранный канал;

– силы трения между трения между катионами и анионами ничтожно малы, что ими можно пренебречь.

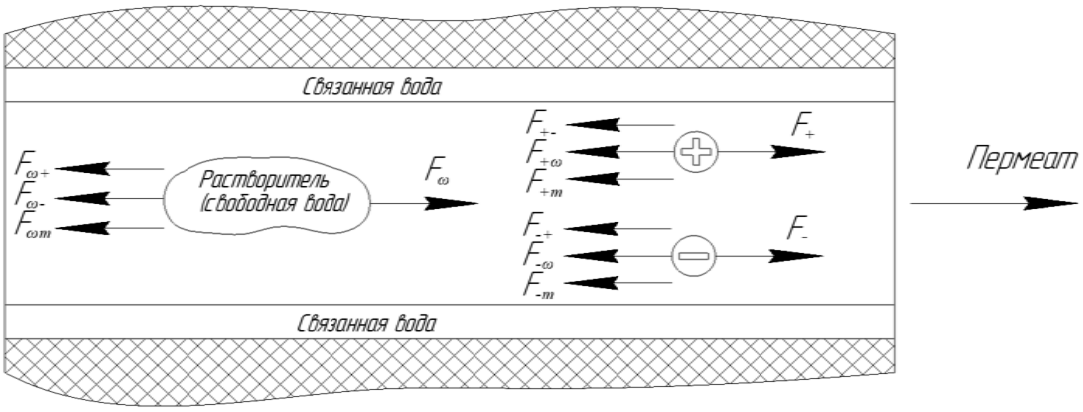


Рис. 1. Схематичное изображение всех сил фрикционного взаимодействия внутри поры мембраны

Принимая во внимание неподвижность стенок пор ($\upsilon_m = 0$) и уравнение (2), можно получить систему уравнений, описывающих силы фрикционного взаимодействия:

$$\begin{cases} \bar{c}_+ F_+ + F_{+-} + F_{+\omega} + F_{+m} = 0, \\ \bar{c}_- F_- + F_{-+} + F_{-\omega} + F_{-m} = 0, \\ \bar{c}_\omega F_\omega + F_{\omega+} + F_{\omega-} + F_{\omega m} = 0, \\ \bar{c}_m F_m + F_{m+} + F_{m-} + F_{m\omega} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Далее необходимо уточнить движущие силы, входящие в электрохимический потенциал. При электрогиперфильтрационном процессе перенос растворенного вещества складывается из диффузионного, электродиффузионного и конвективного потоков. Перенос же растворителя включает конвективный, электроосмотический и осмотический потоки [20 – 23]. Учитывая это, можно выразить движущие силы через электрохимический потенциал для растворенного вещества и растворителя.

Для растворенного вещества:

$$F_+ = -\frac{d\mu_+}{dx} = -c_+ \upsilon_+ K - D\frac{dc_+}{dx} L - z_+ F \frac{d\varphi}{dx} M, \quad (4)$$

$$F_- = -\frac{d\mu_-}{dx} = -c_- \upsilon_- K - D\frac{dc_-}{dx} L - z_- F \frac{d\varphi}{dx} M, \quad (5)$$

где c_+ и c_-– концентрации катионов и анионов в растворе соответственно, моль/м^3; υ_+ и υ_-– средние скорости катионов и анионов в растворе соответственно, м/с; K – поправочный коэффициент, Н·м^2·с/моль^2; D – коэффициент диффузии, м^2/с; L – поправочный коэффициент, Н·м·с/моль^2; z_+ и z_- – валентность катионов и анионов

соответственно; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; φ – электрический потенциал, В; M – поправочный коэффициент, м$^{-1}$.

Для растворителя:

$$F_\omega = -\frac{d\mu_\omega}{dx} = -c_\omega \upsilon_\omega K - z_\omega F \frac{d\varphi}{dx} M - V_\omega \frac{dp}{dx} N, \tag{6}$$

где c_ω – концентрация растворителя, моль/м^3; υ_ω – средняя скорость частиц растворителя, м/с; z_ω – валентность частиц растворителя; V_ω – мольный объем растворителя, м^3/моль; p – давление, Па; N – поправочный коэффициент, м$^{-1}$.

Учитывая допущение, согласно которому силы трения между катионами и анионами ничтожно малы, и что ими можно пренебречь, введем индекс s для обозначения суммарных для анионов и катионов сил трения, движущей силы и концентрации. Далее упрощаем систему уравнений (3) к виду

$$\begin{cases} \bar{c}_s F_s + F_{s\omega} + F_{sm} = 0, \\ \bar{c}_\omega F_\omega + F_{\omega s} + F_{\omega m} = 0, \\ \bar{c}_m F_m + F_{ms} + F_{m\omega} = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Принимая во внимание уравнение (1) и систему уравнений (7), а также учитывая неподвижное состояние мембраны ($\upsilon_m = 0$), и вследствие чего $F_{im} = -f_{im} c_i \upsilon_i = -f_{im} J_i$, получим

$$\begin{cases} \bar{c}_s F_s - \bar{c}_s f_{s\omega}(\upsilon_s - \upsilon_\omega) - f_{sm} J_s = 0, \\ \bar{c}_\omega F_\omega - \bar{c}_\omega f_{\omega s}(\upsilon_\omega - \upsilon_s) - f_{\omega m} J_\omega = 0, \\ \bar{c}_m f_{ms} \upsilon_s + \bar{c}_m f_{m\omega} \upsilon_\omega = 0, \end{cases} \tag{8}$$

где J_s и J_ω – плотность потока растворенного вещества и растворителя соответственно, моль/м^2·с

$$\begin{cases} \bar{c}_s \left(-c_s \upsilon_s - RT \frac{dc_s}{dx} - z_s F \frac{d\varphi}{dx}\right) - f_{s\omega}(\upsilon_s - \upsilon_\omega) - f_{sm} \frac{J_s}{c_s} = 0, \\ \bar{c}_\omega \left(-c_\omega \upsilon_\omega - z_\omega F \frac{d\varphi}{dx} - V_\omega \frac{dp}{dx}\right) - f_{\omega s}(\upsilon_\omega - \upsilon_s) - f_{\omega m} \frac{J_\omega}{c_\omega} = 0, \\ f_{ms} \upsilon_s + f_{m\omega} \upsilon_\omega = 0. \end{cases} \tag{9}$$

Далее из системы уравнений (9) с помощью уравнений (4) – (6), выражения $F_{ij} + F_{ji} = 0$ и выводящегося из него равенства перекрестных фрикционных коэффициентов $f_{ij} = f_{ji}$ выразим фрикционные коэффициенты взаимодействия систем «растворитель–мембрана» $f_{\omega m}$, «растворенное вещество–мембрана» f_{sm}, «растворенное вещество–растворитель» $f_{s\omega}$:

$$f_{\omega m} = \frac{\bar{c}_\omega \left(-c_\omega \upsilon_\omega K - z_\omega F \frac{d\varphi}{dx} M - V_\omega \frac{dp}{dx} N\right)}{J_\omega},$$

$$f_{sm} = \frac{\bar{c}_s \left(-c_s \upsilon_s K - D \frac{dc_s}{dx} L - z_s F \frac{d\varphi}{dx} M\right)}{J_s},$$

$$f_{s\omega} = \frac{\bar{c}_s \left(-c_s \upsilon_s K - D \frac{dc_s}{dx} L - z_s F \frac{d\varphi}{dx} M\right) + \frac{\bar{c}_\omega \upsilon_\omega \left(-c_\omega \upsilon_\omega K - z_\omega F \frac{d\varphi}{dx} M - V_\omega \frac{dp}{dx} N\right)}{J_\omega \upsilon_s} J_s}{\bar{c}_\omega (\upsilon_s - \upsilon_\omega)}.$$

Величину фрикционных взаимодействий катионов и анионов с мембраной или растворителем найдем с помощью выражения

$$f_{si} = q_{+}f_{si} + q_{-}f_{si},$$

где q_{+} и q_{-} – коэффициенты, равные отношению молярной массы иона к молярной массе недиссоциированной молекулы соответствующего вещества, т.е. $q_{+} + q_{-} = 1$, $q_{+}\ f_{si}$ – фрикционный коэффициент взаимодействия катионов с веществом i, Н·с·моль$^{-1}$·м$^{-1}$; $q_{-}f_{si}$ – фрикционный коэффициент взаимодействия анионов с веществом i, Н·с·моль$^{-1}$·м$^{-1}$.

Таким образом фрикционные коэффициенты для катионов и анионов, описывающие их взаимодействие со стенками мембраны и растворителем, будут выглядеть следующим образом:

$$f_{+m} = q_{+}f_{sm},$$
$$f_{-m} = q_{-}f_{sm},$$
$$f_{+\omega} = q_{+}f_{s\omega},$$
$$f_{-\omega} = q_{-}f_{s\omega}.$$

Граничные условия выбраны следующие:

$$\begin{cases} \Delta p(0) = p_{\text{н}}, & \Delta p(L) = p_{\text{к}}, \\ \Delta c(0) = c_{\text{н}}, & \Delta c(L) = c_{\text{к}}, \\ \Delta\varphi(0) = \varphi_{\text{н}}, & \Delta\varphi(L) = \varphi_{\text{к}}. \end{cases}$$

Рассчитанные фрикционные коэффициенты могут использоваться при теоретических расчетах и прогнозировании изменения с течением времени кинетических параметров в процессах баромембранного, электромембранного и электробаромембранного разделения промышленных растворов в различных областях промышленности.

Список использованных источников

1. **Горбатюк, В. И.** Гидродинамика мембранных процессов при ламинарном режиме течения / В. И. Горбатюк, В. М. Старов // Химия и технология воды. – 1983. – Т. 5, № 1. – С. 8 – 12.

2. **Computer** simulation of membrane separation processes / R. E. Lebrun, C. R. Bouchard, A. L. Rollin, T. Matsuura, S. Sourirajan // Chemical Engineering Science. – 1989. – V. 44, № 2. – P. 313 – 320.

3. **Evangelista, T.** Improved graphical – analitical method for the design of reverse osmosis plants // Industrial &Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1986. – V. 25, № 2. – P. 366 – 375.

4. **Заболоцкий, В. И.** Перенос ионов электролита и диссоциация воды в анионообменных мембранах при интенсивных токовых режимах / В. И. Заболоцкий, В. В. Бугаков, М. В. Шарафан // Электрохимия. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 721 – 731.

5. **Mulder, M.** Basic Principles of Membrane Technology. – Springer Netherlands, 1996. – 564 p.

6. **Sélégny, E.** Polyelectrolytes: Papers Initiated by a NATO Advanced Study Institute on Charged and Reactive Polymers held in France, June 1972. – USA, 1974. – 535 p.

7. **Meares, P.** The fluxes of sodium and chloride ions across a cation-exchange resin membrane. 3. The application of irreversible thermodynamics // Transactions of the Faraday Society. – 1959. – V. 55, № 11. – P. 1970 – 1974.

8. **Заболоцкий, В. И.** Перенос ионов в мембранах / В. И. Заболоцкий, В. В. Никоненко. – М. : Наука, 1996. – 392 с.

9. **Multiscale** modeling of electroosmotic flow: Effects of discrete ion, enhanced viscosity, and surface friction / R. Bhadauria and N. R. Aluru // The Journal of Chemical Physics. – 2017. – V. 146, № 18.

10. **Influence** of coupling on thermal forces and dynamic friction in plasmas with multiple ion species / G. Kagan, S. D. Baalrud and J. Daligault // Physics of Plasmas. – 2017. – V. 24.

11. **Mathematical** models of ion transport through cell membrane channels / J. Miękisz, J. Gomułkiewicz, S. Miękisz // Mathematica applicanda. – 2014. – V. 42, № 1. – P. 39 – 62.

12. **Spiegler, K. S.** Transport processes in ionic membranes // Transactions of the Faraday Society. – V. 54, № 9. – P. 1408 – 1428.

13. **Spiegler, K. S.** On the energetics of membranes processes // Membranes phenomena and processes. Wroclaw. – 1986. – P. 209 – 222.

14. **Thermodynamics** of flow processes in biological systems / A. Katchalsky, O. Kedem // Biophysical Journal. – 1962. – V. 2, № 2. – P. 53 – 78.

15. **The electrical** conductivity and electro-osmosis permeability of a cation-exchange membranes / D. Mackay, P. Meares // Transactions of the Faraday Society. – 1959. – № 7. – P. 1221 – 1238.

16. **Transport** phenomena in ion-exchange mem-branes / G. B.Wills, E. N. Lightfoot // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1966. – V. 5, № 1. – P. 114 – 120.

17. **Transport** across ion-exchange resin membranes: the frictional model of transport / P. Meares, J. F. Thain, D. G. Dawson // Membranes. – 1972. – V. 1. – P. 55 – 124.

18. **Transport** equation for a membrane based on a friction model / S. Tanimura, S.-I. Nakao, S. Kimura // Journal of MembraneScience. – 1993. – V. 84. – P. 79 – 91.

19. **Ключников, А. И.** Научные основы интенсификации процессов микро- и ультрафильтрации технологических жидкостей пищевых производств: дис. д-ра техн. наук / А. И. Ключников. – ВГУИТ. – Воронеж, 2016. – 414 с.

20. **Берд, Р.** Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюард, Е. Лайтфут. – М. : Химия, 1974. – 688 с.

21. **Кестинг, Р. Е.** Синтетические полимерные мембраны / Р. Е. Кестинг. – М. : Химия, 1991. – 336 с.

22. **Чалых, А. Е.** Диффузия в полимерных системах / А. Е. Чалых. – М. : Химия, 1987. – 312 с.

23. **Николаев, Н. И.** Диффузия в мембранах / Н. И. Николаев. – М. : Химия, 1980. – 232 с.

References

1. **Gidrodinamika** membrannykh protsessov pri laminarnom rezhime techeniya / V. I. Gorbatyuk, V. M. Starov // Khimiya i tekhnologiya vody. – 1983. – V. 5, № 1. – P. 8 – 12.

2. **Computer** simulation of membrane separation processes / R. E. Lebrun, C. R. Bouchard, A. L. Rollin, T. Matsuura, S. Sourirajan // Chemical Engineering Science. – 1989. – V. 44, № 2. – P. 313 – 320.

3. **Evangelista, T.** Improved graphical – analitical method for the design of reverse osmosis plants // Industrial &Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1986. – V. 25, № 2. – P. 366 – 375.

4. **Perenos** ionov elektrolita i dissotsiatsiya vody v anionoobmennykh membranakh pri intensivnykh tokovykh rezhimakh / V. I. Zabolotskii, V. V. Bugakov, M. V. Sharafan // Elektrokhimiya. – 2012. – V. 48, № 6. – P. 721 – 731.

5. **Mulder, M.** Basic Principles of Membrane Technology / Springer Netherlands, 1996. – 564 p.

6. **Sélégny, E.** Polyelectrolytes: Papers Initiated by a NATO Advanced Study Institute on Charged and Reactive Polymers held in France, June 1972. – USA, 1974. – 535 p.

7. **Meares, P.** The fluxes of sodium and chloride ions across a cation-exchange resin membrane. 3. The application of irreversible thermodynamics // Transactions of the Faraday Society. – 1959. – V. 55, № 11. – P. 1970 – 1974.

8. **Zabolotskii, V. I.** Ions transfer in membranes / V. I. Zabolotskii, V. V. Nikonenko. – Moscow, 1996. – 392 p.

9. **Multiscale** modeling of electroosmotic flow: Effects of discrete ion, enhanced viscosity, and surface friction / R. Bhadauria and N. R. Aluru // The Journal of Chemical Physics. – 2017. – V. 146, № 18.

10. **Influence** of coupling on thermal forces and dynamic friction in plasmas with multiple ion species / G. Kagan, S. D. Baalrud, and J. Daligault // Physics of Plasmas. – 2017. – V. 24.

11. **Mathematical** models of ion transport through cell membrane channels / J. Miękisz, J. Gomułkiewicz, S. Miękisz // Mathematica applicanda. – 2014. – V. 42, № 1. – P. 39 – 62.

12. **Spiegler, K. S.** Transport processes in ionic membranes // Transactions of the Faraday Society. – V. 54, № 9. – P. 1408 – 1428.

13. **Spiegler K. S.** On the energetics of membranes processes // Membranes phenomena and processes. Wroclaw. – 1986. – P. 209 – 222.

14. **Thermodynamics** of flow processes in biological systems / A. Katchalsky, O. Kedem // Biophysical Journal. – 1962. – V. 2, № 2. – P. 53 – 78.

15. **The electrical** conductivity and electro-osmosis permeability of a cation-exchange membranes / D. Mackay, P. Meares // Transactions of the Faraday Society. – 1959. – № 7. – P. 1221 – 1238.

16. **Transport** phenomena in ion-exchange mem-branes / G. B.Wills, E. N. Lightfoot // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1966. – V. 5, № 1. – P. 114 – 120.

17. **Transport** across ion-exchange resin membranes: the frictional model of transport / P. Meares, J. F. Thain, D. G. Dawson // Membranes. – 1972. – V. 1. – P. 55 – 124.

18. **Transport** equation for a membrane based on a friction model / S. Tanimura, S.-I. Nakao, S. Kimura // Journal of MembraneScience. – 1993. – V. 84. – P. 79 – 91.

19. **Klyuchnikov, A. I.** Nauchnye osnovy intensifikatsii protsessov mikro- iul'trafil'tratsii tekhnologicheskikh zhidkostei pishchevykh proizvodstv : dis. d-ra tekhn. nauk. VGUIT. – Voronezh, 2016. – 414 p.

20. **Berd, R.** Transfer phenomena / R. Berd, V. St'yuard, E. Laitfut. – Moscow, 1974. – 688 p.

21. **Kesting, R. E.** Synthetic polymeric membranes. – Moscow, 1991. – 336 p.

22. **Chalykh, A. E.** Diffusion in polymeric systems. – Moscow, 1987. – 312 p.

23. **Nikolaev, H. I.** Diffusion in membranes. – Moscow, 1980. – 232 s.

УДК 616.31

Хамраева А. М.
Международный медицинский университет
(e-mail: otdel-nauky@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ МИКРОБИОЦЕНОЗА РОТОВОЙ ПОЛОСТИ У ПАЦИЕНТОВ В СТОМАТОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Khamraeva A. M.
International Medical University
(e-mail: otdel-nauky@yandex.ru)

MODELING OF THE ASSESSMENT OF THE ORAL CAVITY MICROBIOCENOSIS IN PATIENTS IN DENTAL PRACTICE

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование оценки микробиоценоза полости рта для повышения эффективности стоматологического лечения. Автором проведен сравнительный анализ моделей и механизмов микробиоценоза, предложены пути повышения эффективности рассматриваемого вопроса.

Ключевые слова: стоматология, ротовая полость, лечение, микробиоценоз, моделирование, здоровье.

Abstract. The article describes the modeling of the evaluation of oral cavity microbiocenosis to improve the effectiveness of dental treatment. The author conducted a comparative analysis of the models and mechanisms of microbiocenosis, suggested ways to improve the effectiveness of the issue under consideration.

Keywords: dentistry, oral cavity, treatment, microbiocenosis, modeling, health.

Для оценки микробиоценоза ротовой полости у пациентов, пользующихся зубными пластиночными протезами, ввели понятие микробное число (МЧ) и дефицит микробного числа (ДМЧ). Способ расчета которых сводится к следующему.

Методика расчета МЧ: Показатель МЧ служит для оценки нарушения баланса между отдельными представителями микробиоценоза ротовой полости, сопровождающихся избыточным ее колонизацией условно-патогенными и сапрофитными микроорганизмами, появлением не свойственных данному биотопу микробных видов.

Всю микрофлору слизистой оболочки ротовой полости условно разделили на три группы: А – резидентная и транзиторная сапрофитная [12], В – транзиторная и условно-патогенная [10], С – патогенная и условно-патогенная, не свойственная для ротовой полости [6].

МЧ представляли как сумму микроорганизмов ротовой полости МЧ = А + В + С.

Микроорганизмам, принадлежащим к группе А, присваивали коэффициент 1, в группу В – 2, в группу С – 3. Значение коэффициента является тем большим, чем менее типичным для нормобиоценоза ротовой полости является микроорганизм. Соответственно, отсутствие представителей одной из групп обозначают как ноль (0). Тогда выражение формулы изменится: МЧ = А + В + 0; или А + 0 + 0; 0 + В + С; А + 0 + С. Для нормального биоценоза полости рта МЧ должно составлять МЧ = А + В.

К группе А принадлежали наиболее типичные резидентные и преходящие сапрофитные для ротовой полости микроорганизмы, виды и количество которых в нормомикробиоценозе установлено по результатам наших исследований и данным научно-медицинской литературы у здоровых пациентов [7, 11], без дефектов зубных рядов и любых ортопедических конструкций. На основе этого были отобраны 8 групп микроорганизмов для представления компонентов члена А формулы МЧ, которые выражали как десятичный логарифм колониеобразующих единиц (lg КОЕ) и литерами *a*, *b*, *c*, *d*, *f*, *j*, *h*, *k*: *a* – α – streptoccocus lg КОЕ = 5, *b* – Staphyloccocus coa- hly- lg КОЕ = 3; c – Stomatococcus lg КОЕ = 4; *d* – Neisseria lg КОЕ = 4; *f* – Corynebaterium lg КОЕ = 3; *j* – Micrococcus lg КОЕ = 3; *h* – Bacillus lg КОЕ = 3; *k* – Streptoccocus hly- lg КОЕ = 3.

Предложена следующая запись составляющей А МЧ: $A = (1 \times a + 1 \times b + 1 \times c + 1 \times d + 1 \times f + 1 \times j + 1 \times h + 1 \times k) / n$, где *n* – число диагностированных видов резидентных микроорганизмов группы А (от 1 до 8).

При расчетах составляющей МЧ – А, коэффициент 1 перемножался на 1, если количество микроорганизмов отвечало указанным выше значениям или была меньше. В случае выявления микроорганизмов в большем количестве, коэффициент 1 перемножался на 1; 2; +3; и т.д., в зависимости от того, насколько реальное значение lg КОЕ преобладало над уровнем, установленным для нормоценоза. Например, если реальное значение lgКУО для Stomatococcus (*c*) составило 6 (а не 4, как в случае контрольного значения), тогда в формуле составляющую $1 \times c$ записывали 1×2, а если $c = 3{,}5$, тогда 1×1. Аналогично рассчитывали соответствующие значения для других микроорганизмов группы А, получали их сумму, делили на количество выявленных видов (от 1 до 8).

Подобным образом проводили расчеты для групп В и С. В таких случаях менялся коэффициент группы и принятых во внимание видов микроорганизмов. В группе В (транзиторная условно-патогенная микрофлора) расчеты проводили для следующих важнейших микроорганизмов: *a* – Staphyloccocus COA hly + lg КОЕ = 3; *b* – β streptococcus lg КОЕ = 0; c – St. aureus lg КОЕ = 0; *d* – Candida lg КОЕ = 0.

Коэффициент группы В равной 2. Таким образом, составляющая В МЧ выглядела: $B = (2 \times a + 2 \times b + 2 \times c + 2 \times d) / n$, где *n* – число диагностированных видов условно-патогенных микроорганизмов группы В (от 1 до 4).

Среди патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, не свойственных для нормального микробиоценоза ротовой полости, составляющих группу С, выделяли следующие виды: *a* – Escherichia coli lg КОЕ = 0; *b* – другие представители Enterobactericere lg КОЕ = 0; *c* – Ps. aeruginosa lg КОЕ = 0; *d* – неферментирующие грамотрицательные палочки lg КОЕ = 0.

Коэффициент группы равен 3. Таким образом, составляющая С – МЧ будет иметь вид: $C = (3 \times a + 3 \times b + 3 \times c + 3 \times d) / n$, где *n* – число диагностированных видов патогенных микроорганизмов группы С (от 1 до 4).

Методика расчета ДМЧ: Показатель ДМЧ служит для диагностики дисбиотических изменений, сопровождающихся снижением уровня колонизации слизистой оболочки ротовой полости представителями ее резидентной нормофлоры.

Расчеты ДМЧ проводили только с учетом представителей резидентной микрофлоры (группы А). Приводились виды микроорганизмов и уровень колонизации ими слизистой оболочки ротовой полости, установленные по результатам собственных исследований и данными научно-медицинской литературы у здоровых пациентов,

без дефектов зубных рядов и любых ортопедических конструкций и составлялись контрольные показатели [2, 5]. Учитывали основных представителей микрофлоры СОПБ: *a* – streptoccocus lg КОЕ = 5; *b* – Staphyloccocus hly – lg КОЕ = 3; *c* – Stomatococcus lg КОЕ = 4; *d* – Neisseria lg КОЕ = 4.

Значение дефицита микроорганизмов каждой группы рассчитывали следующим образом: $\Delta a = a - a$, где a – реальное значение lg КОЕ, $a_к$ – контрольное значение. При расчете показателя ДМЧ отсутствие любого из этих резидентных микроорганизмов обозначали указанным числом с отрицательным значением (Δa, Δb, Δc, Δd). Так, например, если не диагностировано Neisseria (*d*), то обозначали ее дефицит $\Delta d = 4$. В случае выявления микроорганизмов в количестве меньшем контрольного значения, вычисляли соответствующую разницу между lg КОЕ.

Например, если у пациента выявлено, что lg КОЕ Neisseria = 1, то ДМЧ числа будет $\Delta d = (1 - 4 = 3)$. Другие вычисления осуществляли по принципу расчета МЧ.

ДМЧ = $(\Delta a + \Delta b + \Delta c + \Delta d) / n$, где Δa, Δb, Δc, Δd или отрицательные числа, или равны 0, а n – количество видов резидентной группы А, по которой устанавливали дефицит, всегда равно 4. Тогда максимально возможный ДМЧ будет составлять ДМЧ = (–5 : –3 : –4 + –4) / 4 = 4, а минимально – 0.

Приводим пример вычисления МЧ и ДМЧ у пациента К, который в течение двух лет пользовался зубным протезом. Диагностировано следующее состояние микрофлоры ротовой полости : Stomatococcus 104, lg К УО = 4; St. aureus 5 × 103, lg КОЕ 5 × 103 = 4; Candida 103, lg КОЕ 103 = 3.

Stomatococcus относится к группе А, St. aureus и Candida к группе В. Микроорганизмы из группы С не выявлены. Таким образом, МЧ = А + В. А = (1 × 1) / 1 = 1. В = (2 × 4 + 2 × 3) / 2 = 7, МЧ = 1 + 7 = 8. ДМЧ у данного пациента вычисляли следующим образом. Поскольку имеется всего один микроорганизм из группы А – Stomatococcus со значением уровня колонизации lg КОЕ = 4, то его дефицит 0. Дефицит по другим группам резидентных микроорганизмов соответственно составил –5 (α – streptoccocus) – 3 (Staphyloccocus hly) – 4 (Neisseria). ДМЧ = (–5 + –3 + 0 + –4) / 4 = –3.

Предложенный способ позволил осуществить комплексную оценку состояния микробиоценоза слизистой оболочки ротовой полости на основе интегральных показателей МЧ и ДМЧ, характеризующие видовой спектр микрофлоры и уровень колонизации слизистой оболочки, а также объективизировать нарушения микробиоценоза, связанные как с появлением не свойственных для нормального состояния слизистой оболочки микроорганизмов, так и с дефицитом резидентной микрофлоры.

В целях определения критериев оценки дисбаланса микрофлоры ротовой полости у пациентов без стоматологической и соматической патологии и имеющих разный уровень гигиены на основе интегральных показателей МЧ и ДМЧ был обследован 221 пациент. Было получено 303 мазка из базиса съемного протеза, с поверхности слизистой оболочки и с жевательной поверхности.

Таким образом, от одного человека получили от двух до четырех мазков: из слизистой оболочки верхней и нижней челюсти, внутренней поверхности, в зависимости от того, сколько съемных протезов находится в ротовой полости. Забор материала для микробиологического исследования проводили у пациентов во время активного пользования зубных протезов. У пациентов, не имевших стоматологической и соматической патологии (контрольная группа – 57), получили 114 мазков – по два мазка от каждого обследованного.

Забор материала проводили с применением адгезивных стерильных биополимерных пленок «Диплен Дента» без лекарственных компонентов фирмы «Норд-Ост» (Россия). Поскольку во время проведения изучались показатели статистической обработки, достоверной разницы между показателями мазков базиса и слизистой оболочки не обнаружено, то для предоставления информации использовали средние значения из всех полученных [4, 8].

Для оценки микробиоценоза слизистой оболочки использовали указанный выше способ расчета МЧ и ДМЧ. Уровень дисбактериоза у пациентов, пользовавшихся зубными протезами, определяли, пользуясь современными классификациями [1, 9], что имеет три степени тяжести, для которых типично: I степень – снижение количества резидентной микрофлоры; II степень – изменение состава резидентной и условно-патогенной микрофлоры; III степень – значительное увеличение посева грибов Candida spp., энтеробактерий, фузобактерий.

На основе доверительных интервалов МЧ и ДМЧ рекомендовали устанавливать наличие и степень тяжести дисбактериоза ротовой полости. Интервалами нормы МЧ и ДМЧ (на примере взрослых пациентов без стоматологической и соматической патологии) следует считать следующие значения: МЧ: (0,69…1,71) ДМЧ: (–1,27…–2,76).

Список использованных источников

1. **Брусенцова, А. Е.** Иммунологический статус пульпы зуба и его изменение при острых и хронических формах пульпита / А. Е. Брусенцова, И. Н. Перетягина, Д. С. Тишков // Вестник новых медицинских технологий. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 67 – 71.

2. **Нестероидные** противовоспалительные препараты в стоматологии: особенности назначения пациентам с сопутствующими заболеваниями почек / И. В. Голобородова, Н. С. Сметнева, Ю. Л. Васильев, А. В. Погосян // Медицинский алфавит. – 2017. – Т. 3, № 24(321). – С. 20 – 22.

3. **Возможности** компьютерной навигации при первичном тотальном эндопротезировании коленного сустава / Г. М. Кавалерский, В. Ю. Мурылев, Я. А. Рукин и др. // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. – 2012. – № 4. – С. 27 – 31.

4. **Эндопротезирование** коленного сустава с применением индивидуальных направителей, созданных с помощью технологий 3D-печати / Н. Н. Карякин, Е. Е. Малышев, Р. О. Горбатов, Д. К. Ротич // Травматология и ортопедия России. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 110 – 118.

5. **Киселева, Е. А.** Сравнительная характеристика иммунных факторных моделей хронического воспаления и неоплазии слизистой оболочки полости рта / Е. А. Киселева // Цитокины и воспаление. – 2011. – Т. 10, № 3. – С. 40 – 44.

6. **Конев, В. П.** Взаимоотношение органического матрикса и минерального компонента в костях и эмали зубов при дисплазии соединительной ткани / В. П. Конев, И. Л. Шестель, А. С. Коршунов // Сибирский медицинский журнал. – 2011. – Т. 26, № 3–2. – С. 77 – 80.

7. **Пат. на изобретение** RUS 2564128 22.09.2014. Способ качественного определения адаптационной способности к бюгельным конструкциям ортопедических протезов по содержанию биомаркеров в ротовой жидкости пациента с новообразованиями челюстно-лицевой области / Кочурова Е. В., Николенко В. Н.

8. **Перова, М. Д.** Исходы хирургического лечения пародонтита с применением остеозамещающих имплантационных материалов / М. Д. Перова // Новое в стоматологии. – 1999. – № 2. – С. 36 – 43.

9. **Расулов, И. М.** Особенности нормализации окклюзии у пациентов при ортопедическом лечении дефектов твердых тканей зубов с учетом особенностей их строения / И. М. Расулов, М. М. Расулов // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2011. – № 2. – С. 68 – 72.

10. **Особенности** регионарного метастазирования плоскоклеточного рака полости рта, выявляемого при профилактических лимфодиссекциях / И. С. Романов, Л. П. Яковлева, Д. Б. Удинцов и др. // Стоматология. – 2012. – Т. 91, № 6. – С. 52 – 54.

11. **Утюж, А.** Ортопедические конструкции из сплавов титана при непереносимости традиционных зубных протезов / А. Утюж, А. Юмашев, М. Михайлова // Врач. – 2016. – № 7. – С. 62 – 64.

12. **Чибисова, М. А.** Новые возможности цифровой и пленочной рентгенографии в дифференциальной диагностике заболеваний пародонта с использованием радиовизиографической программы «trophy» / М. А. Чибисова, Е. В. Гольдштейн // Институт стоматологии. – 2004. – № 1. – С. 134.

References

1. **Brusencova, A. E.**, Peretyagina I. N., Tishkov D. S. Immunologicheskij status pul'py zuba i ego izmenenie pri ostryh i hronicheskih formah pul'pita // Vestnik novyh medicinskih tekhnologij. – 2016. – T. 23, № 2. – S. 67 – 71.

2. **Goloborodova, I. V.**, Smetneva N. S., Vasil'ev Yu. L., Pogosyan A. V. Nesteroidnye protivovospalitel'nye preparaty v stomatologii: osobennosti naznacheniya pacientam s soputstvuyushchimi zabolevaniyami pochek // Medicinskij alfavit. – 2017. – T. 3, № 24(321). – S. 20 – 22.

3. **Kavalerskij, G. M.**, Murylev V. Yu., Rukin Ya. A., Lychagin A. V., Elizarov P. M. Vozmozhnosti komp'yuternoj navigacii pri pervichnom total'nom ehndoprotezi-rovanii kolennogo sustava // Vestnik travmatologii i ortopedii im. N. N. Priorova. – 2012. – № 4. – S. 27 – 31.

4. **Karyakin, N. N.**, Malyshev E. E., Gorbatov R. O., Rotich D. K. Endoprotezirovanie kolennogo sustava s primeneniem individual'nyh napravitelej, sozdannyh s pomoshch'yu tekhnologij 3Dpechati // Travmatologiya i ortopediya Rossii. – 2017. – T. 23, № 3. – S. 110-118.

5. **Kiseleva, E. A.** Sravnitel'naya harakteristika immunnyh faktornyh modelej hronicheskogo vospaleniya i neoplazii slizistoj obolochki polostirta // Citokiny i vospalenie. – 2011. – T. 10, № 3. – S. 40 – 44.

6. **Konev, V. P.**, SHestel' I. L., Korshunov A. S., Moskovskij S. N., Kopylova Yu. Yu., Losev A. S., Davletkil'deev N. A. Vzaimootnoshenie organicheskogo matriksa i mineral'nogo komponenta v kostyah i ehmali zubov pri displazii soedinitel'noj tkani // Sibirskij medicinskij zhurnal (g. Tomsk). – 2011. – T. 26, № 3–2. – S. 77 – 80.

7. **Kochurova, E. V.**, Nikolenko V. N. Sposob kachestvennogo opredeleniya adaptacionnoj sposobnosti k byugel'nym konstrukciyam ortopedicheskih protezov po soder-zhaniyu biomarkerov v rotovoj zhidkosti pacienta s novoobrazovaniyami chelyustno-licevoj oblasti // Patent na izobretenie RUS 2564128 22.09.2014.

8. **Perova, M. D.** Iskhody hirurgicheskogo lecheniya parodontita s primeneniem osteozameshchayushchih implantacionnyh materialov // Novoe v stomatologii. – 1999. – № 2. – S. 36 – 43.

9. **Rasulov, I. M.**, Rasulov M. M. Osobennosti normalizacii okklyuzii u pacientov pri ortopedicheskom lechenii defektov tverdyh tkanej zubov s uchetom osobennostej ih stroeniya // Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki. – 2011. – № 2. – S. 68 – 72.

10. **Romanov, I. S.**, Yakovleva L. P., Udincov D. B., Dzhumaev M. G., Ciklauri V. T. Osobennosti regionarnogo metastazirovaniya ploskokletochnogo raka polosti rta, vyyavlyaemogo pri profilakticheskih limfodissekciyah // Stomatologiya. – 2012. – T. 91, № 6. – S. 52 – 54.

11. **Utyuzh, A.**, Yumashev A., Mihajlova M. Ortopedicheskie konstrukcii iz splavov titana pri neperenosimosti tradicionnyh zubnyh protezov // Vrach. – 2016. – № 7. – S. 62 – 64.

12. **Chibisova, M. A.**, Gol'dshtejn E. V. Novye vozmozhnosti cifrovoj i plenochnoj rentgenografii v differencial'noj diagnostike zabolevanij parodonta s ispol'zovaniem radioviziograficheskoj programmy “trophy” // Institut stomatologii. – 2004. – № 1. – S. 134.

УДК 536.2

Рогов И. В., Майникова Н. Ф.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630448, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

ЗАДАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В МЕТОДЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАГРЕВА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Rogov I. V., Mainikova N. F.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630448, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

SETTING HEAT IMPACT IN THE METHOD PERIODIC HEATING FOR NON-DESTRUCTIVE DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES

Аннотация. Рассматривается метод периодического нагрева для неразрушающего определения теплофизических свойств твердых неметаллических материалов.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловое воздействие, неразрушающий контроль, теплофизические свойства.

Abstract. The method of periodic heating for non-destructive determination of thermophysical properties of solid non-metallic materials is considered.

Keywords: mathematical modeling, thermal effects, non-destructive testing, thermal properties.

Метод периодического нагрева позволяет исследовать широкий класс явлений, проявляющихся в особенностях тепловых свойств веществ [1].

В данной работе рассматривается метод периодического нагрева для неразрушающего определения теплофизических свойств твердых неметаллических материалов. О применении периодического нагрева в контактных методах неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов изложено в работах [1 – 3].

Моделирование теплопереноса в системе двух тел при гармоническом тепловом воздействии детально представлено в работах [4, 5].

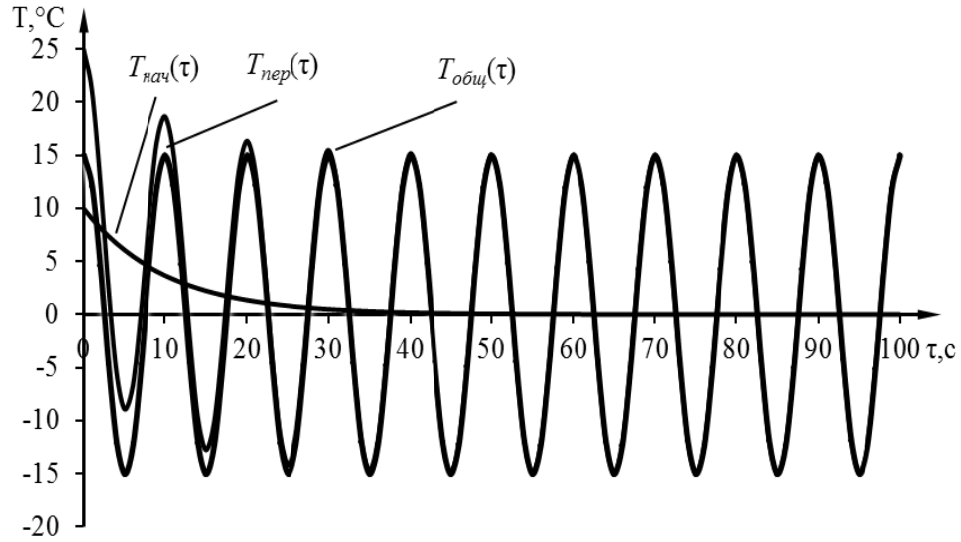
В данной работе рассмотрены два варианта задания теплового воздействия в методах неразрушающего контроля. Рассматривается тепловое воздействие, подчиняющееся гармоническим законам изменения плотности теплового потока:

– *первый случай* – тепловой поток содержит только периодическую составляющую;

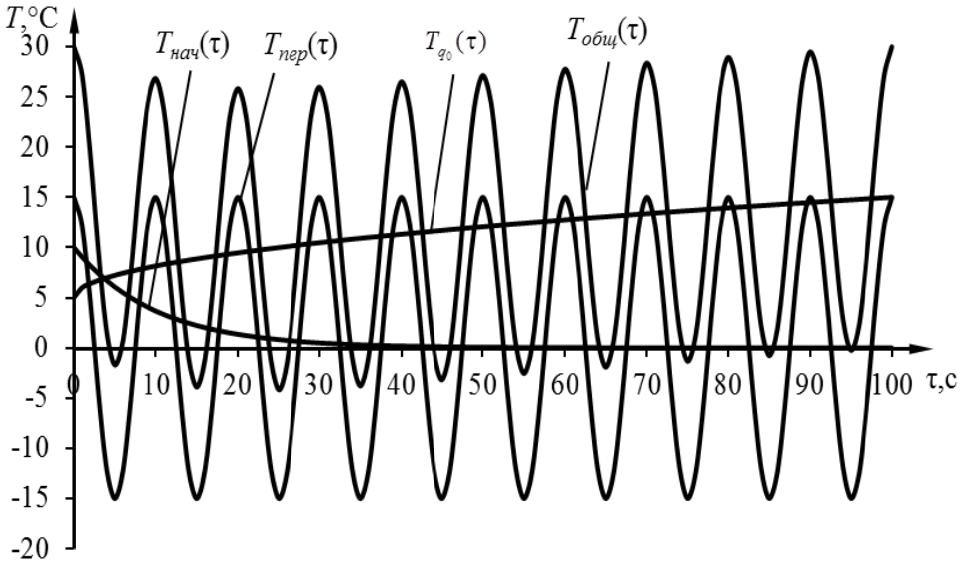
– *второй случай* – тепловой поток содержит периодическую и постоянную составляющие.

Первый случай. В системе, состоящей из ограниченного и неограниченного тел, на поверхность ограниченного тела действует тепловой источник, плотность теплового потока которого изменяется по гармоническому закону (рис. 1, *а*)

$$q = q_m \cos(\omega\tau).$$



а)



б)

Рис. 1. Изменение температуры во времени для первого (*а*) и для второго (*б*) случаев задания теплового воздействия

Значения температуры в любой точке объекта исследования

$$T_{\text{общ}}(\tau) = T_{\text{пер}}(\tau) + T_{\text{нач}}(\tau). \tag{1}$$

Здесь $T_{\text{пер}}(\tau) = T_A \cos(\omega\tau + \varphi)$ – периодическая составляющая; $T_{\text{нач}}$ (τ) – монотонная функция, стремящаяся к нулю, зависящая от начальных условий.

Рассмотрим определенный интеграл за один период изменения $T_{\text{общ}}$:

$$\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{общ}}(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{пер}}(\tau) + \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau), \tag{2}$$

здесь $\tau_{\text{пер}}$ – период гармонических колебаний.

Значение интеграла $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{пер}}(\tau)$ будет равно нулю, так как $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_A \cos(\omega\tau+\varphi)=0$. Значение интеграла $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau)$ будет стремиться к нулю при $\tau \to \infty$, так как с течением времени влияние начального распределения температуры перестает проявляться.

В реальном эксперименте значения температуры T_i измеряются через заданный промежуток времени $\Delta\tau$.

Значение интеграла $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{общ}}(\tau)$ рассчитываем численным способом по методу трапеций. Площадь под участком кривой за период:

$$S_{\text{общ}} = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau) \approx \sum_{i=j}^{j+k} \Delta\tau \frac{T_{i+1}+T_i}{2}. \quad (3)$$

Здесь $j = 1, ..., n - k$; n – число полученных экспериментально значений температуры; k – число экспериментальных значений температуры в периоде.

При $S_{\text{общ}} = 0$ начальное распределение температуры перестает влиять на изменение температурного поля, т.е. система выходит на квазистационарный режим.

Второй случай. Для создания гармонического теплового воздействия в конструкции измерительного зонда при проектировании измерительной системы предлагается использовать элемент Пельтье, который позволяет проводить эксперименты при значениях температуры, которые выше или ниже температуры термостатирования. В этом случае, кроме периодической составляющей, будет присутствовать постоянная составляющая теплового потока (рис. 1, *б*).

Зависимость плотности теплового потока от времени:

$$q = q_0 + q_m \cos(\omega\tau).$$

Изменение температуры:

$$T_{\text{общ}}(\tau) = T_{\text{пер}}(\tau) + T_{\text{нач}}(\tau) + T_{q_0}(\tau). \quad (4)$$

Здесь $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_A \cos(\omega\tau+\varphi)=0$ – периодическая составляющая; $T_{\text{нач}}(\tau)$ – монотонная, стремящаяся к нулю функция, зависящая от начальных условий; $T_{q_0}(\tau)$ – монотонно изменяющаяся функция, зависящая от начального теплового потока q_0. Функция $T_{q_0}(\tau)$ монотонно возрастает при $q_0 > 0$ и монотонно убывает при $q_0 < 0$.

Рассмотрим определенный интеграл:

$$\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{общ}}(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{пер}}(\tau) + \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau) + \int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{q_0}(\tau), \quad (5)$$

где $\tau_{\text{пер}}$ – период гармонических колебаний.

Значение интеграла $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{пер}}(\tau)$ будет равно нулю, так как $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_A \cos(\omega\tau+\varphi)=0$. Значение интеграла $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau)$ будет стремиться к нулю при $\tau \to \infty$. Значение $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{нач}}(\tau)$ будет монотонно изменяться с течением времени, уменьшаясь или увеличиваясь в зависимости от знака q_0.

В соответствии с теоремой о среднем, если функция $f(\tau)$ непрерывна на отрезке [c; d], то на этом отрезке найдется хотя бы одна точка m, для которой справедливо равенство

$$\int_c^d f(\tau)\,dx = f(m)(d-c). \tag{6}$$

Если изменение монотонно возрастающей или убывающей функции на отрезке [c; d] незначительно, то $m \approx (c+d)/2$ (для нашего случая условием выполнения равенства будет $\Delta T_{q_0} << T_A$, где ΔT_{q_0} – изменение T_{q_0} за период $\tau_{\text{пер}}$).

В соответствии с уравнением (6) получим

$$T_{q_0}\left(\tau+\frac{\tau_{\text{пер}}}{2}\right)=\frac{1}{\tau_{\text{пер}}}\int_{\tau}^{\tau_{\text{пер}}} T_{q_0}(\tau)d\tau. \tag{7}$$

В реальном эксперименте значения температуры измеряются через заданный промежуток времени $\Delta\tau$. Интеграл $\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{общ}}(\tau)$ рассчитываем численным способом по методу трапеций:

$$\int_{\tau}^{\tau+\tau_{\text{пер}}} T_{\text{общ}}(\tau) \approx \sum_{i=j}^{j+k} \Delta\tau \frac{T_{i+1}+T_i}{2}, \tag{8}$$

где $j = l, ..., n-k$, n – число экспериментальных значений температуры, k – число экспериментальных значений температуры в периоде, l – номер точки, с которой начинается квазистационарная стадия и выполняется условие $\Delta T_{q_0} << T_A$.

Уравнение (7) примет вид

$$T_{q_0}\left(\tau+\frac{\tau_{\text{пер}}}{2}\right)=\frac{1}{\tau_{\text{пер}}}\sum_{i=j}^{j+k} \Delta\tau \frac{T_{i+1}+T_i}{2}. \tag{9}$$

Для выделения периодической составляющей из $T_{\text{общ}}(\tau)$ вычитаем $T_{q_0}(\tau)$.

На начальном участке (до значения τ_l):

– не выполняется условие $\Delta T_{q_0} << T_A$;

– влияние начального распределения температуры существенно.

Процедура нахождения квазистационарной стадии аналогична процедуре, рассмотренной в первом случае.

Таким образом, алгоритм определения периодической составляющей состоит из:

– построения зависимости $T_{q_0}(\tau)$ в соответствии с выражением (9);

– вычитания из $T_{\text{общ}}(\tau)$ зависимости $T_{q_0}(\tau)$;

– определения начала квазистационарной стадии по условию $S_{\text{общ}} = 0$.

Список использованных источников

1. **Теоретические** и практические основы теплофизических измерений / под. ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТ, 2008. – 408 с.

2. **Жуков, Н. П.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий: монография / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

3. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

4. **Моделирование** теплопереноса в системе двух тел при гармоническом тепловом воздействии / И. В. Рогов, Н. Ф. Майникова, С. В. Молодов, О. Н. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 360 – 364.

5. **Рожков, А. В.** Моделирование тепловых процессов в системе: измерительный зонд – образец / А. В. Рожков, И. В. Рогов, Н. Ф. Майникова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – Т. 1. – С. 174 – 179.

References

1. **Teoreticheskie** i prakticheskie osnovy teplofizicheskih izmerenij / Pod red. S. V. Ponomareva. – M. : Fizmat, 2008. – 408 s.

2. **Zhukov, N. P.** Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushego kontrolya teplofizicheskih svojstv tverdyh materialov i izdelij: monografiya / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova. – M. : Mashinostroenie-1, 2004. – 288 s.

3. **Lykov, A. V.** Teoriya teploprovodnosti / A. V. Lykov. – M. : Vysshaya shkola, 1967. – 599 s.

4. **Modelirovanie** teploperenosa v sisteme dvuh tel pri garmonicheskom-teplovom vozdejstvii / I. V. Rogov, N. F. Mainikova, V. Molodov, O. N. Popov // Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. – 2011. – T.17, № 2. – C. 360 – 364.

5. **Modelirovanie** teplovyh processov v sisteme izmeritelnyj zond obrazec / A. V. Rozhkov, I. V.Rogov, N. F. Mainikova // V sbornike “Virtualnoe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn”. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – 2016, T. 1. – S. 174 –179.

УДК 004.946

Бочарова А. Н., Черемисин А. П., Архипов А. Е.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89108590777, e-mail: dewelial676@gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Botcharowa A. N., Cheremisin A. P., Arkhipov A. E.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89108590777, e-mail: dewelial676@gmail.com)

MODELING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR VIRTUAL REALITY

Аннотация. В данной статье рассматривается задача разработки объемно-планировочного решения компоновки оборудования при производстве красителей. Для ее решения необходимо перераспределить оборудование из одноэтажного цеха в двухэтажный, с сохранением технологического процесса. Рассмотрены основные этапы моделирования технологического оборудования в виртуальной реальности с использованием программного обеспечения Model Studio CS, достоинства и недостатки выбранного подхода, проведено сравнение с аналогами.

Ключевые слова: трассировка, компоновка оборудования, виртуальное моделирование, химическая промышленность, AUTOCAD, Model Studio CS.

Abstract. This article discusses the task of developing a space-planning solution for arranging equipment in the production of dyes. To solve it, it is necessary to redistribute the equipment from a one-story shop to a two-story one, while maintaining the technological process. The main stages of the simulation of technological equipment in virtual reality using the software Model Studio CS, the advantages and disadvantages of the chosen approach are considered, a comparison with analogues is made.

Keywords: tracing, equipment layout, virtual modeling, chemical industry, AUTOCAD, Model Studio CS.

В процессе управления современным предприятием зачастую возникает необходимость переоборудовать производственное помещение для оптимизации размещения оборудования. Для реализации перепланировки помещения недостаточно иметь технологическую схему оборудования, необходимо визуализировать новый план размещения с учетом конструкционных особенностей аппаратов [1 – 4].

В данной статье рассматривается задача разработки объемно-планировочного решения компоновки оборудования при производстве красителей. Для решения необходимо перераспределить оборудование из одноэтажного цеха (рис. 1) в двухэтажный с сохранением технологического процесса и преобладанием транспортировки веществ самотеком [5]. Исходя из существующих технических ограничений, было выбрано программное обеспечение, которое обеспечивало выполнение поставленной задачи – AUTOCAD и приложение Model Studio CS, позволяющее проводить автоматическую трассировку оборудования, редактировать трубопроводы, добавлять арматуру и создавать оборудование с помощью базы данных стандартного оборудования [8 – 10].

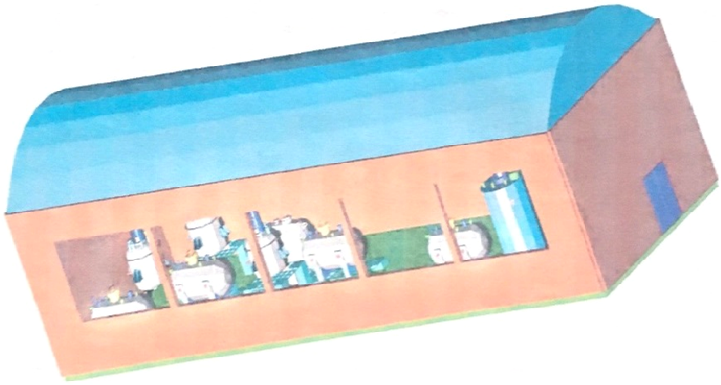


Рис. 1. Одноэтажный цех

Первый этап в перепланировке цеха – возведение строительной двухэтажной конструкции (рис. 2.). Для удобства обслуживания и выгрузки оборудования цех разбит на квадраты 6×6 м. Опоры и плиты взяты из базы данных стандартного оборудования.

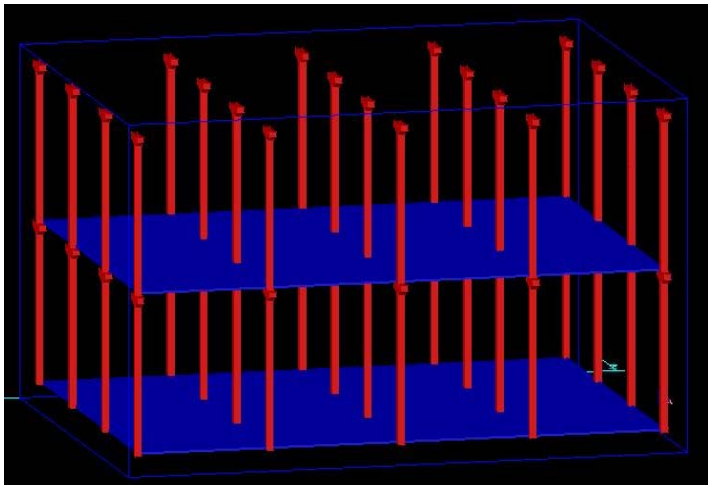


Рис. 2. Строительная конструкция

Второй этап – создание виртуальных моделей емкостей и аппаратов (рис. 3). Для виртуальной визуализации цеха выбраны приближенные значения размеров реальных устройств [5, 6].

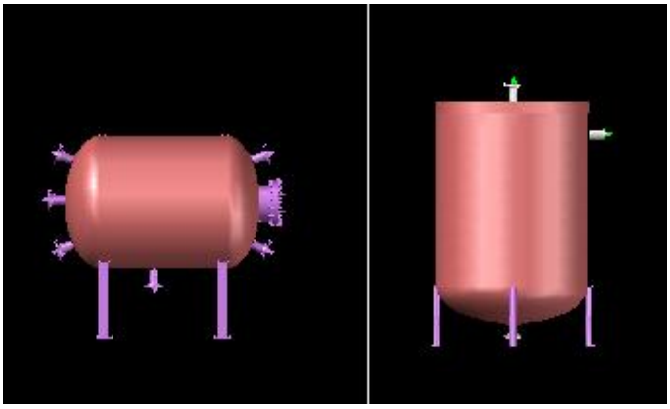


Рис. 3. Виртуальная модель емкости и аппарата

Третий этап – поиск наиболее дешевого расположения оборудования и трассировки. Для решения этой задачи использовалось программное обеспечение «Кобра-2». Полученные результаты планировки размещения оборудования (рис. 4) применились в виртуальном цехе [7].

Четвертый этап – автоматическая трассировка трубопроводов (рис. 5).

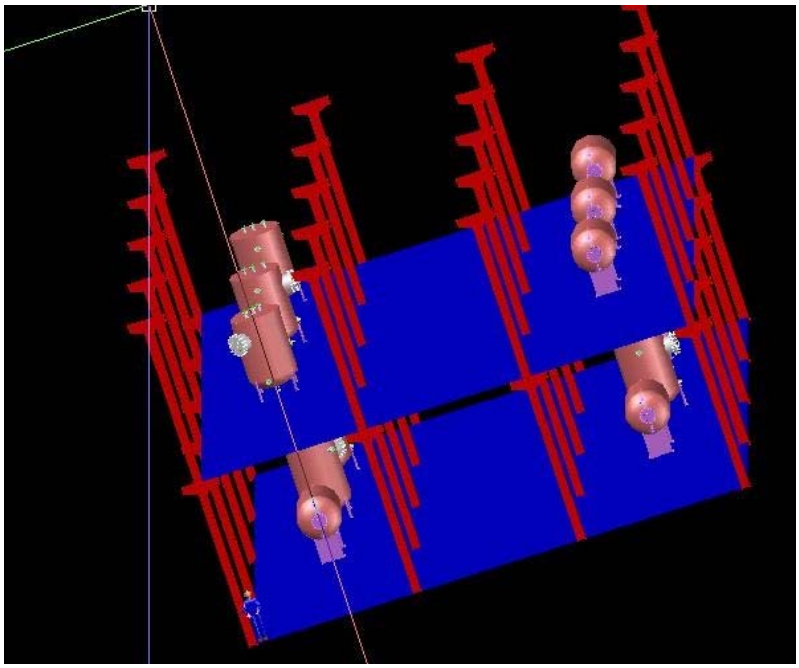


Рис. 4. Размещение оборудования

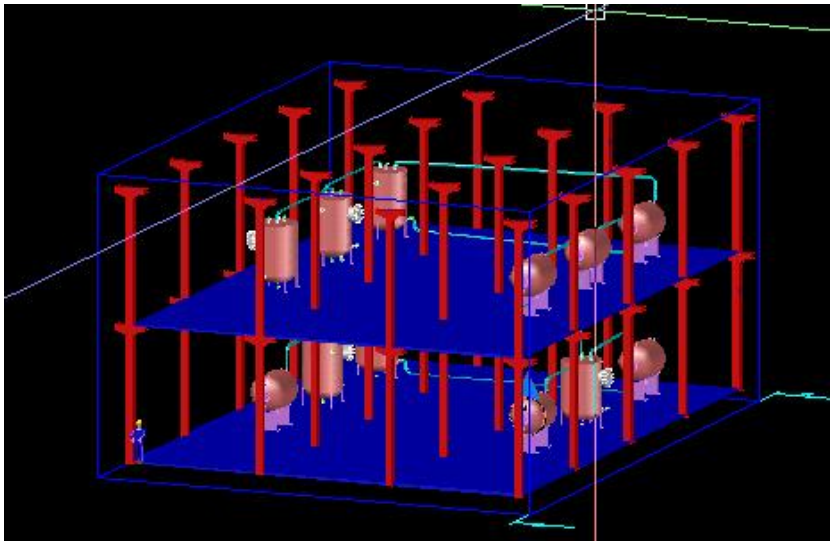


Рис. 5. Результат автоматической трассировки трубопроводов

В процессе выполнения задания столкнулись с некоторыми недостатками программного обеспечения: сложность в освоении интерфейса, некорректное исполнение автоматической трассировки трубопровода, арматуры и обвязки, некорректная постановка автоматических размеров. Усложнил работу медленный интерфейс на ранней версии AUTOCAD 2010 [3 – 7].

Таким образом, была успешно решена задача виртуального моделирования компоновки оборудования при производстве красителей, перечислены достоинства и недостатки используемого программного обеспечения Model Studio CS.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Dedov, D. L.** Design and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Разработка** адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327. – № 2. – P. 022075.

4. **Автоматизированная** информационная система обучения персонала промышленных предприятий на основе виртуальных тренажерных комплексов / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов, А. А. Руднев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 86 – 94.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Разработка** программного и методического обеспечения виртуального тренажерного комплекса / Д. Л. Дедов, М. Н. Краснянский, А. А. Руднев, М. В. Ионов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2. – С. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Т. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – Т. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, et al. // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

References

1. **Dedov, D. L.** Design and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – T. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Krasnyanskij, M. N.** Razrabotka adaptivnyh trenazhernyh sistem professional'nogo naznacheniya dlya modelirovaniya processa rasprostraneniya pozharov / M. N. Krasnyanskij, D. L. Dedov, A. D. Obuhov, A. E. Arhipov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2017. – № 3(65). – S. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 327. – № 2. – P. 022075.

4. **Krasnyanskij, M. N.** Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema obucheniya personala promyshlennyh predpriyatij na osnove virtual'nyh trenazhernyh kompleksov / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. A. Rudnev //Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2013. – № 11. – S. 86 – 94.

5. **Krasnyanskij, M. N.** Obuchenie operatorov neftekhimicheskih proizvodstv s primeneniem komp'yuternyh / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. – 2011. – № 11. – S. 50 – 56.

6. **Dedov, D. L.** Razrabotka programmnogo i metodicheskogo obespecheniya virtual'nogo trenazhernogo kompleksa / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskij, A. A. Rudnev, M. V. Ionov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2013. – № 2. – S. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – T. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, et al. // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

УДК 620.178.3

Морозов Н. А., Гаврилов А. А., Коваль С. Ю.,
Захаров И. С., Галкин А. А.
Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург
(Тел. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТРЕСНУВШЕЙ ПРОФИЛЬНОЙ ТРУБЫ

Morozov N. A., Gavrilov A. A., Koval S. Yu.,
Zakharov I. S., Galkin A. A.
Orenburg State University, Russia, Orenburg
(Tel. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru),

SIMULATION OF VIBRATIONS OF A CRACKED SHAPED TUBE

Аннотация. В данном исследовании рассмотрено моделирование собственных колебаний профильной трубы, имеющей трещину. Моделирование производилось в системе Autodesk Inventor. Сравнивались частоты первых четырех форм собственных колебаний трубы без трещины с частотами этих же форм колебаний треснувшей трубы. Получены зависимости величины падения частот от положения трещины.

Ключевые слова: моделирование, профильная труба, трещина, частота, форма колебаний.

Abstract. In this study, we consider the simulation of natural vibrations of a profile pipe with a crack. Modeling was performed in Autodesk Inventor system. The frequencies of the first four forms of natural vibrations of a pipe without a crack were compared with the frequencies of the same forms of vibrations of a cracked pipe. The authors obtained the dependence of the drop frequency to the position of the cracks.

Keywords: modeling, pipe fracture, frequency, mode shape.

В последние несколько десятилетий значительное внимание уделялось выявлению трещин и повреждений в конструкциях путем измерения характеристик их колебаний. В большинстве случаев это позволяет проводить неразрушающий контроль конструкций [1 – 4]. Целью данного исследования являлось определение изменения значений собственных частот первых четырех форм колебаний консольной профильной трубы при появлении трещин различного размера.

В качестве объекта моделирования выступала труба 20×30×2 из прокатного профиля, изготовленного по ГОСТ 8645–68. Материал – сталь Ст3пс. Трещина моделировалась как разрез шириной 1 мм. Моделирование проводилось в Autodesk Inventor.

На рисунке 1 представлена полученная твердотельная модель, на рис. 2 – 5 – первые четыре формы собственных колебаний.

Как видно из рисунков, для большинства форм существуют точки, в которых отклонение от оси трубы будут максимальными (точки имеют максимальные амплитуды колебаний для данной формы) и имеются так называемые «пучности». Очевидно, что если трещина будет находиться вблизи данных точек, то диссипация энергии колебаний будет максимальной и значения собственных частот определенной формы колебаний должны значительно уменьшиться. Причем чем глубже трещина, тем значительнее изменение частоты колебаний.

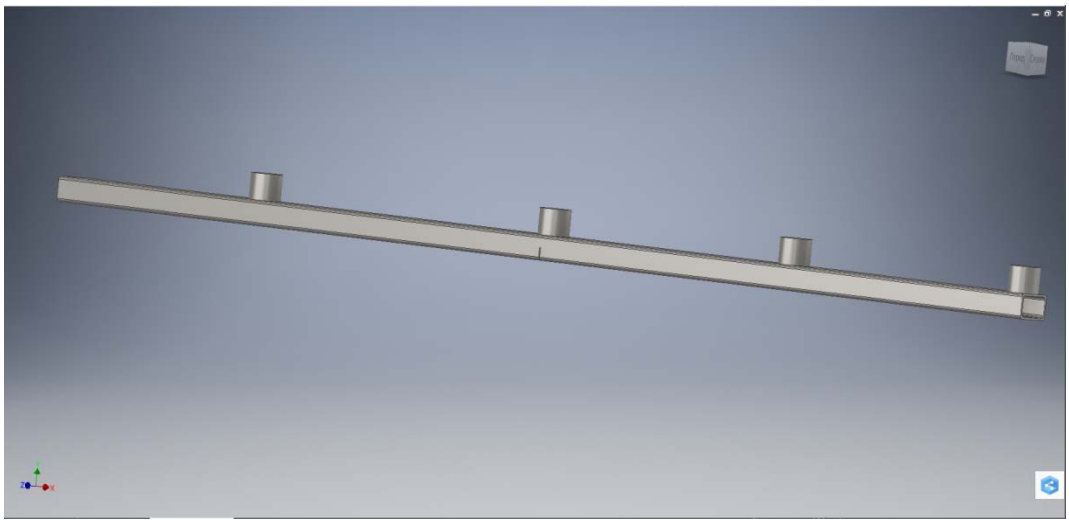


Рис. 1. Модель профильной трубы в Autodesk Inventor

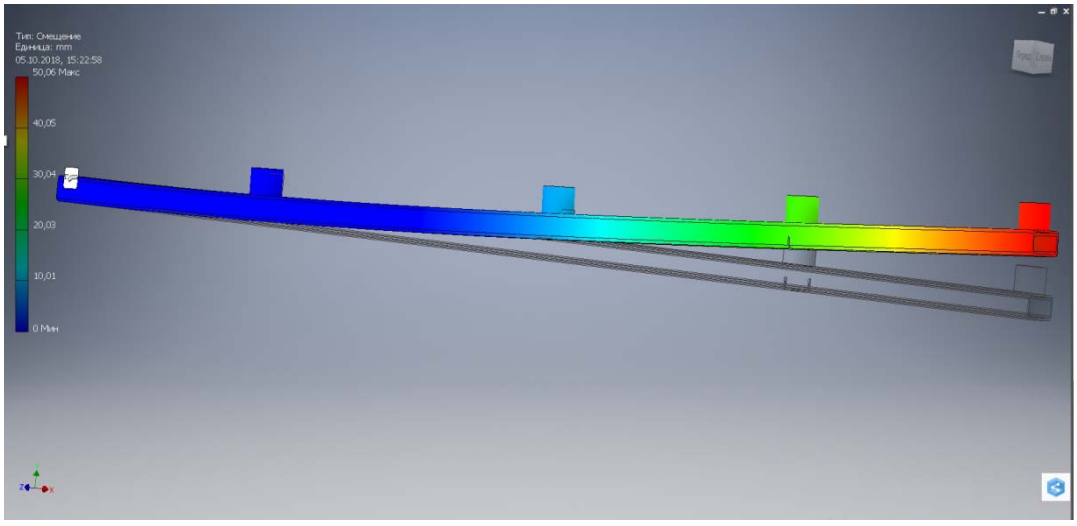


Рис. 2. Первая форма колебаний трубы

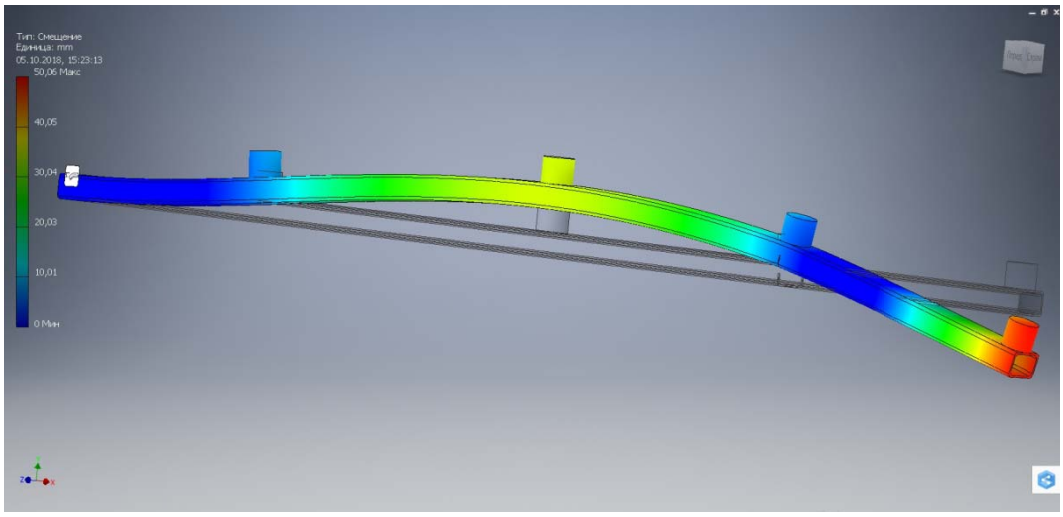


Рис. 3. Вторая форма колебаний трубы

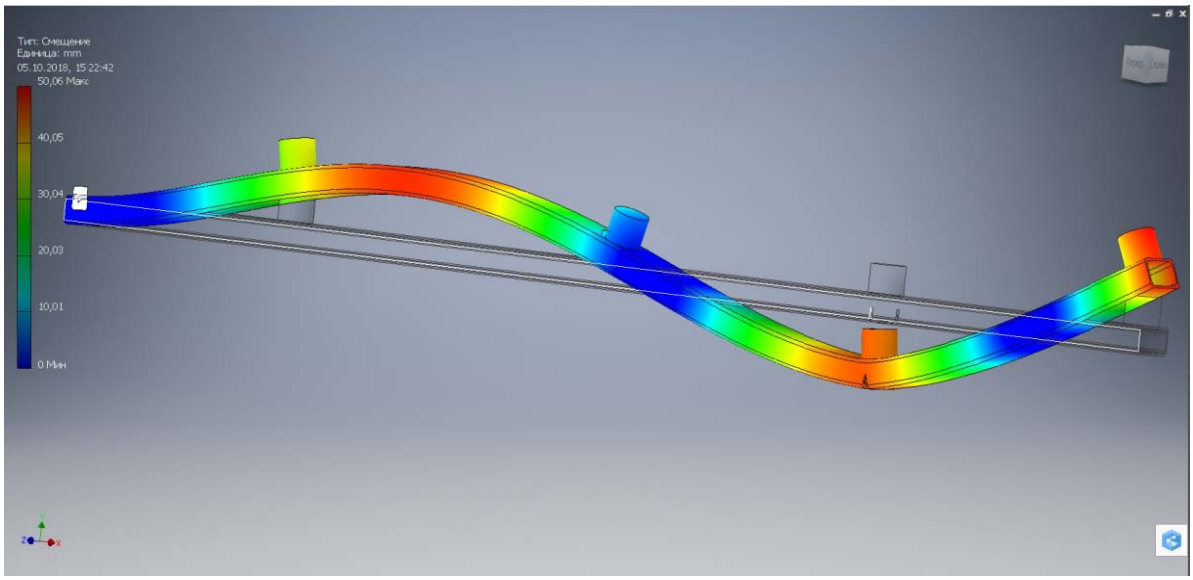


Рис. 4. Третья форма колебаний трубы

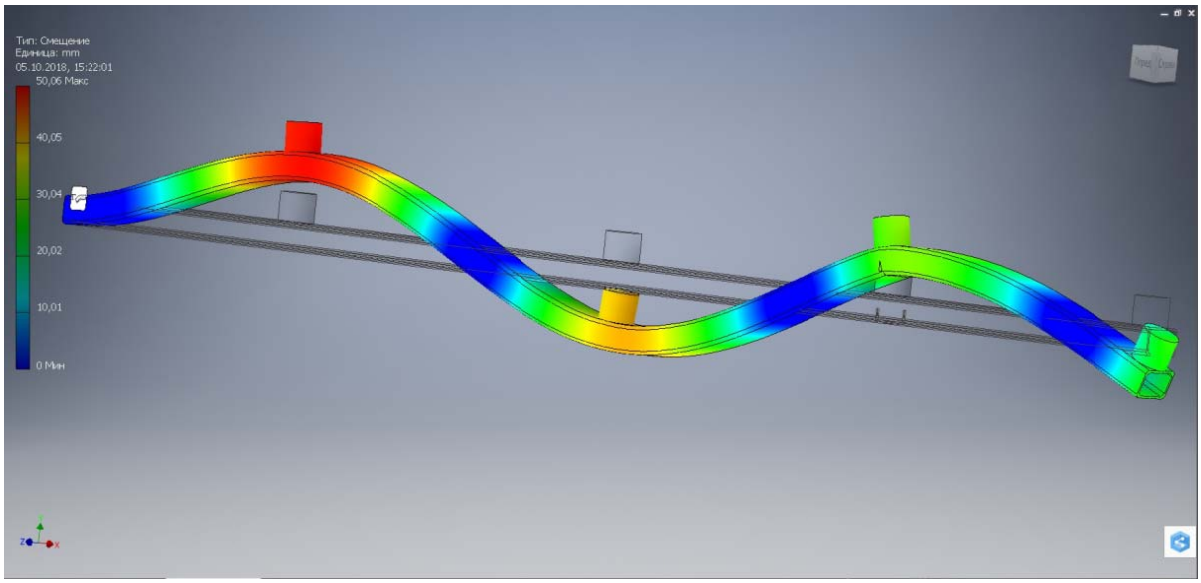


Рис. 5. Четвертая форма колебаний трубы

Моделирование первых четырех форм собственных колебаний трубы осуществлялось для различных положений и глубин трещин. Положение трещины задавалось через промежутки, равные 5% от длины трубы, глубины трещин брались равными 2,5 мм, 5 мм, 7,5 мм и 10 мм. Определялись значения падения частот колебаний и строились зависимости падения частот каждой формы колебаний от расположения трещины и ее глубины (рис. 6 – 9). На рисунках синий цвет графика соответствует глубине 2,5 мм, красный – 5 мм, зеленый – 7,5 мм, фиолетовый – 10 мм.

Из графиков видно, что близость к заделке и «пучности» влияют на изменение частот. Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения положения и величины трещины по первым четырем формам колебаний.

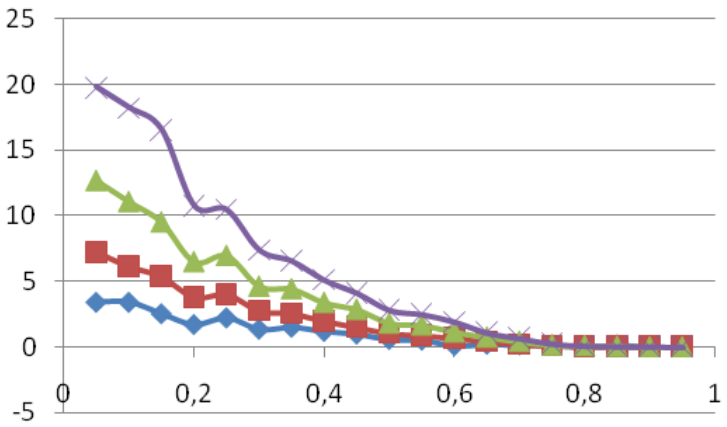


Рис. 6. Зависимость падения частоты первой формы колебаний от расположения трещины

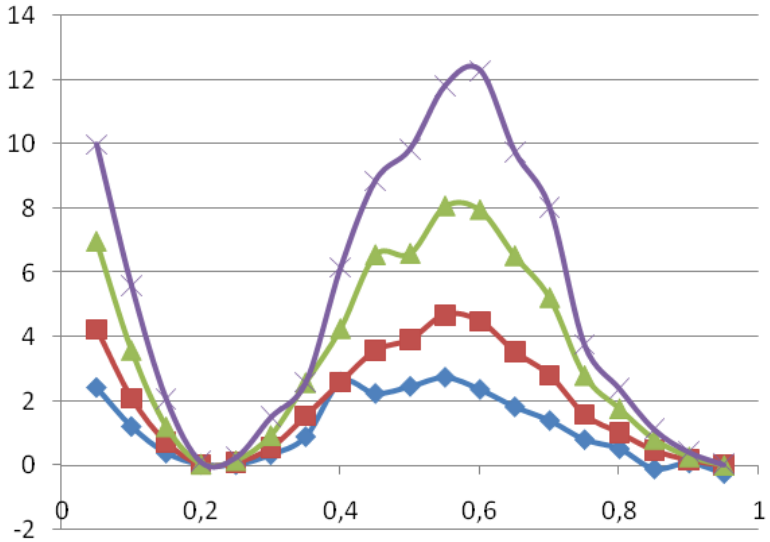


Рис. 7. Зависимость падения частоты первой формы колебаний от расположения трещины

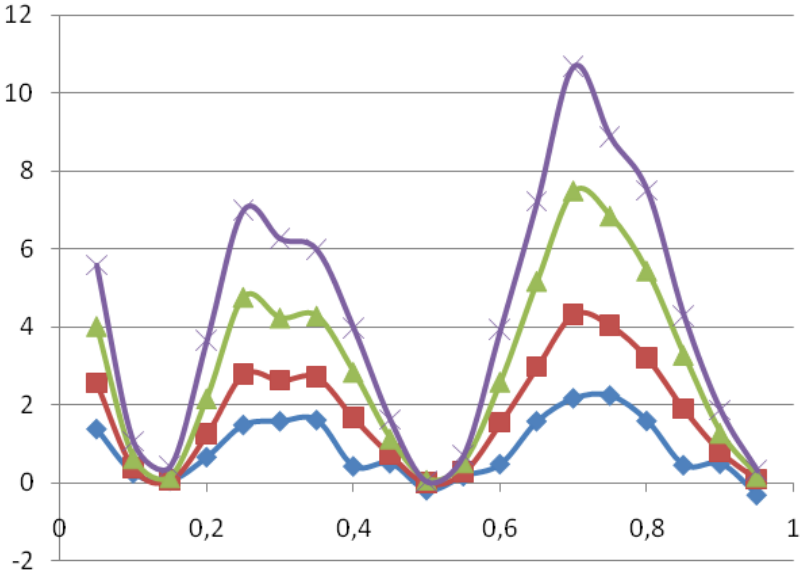


Рис. 8. Зависимость падения частоты третьей формы колебаний от расположения трещины

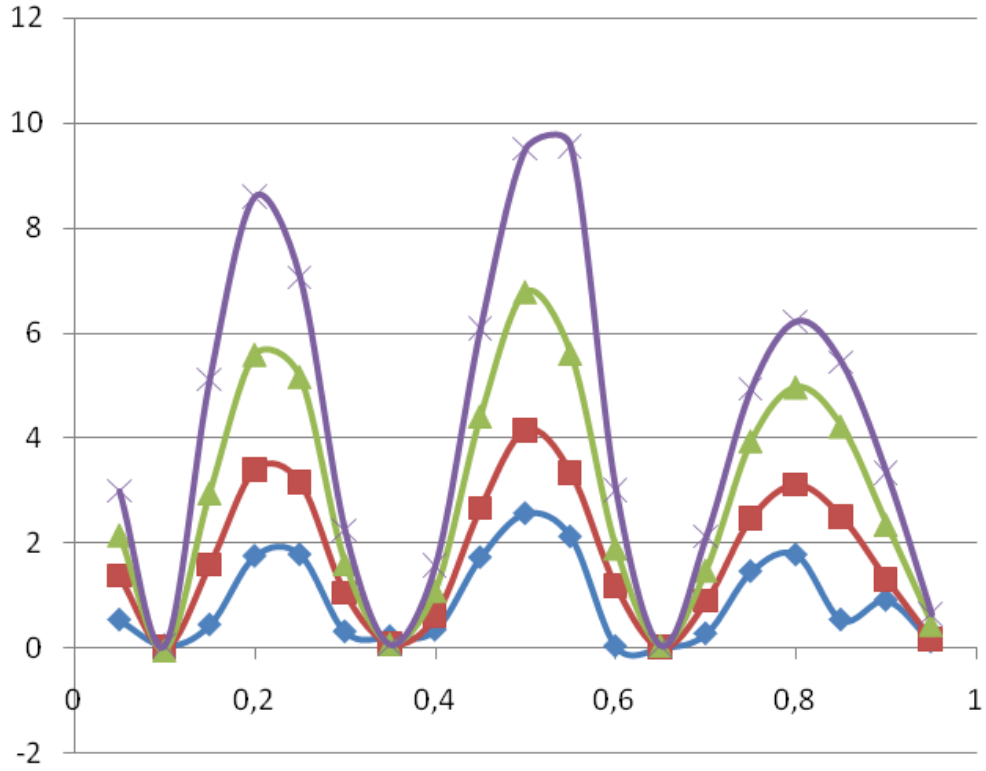


Рис. 9. Зависимость падения частоты четвертой формы колебаний от расположения трещины

Список использованных источников

1. **Gavrilov, A.** Free Vibrations of Thin-Walled Box-Section Bars Allowing for Shear Strains / A. Gavrilov, G. Grebenyuk, N. Morozov, A. Grehov // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – V. 7, Is. 2.13. – P. 7 – 12.

2. **Морозов, Н. А.** Экспериментальные исследования колебаний балок коробчатого сечения / Н. А. Морозов, А. А. Гаврилов, Ю. Л. Власов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2017. – № 1. – С. 78 – 83.

3. **Формы** и частоты колебаний многопролетных неразрезных подкрановых балок / А. А. Гаврилов и др. // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 922 – 925.

4. **Гаврилов, А. А.** Анализ экспериментальных исследований колебаний тонкостенного консольного стержня / А. А. Гаврилов, Н. А. Морозов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : матер. Всерос. науч.-метод. конф. // М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург : ОГУ, 2018. – С. 72 – 75.

References

1. **Gavrilov, A.** Free Vibrations of Thin-Walled Box-Section Bars Allowing for Shear Strains / A. Gavrilov, G. Grebenyuk, N. Morozov, A. Grehov // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – V. 7, Is. 2.13. – P. 7 – 12.

2. **Morozov, N. A.** Eksperimental'nye issledovaniya kolebanij balok korobchatogo secheniya / N. A. Morozov, A. A. Gavrilov, Yu. L. Vlasov // Intellekt. Innovacii. Investicii. – 2017. – № 1. – S. 78 – 83.

3. **Formy** i chastoty kolebanij mnogoproletnyh nerazreznyh podkranovyh balok / A. A. Gavrilov i dr. // Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 2016. – T. 21, № 3. – S. 922 – 925.

4. **Gavrilov, A. A.** Analiz ehksperimental'nyh issledovanij kolebanij tonkostennogo konsol'nogo sterzhnya / A. A. Gavrilov, N. A. Morozov // Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovaniya, nauki i kul'tury : materialy Vseros. nauch.-metod. konf. / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. byudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya “Orenburg. gos. un-t”. – Elektron. dan. – Orenburg : OGU, 2018. – S. 72 – 75.

УДК 638.124.227

Оськин С. В.[1], Овсянников Д. А.[2], Цокур Д. С.[3]
Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина
Россия, г. Краснодар
[1](Тел. 8(918)44-23-189, e-mail: kgauem@yandex.ru),
[2](Тел. 8(918)93-28-993, e-mail: beestim@mail.ru),
[3](Тел. 8(953)09-78-613, e-mail: blin_dima@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗИМНЕЙ АГРЕГАЦИИ ПЧЕЛ

Oskin S. V.[1], Ovsyannikov D. A.[2], Tsokur D. S.[3]
Kuban State Agrarian University, Russia, Krasnodar
[1](Тел. 8(918)44-23-189, e-mail: kgauem@yandex.ru),
[2](Тел. 8(918)93-28-993, e-mail: beestim@mail.ru),
[3](Тел. 8(953)09-78-613, e-mail: blin_dima@mail.ru)

THE MODELS OF PHYSICAL PROCESSES OF BEES WINTER AGGREGATION

Аннотация. Анализ физических процессов, происходящих в улье, проводился для зимней агрегации в 15 000 пчел. При исследованиях учитывались изменения объема клуба во время зимовки и проводилась взаимная увязка тепловых, воздухообменных и влажностных процессов. Моделирование физических внутриульевых процессов проводилось в пакете Comsol 5.3. Анализ изображений температурных полей подтверждают высокую теплоизолирующую способность пчел. Анализ воздухообменных процессов показывает, что скорость движения воздуха на входе в улей 0,03…0,1 м/с, а в центральном летке – 0,12…0,17 м/с. Влажностный состав улья неравномерный. Сопоставление изображений тепловых полей, полученных с помощью тепловизора, и в результате моделирования показало высокий уровень их совпадения.

Ключевые слова: модель, теплопередача, пчела, улей, физические процессы.

Abstract. The analysis of physical processes occuring in beehives was carried out for 15 000 bees in winter aggregation. In the current study changes of bees' aggregation volume during winter season as well as bonds between heating, air exchange and humidity were considered. Simulation of physical in-hive processes was carried out with the help of software Comsol 5.3. Temperature field analysis confirms the availability of the high thermal insulation ability of bees. Analysis of air exchange processes demonstrates that the air velocity near the beehive entrance is 0.03...0.1 meters per second, and in the central inlet – 0.12...0.17 meters per second. Humidity level within beehives is uneven. The identity of thermal fields obtained with thermal camera and results of the simulation demonstrates the high level of its concordance.

Keywords: model, heat transfer, bee, beehive, physical processes.

При работе в пчеловодстве важным и ответственным моментом является преодоление зимнего периода. От успешности прохождения этой части года зависит продуктивность пчелиной семьи, особенно, на весенних медосборах. Публикуется множество исследований, посвященных этому сложному периоду состояния пчел [1 – 5, 17, 18]. Более тщательный анализ, с использованием современных программных продуктов, проводили В. А. Тобоев, Е. К. Еськов, М. С. Толстов [6 – 10]. Особенностью зимнего

состояния пчел является их способность к агрегации и поддержания внутренней температуры на уровне 24…32 °С при широких колебаниях наружной температуры. В конце зимы появляется расплод, и пчелы поднимают температуру до 34 °С. Создание таких температур происходит на основе потребления пчелами меда и постоянной вентиляции зимнего клуба. Несмотря на большое количество публикаций в этой области, требуется дальнейшее изучение физических процессов, происходящих в улье. Потребность полного понимания жизнедеятельности пчел диктуется задачами повышения медопродуктивности отечественного пчеловодства. До сих пор нет точных рекомендаций по количеству оставляемого меда пчелам на зиму, как должна быть организована вентиляция. Особенно это важно при использовании электрообогрева в зимнее время, так как нужно правильно подобрать режим работы обогревателей. Оптимальный режим важен из-за того, что при избыточном обогреве повышается потребление меда и можно спровоцировать пчелиную матку на яйцекладку в холодные дни, а это приведет к гибели пчелиной семьи. Таким образом, нужно продолжать подобные исследования в целях создания оптимальных условий пчелиным семьям в зимний период и не допускать больших колебаний температуры во внутриульевом пространстве. Есть также большие различия в зимовки пчелиных семей в зависимости от географического положения среды обитания. Так, например, отличительными особенностями прохождения зимнего периода на Северном Кавказе являются: поздняя агрегация пчел в клуб, большие колебания температуры окружающего воздуха в осенний и зимний период, раннее появление расплода. Таким образом, можно сформулировать следующую задачу исследований: разработать модели физических процессов, происходящих в пчелином улье, исследовать термограммы и сравнить их с результатами тепловизионной съемки.

Для анализа физических процессов, протекающих в улье, мы приняли в качестве базовой семьи скопление 15 000 пчел, расположенных в улье дадановского типа с двенадцатью рамками. Известно, что в зимой пчел собираются в тело, максимально похожее на шар. Мы представили зимний клуб отдельными цилиндрами разного размера, которые в комплексе напоминают шар. Зимой пчелы постоянно вентилируют клуб, что связано с необходимостью удаления влаги, образованной в результате поедания меда. При повышении наружной температуры плотность клуба уменьшается и увеличивается расстояние между соседними пчелами. Для того, чтобы смоделировать процесс прохождения воздуха через клуб, улочки разделены на воздушные цилиндры (по две штуки на улочку) с изменяющейся высотой цилиндра. Эти цилиндры по своему объему будут эквивалентны общему объему воздуха в улочке, занимаемой пчелами. Допускаем, что зависимость плотности пчел ρ_{bee} от наружной температуры является линейной, и тогда соответствующее уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\rho_{bee} = 243 - 8T_0, \tag{1}$$

где T_0 – температура окружающего воздуха.

Коэффициент удельной теплопроводности пчел λ_{bee} зависит от их плотности. Так, с увеличением этого параметра растет и теплопроводность, в среднем, от $7{,}6 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К до 0,126 Вт/м·К [17 – 19]. Тогда коэффициент теплопроводности пчел также будет изменяться линейно в соответствии с уравнением

$$\lambda_{bee} = 0{,}076 - 0{,}0017T_0. \tag{2}$$

В качестве допущения можно принять, что теплопередача пчел, находящихся в сотах, будет происходить за счет теплопроводности, а пчел, расположенных в улочках, еще и за счет внутренней конвекции.

Особенностью данного анализа является учет изменения объема клуба во время зимовки. Так как зимой плотность клуба изменяется, то будет изменяться и радиус клуба, в зависимости от температуры окружающего воздуха.

Известно, что зависимость мощности тепловыделения пчел от наружной температуры имеет параболический вид [17, 19, 20]. Для случая из 15 000 пчел уравнение аппроксимации имеет следующий вид:

$$P_{bee} = 0{,}016T_0^2 - 0{,}1T_0 + 4{,}61\,. \tag{3}$$

Для дальнейшего анализа потребуется удельная мощность, воспроизводимая пчелами, тогда разделим полученное выражение на объем занимаемый клубом и получим уравнение для интенсивности тепловыделения пчел:

$$Q_{bee} = \frac{P_{bee}}{V_{bee}} = \frac{0{,}016T_0^2 - 0{,}1T_0 + 4{,}61}{0{,}005} = 3{,}2T_0^2 - 20T_0 + 922\,, \tag{4}$$

где V_{bee} – объем, занимаемый пчелиным клубом, 0,005 м^3.

Зная, что при скорости потребления меда 0,32 г/ч выделяется мощность 1 Вт [16, 17], уравнение для определения расхода корма (г/ч) в зимний период будет иметь вид

$$G_{bee} = 0{,}005T_0^2 - 0{,}032T_0 + 1{,}475\,. \tag{5}$$

В литературе [18, 19] приведено уравнение для определения необходимого расхода воздуха пчелами для удаления образующейся в улье влаги:

$$Q_{air} = \frac{q_{\mathrm{H_2O}}}{A_{out} - A_{in}}\,, \tag{6}$$

где $q_{\mathrm{H_2O}}$ – количество воды, выделившееся в результате окисления корма, г/ч; A_{out}, A_{in} – абсолютное влагосодержание, соответственно, выходного и входного воздуха, г/м^3.

Количество воды, выделившееся в результате окисления корма, можно определить по формуле [19, 20]

$$q_{\mathrm{H_2O}} = 0{,}68G_{bee}\,. \tag{7}$$

На основании таблиц перевода относительной влажности в абсолютную, получено следующее аппроксимирующее уравнение для определения необходимого расхода воздуха (м^3/ч):

$$Q_{bair} = \frac{0{,}0034T_0^2 - 0{,}0216T_0 + 1}{A_{out100} - A_{in80}} = \frac{0{,}0034T_0^2 - 0{,}0216T_0 + 1}{(0{,}007T_0 + 11{,}5) - (0{,}0065T_0^2 + 0{,}3T_0 + 4{,}03)}\,. \tag{8}$$

Моделирование физических процессов, происходящих в улье, проводили в Comsol 5.3. Полученные уравнения для определения геометрических и физических параметров

вводили в соответствующие блоки программы. Моделирование физических процессов проводилось через блок « Multiphysics».

Весь анализ проводился для стационарного режима. Обобщенную математическую модель, описывающую тепловые процессы в улье, можно представить в виде

$$\begin{cases} \rho_{air1} c_{air1} u_{airr1} VT + \rho_{air2} c_{air2} u_{air2} VT + Vq_{air1} + Vq_{air2} + \\ + \nabla q_{wood} + \nabla q_{hc} + \nabla q_{emptyhc} + \nabla q_{bee} Nu = Q_{bee}; \\ \lambda_{bee} = 0{,}0076 - 0{,}0017 T_0;\ \rho_{bee} = 243 - 8T_0; \\ Q_{bee} = 3{,}2T_0^2 - 20T_0 + 922, \end{cases} \tag{9}$$

где ρ_{air1}, ρ_{air2} – плотности воздуха соответственно поступающего снаружи (индекс 1) и проходящего через пчелиный клуб (индекс 2); c_{air1}, c_{air2} – теплоемкости воздуха соответственно первого и второго воздушных блоков (внутреннего воздуха и воздуха внутри клуба); u_{airr1}, u_{airr2} – поля скоростей соответственно первого и второго воздушных блоков, м/с; q_{air1}, q_{air2}, q_{wood}, q_{hc}, $q_{emptyhc}$, q_{bee} – плотности теряемых тепловых потоков путем теплопроводности соответственно воздушных блоков 1 и 2, деревянных элементов, медовых сот, пустых сот, пчелиного клуба, Вт/м^2; Nu – число Нуссельта.

Данная модель описывает тепловые процессы, происходящие во внутриульевом пространстве и внутри пчелиного клуба.

В стационарном ламинарном режиме математическая модель движения воздушных масс представится в виде

$$\begin{cases} \nabla(\rho_{air1} u_{air1}) + \nabla(\rho_{air1} u_{air1}) = 0; \\ 0 = \nabla\left(\mu\left(\nabla u_{air1} + (\nabla u_{air1})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{air1})I\right)\right) + \nabla\left(\mu\left(\nabla u_{air2} + (\nabla u_{air2})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{air2})I\right)\right); \\ u_{in} = \dfrac{0{,}0034T_0^2 - 0{,}0216T_0 + 1}{\left[(0{,}007T_0 + 11{,}5) - (0{,}0065T_0^2 + 0{,}3T_0 + 4{,}03)\right] \cdot 1{,}44 \cdot 10^{-3}} - \\ -p_1 = -pI + \mu\left(\nabla u_{air\,in2} + (\nabla u_{air\,in2})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{air\,in2})I\right); \\ p_2 = -pI + \mu\left(\nabla u_{air\,out2} + (\nabla u_{air\,out2})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{air\,out2})I\right), \end{cases} \tag{10}$$

где p – давление, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; I – единичный вектор; u_{in} – скорость воздуха на входе в улей; p_1, p_2 – давления соответственно во входных и выходных плоскостях воздушного блока; $u_{air\,in2}$, $u_{air\,out2}$ – скорости воздуха соответственно на входе и выходе из клуба.

Моделирование изменения влажностного режима проводилось с учетом процессов конвекции, диффузии и адсорбции на основании законов Фика, Навье–Стокса, Дарси. Общая модель изменения влажности в улье, с учетом процессов диффузии и конвекции, будет иметь вид

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c_{water}}{\partial t} + \nabla\left(-D_{water}\nabla c_{water}\right) + u\nabla c_{water} = 0; \\ j_1 = -D_{water}\nabla c_{water} + uc_{water} = 0; \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\rho_b c_{Pwater}\right) = \nabla\left(D_e \nabla c_{water}\right); \quad \rho_b = \left(1-\varepsilon_p\right)\rho; \\ j_2 = -D_e \nabla c_{water}, \end{cases} \tag{11}$$

где c_{water}, D_{water} – соответственно концентрация и коэффициент диффузии воды; j_1, j_2 – диффузионные потоки соответственно в газовой и твердой фазах; c_{Pwater} – концентрация влаги в твердой фазе; ρ_b – эквивалентная плотность твердого вещества, $\rho_b = \left(1-\varepsilon_p\right)\rho$; ε_p – пористость материала; D_e – эффективная составляющая коэффициента диффузии.

Таким образом, получили три математических модели (9, 10, 11), которые связаны между собой через физические параметры. Эти модели описывают основные протекающие в улье процессы: тепловые, влажностные, движение воздуха.

Моделирование стационарных режимов проведем для нескольких критичных температур окружающего воздуха: –28, –20, –10, –5, 0, +5, 15 °C [11 – 13].

Если сделать сечение улья перпендикулярно передней стенке и параллельно ей (рис. 1), то можно увидеть, что часть тепла уходит наружу через центральный леток вместе с удаляемым пчелами воздухом. В полученных изображениях можно увидеть места, имеющие максимальную температуру. Данные рисунки подтверждают предположения о том, что наиболее низкие температуры имеются в нижней части улья, а более высокие – в верхней.

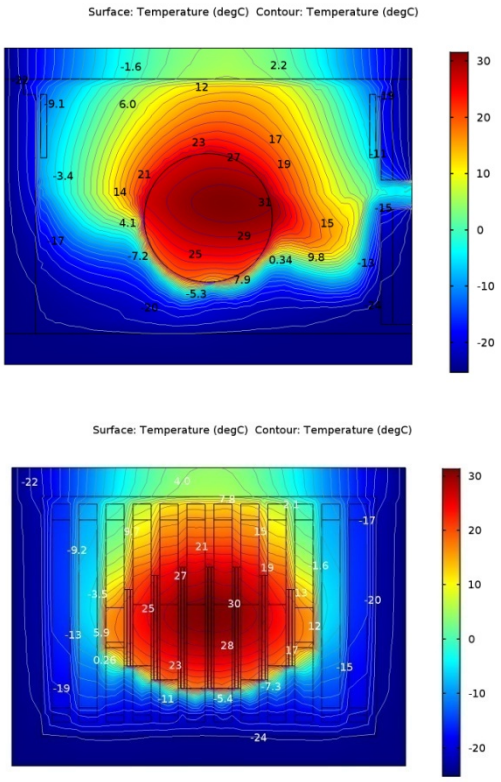


Рис. 1. Изображения температурных полей в разрезах через центр улья

Следующие исследования были посвящены анализу движения воздуха внутри улья. Установлено, что скорость движения воздуха на входе в улей находится в пределах 0,01…0,02 м/с, а на выходе (в центральном летке) – 0,12 м/с. По траекториям поступающего воздуха видно, что он поступает через нижний леток и далее распределяется по межрамочным пространствам и проходит также вдоль задней стенки.

Анализ траекторий и скоростей движения воздуха в отдельных фрагментах пчелиного клуба показал, что внутри клуба также скорости неодинаковые. Так, с одной стороны, внутри имеются зоны, где скорость воздуха составляет 0,15…0,17 м/с – это довольно высокие значения. С другой стороны наименьшая скорость наблюдается на периферии клуба и в верхней его части – 0,04…0,06 м/с – это очень низкие значения. Это правильно и с биологической точки зрения – на краю клуба пчелы находятся при низких температурах, и их жизненные процессы замедленны. Однако на краю клуба есть очаги высоких скоростей, через которые и поступает воздух во внутрь скопления. В то же время внутри клуба температуры высокие и пчелы боле активно вентилируют свое скопление.

Исследования влажностного состава в улье показали как внешний воздух поступает в улей и имеет концентрацию влаги около 0,04 моль/м^3, а в верху концентрация уже составляет 0,5…0,6 моль/м^3. Это происходит за счет вывода влаги из клуба.

Анализ изображений распределения концентрации влаги вместе с конструктивными элементами улья (дерево) доказывают, что деревянные элементы насыщаются влагой в соответствии с влажностью пограничного воздуха. Так же можно наблюдать абсорбированную влагу в деревянных элементах улья, особенно в верхней его части, что соответствует действительности (наблюдается весной при открытии ульев).

На основе полученных результатов моделирования сделаны следующие выводы. Полученные нами изображения и аналитические результаты тепловых характеристик хорошо согласуются с термограммами, полученными другими исследователями [14 – 16].

Экспериментальные исследования по микроклимату в улье проводились на пасеке, расположенной в Мостовском районе Краснодарского края. Тепловые поля исследовались в дадановском улье на 12 рамок, в котором осенью размещалась пчелиная семья на 10 рамках. Следующим этапом экспериментов было проведение съемки потолочной поверхности улья при снятой крышке. Теплосъемка проводилась в зимний период при разных температурах наружного воздуха. Так, при температуре –3 °С была получена термограмма, которая сравнивалась с изображениями, полученными в результате моделирования при тех же температурах (рис. 2).

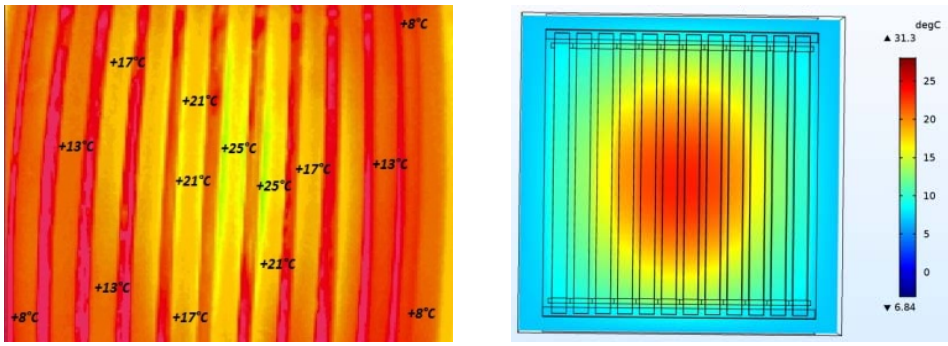


Рис. 2. Термограммы поверхности улья при снятой крышке в эксперименте (слева) и при моделировании (справа)

Система уравнений, описывающая взаимосвязь геометрических и теплофизических параметров зимнего клуба пчел с температурой окружающей среды, адекватна реальному поведению пчелиной семьи. Полученные уравнения описывают параметры микроклимата внутри клуба пчелы при изменениях его геометрии, внутренней вентиляции, перемещения пчел из более нагретой части к периферии и назад. Изображения температурных полей доказывают высокую теплоизолирующую способность пчел и можно наблюдать, как резко изменяется температура воздуха за пределами скопления пчел. Экспериментальные исследования тепловых полей внутреннего пространства пчелиного улья показали, что полученные термограммы совпадают с подобными изображениями при моделировании с аналогичными исходными данными. Сопоставление значений температуры в отдельных точках улья при моделировании и эксперименте показало, что отличие не превышает 2 °С. Совпадение термограмм доказывает возможность использования полученных моделей при анализе микроклимата в улье и при других исходных данных как по геометрии улья, так и по физическим характеристикам конструкции, по изменению наружной температуры, по изменению количества пчел в улье. Дальнейшую разработку моделей необходимо проводить теперь с установкой нагревательных элементов в нижнюю часть улья. На основе полученных моделей можно будет разработать адаптивную систему обогрева ульев с минимальным энергопотреблением.

Список использованных источников

1. **Корж, В. Н.** Основы пчеловодства / В. Н. Корж. – Ростов н/Д. : Феникс. – 2008. – 192 с.

2. **Лебедев, В. И.** Тепловой режим и энергетика пчелиных семей / В. И. Лебедев, А. И. Касьянов // Пчеловодство. – 2011. – № 2. – С. 16 – 19.

3. **Лебедев, В. И.** Термогенез и тепловой режим пчелиной семьи / В. И. Лебедев, А. И. Касьянов. – Рыбное, 2004. – 178 с.

4. **Трифонов, А. Д.** Расход корма во время зимовки / А. Д. Трифонов // Пчеловодство. – 1990. – № 11. – С. 21 – 23.

5. **Трифонов, А. Д.** Теплообмен улья, заселенного пчелами, с окружающей средой / А. Д. Трифонов // Пчеловодство. – 1991. –№ 9. – С. 28 – 31.

6. **Еськов, Е. К.** Микроклимат пчелиного жилища / Е. К. Еськов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Россельхозиздат, 1983. – 191 с.

7. **Еськов, Е. К.** Сезонная динамика тепловых процессов в межсотовых скоплениях зимующих пчел Apis mtllifera / Е. К. Еськов, В. А. Тобоев // Зоол. Журнал. – 2011. – Т. 90, № 3. – С. 335 – 341.

8. **Еськов, Е. К.** Математическое моделирование распределения температурных полей в холодовых агрегациях насекомых / Е. К. Еськов, В. А. Тобоев // Биофизика. – 2009. – Т. 54, Вып. 1. – С. 114 – 119.

9. **Тобоев, В. А.** Моделирование тепловых процессов в скоплениях зимующих пчел / В. А. Тобоев, М. С. Толстов // Физические процессы в биологических системах. – 2014. – С. 97 – 102.

10. **Тобоев, В. А.** Моделирование конвективного теплопереноса в скоплениях медоносных пчел / В. А. Тобоев, М. С. Толстов // Межотраслевой институт «Наука и образование» Ежемесячный научный журнал. – Екатеринбург, 2014. – № 3. – С. 116 – 119.

11. **Оськин, С. В.** Необходимость применения электротехнологических способов обеспечения параметров микроклимата пчелиных семей / С. В. Оськин, Л. В. Потапенко, А. А. Блягоз //Агротехника и энергообеспечение. – 2016. – Т. 1, № 4(13). – С. 12 – 21.

12. **Моделирование** теплового режима пчелиного улья в условиях зимовки / С. В. Оськин, Л. В. Потапенко, Е. В. Пустовойтова, Н. Г. Рассолов // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 206 – 210.

13. **Адаптивная** технология зимнего электрообогрева пчел / С. В. Оськин, Л. В. Потапенко, Д. А. Овсянников, Я. А. Ильченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 277 – 287.

14. **Omholt, S.** Thermoregulation in the winter clusters of honeybee, Apis mellifera // J. Theor. Biol. – 1987. – V. 128. – P. 219 – 231.

15. **Watmough, J.**, Camazine S. Self-organized thermoregulation of honeybee clusters // J. Theor. Biol. – 1995. – V. 176. – P. 391 – 402.

16. **Тобоев, В. А.** Современные методы изучения теплового гомеостаза / В. А. Тобоев // Пчеловодство. – 2006. – № 10. – С. 44 – 46.

17. **Касьянов, А. И.** Биология обогрева пчелиного гнезда / А. И. Касьянов // Пчеловодство. – 2003. – № 2. – С. 16 – 21.

18. **Трифонов, А. Д.** Расход корма во время зимовки / А. Д. Трифонов // Пчеловодство. – 1990. – № 11. – С. 21 – 23.

19. **Рыбочкин, А. Ф.** Компьютерные системы в пчеловодстве : монография / А. Ф. Рыбочкин, И. С. Захаров // Курск. гос. техн. ун-т. – 2-изд. – Курск, 2004. – 420 с.

20. **Оськин, С. В.** Электротехнологические способы и оборудование для повышения производительности труда в медотоварном пчеловодстве Северного Кавказа / С. В. Оськин, Д. А. Овсянников. – Краснодар : Изд-во ООО «Крон», 2015. – 198 с.

References

1. **Korzh, V. N.** Osnovy pchelovodstva / V. N. Korzh. – Rostov-na-Donu, “Feniks”. – 2008. – 192 s.

2. **Lebedev, V. I.** Teplovoj rezhim i ehnergetika pchelinyh semej / V. I. Lebedev, A. I. Kas'yanov // Pchelovodstvo. – 2011. – № 2. – S. 16 – 19.

3. **Lebedev, V. I.**, Kas'yanov A. I. Termogenez i teplovoj rezhim pchelinoj sem'i. – Rybnoe, 2004. – 178 s.

4. **Trifonov, A. D.** Raskhod korma vo vremya zimovki / A. D. Trifonov // Pchelovodstvo. – 1990. – № 11. – S. 21 – 23.

5. **Trifonov, A. D.** Teploobmen ul'ya, zaselennogo pchelami, s okruzhayushchej sredoj / A. D. Trifonov // Pchelovodstvo. – 1991. –№ 9. – S. 28 – 31.

6. **Es'kov, E. K.** Mikroklimat pchelinogo zhilishcha / E. K. Es'kov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Rossel'hozizdat, 1983. – 191 s.

7. **Es'kov, E. K.** Sezonnaya dinamika teplovyh processov v mezhsotovyh skopleniyah zimuyushchih pchel Apis mtllifera / E. K. Es'kov, V. A. Toboev // Zool. Zhurnal. – 2011. – T. 90, № 3. – S. 335 – 341.

8. **Es'kov, E. K.** Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya temperaturnyh polej v holodovyh agregaciyah nasekomyh / E. K. Es'kov, V. A. Toboev // Biofizika. – 2009. – T. 54, V. 1. – S. 114 – 119.

9. **Toboev, V. A.** Modelirovanie teplovyh processov v skopleniyah zimuyushchih pchel / V. A. Toboev, M. S. Tolstov // Fizicheskie processy v biologicheskih sistemah.-iyun'. – 2014. – S. 97 – 102.

10. **Toboev, V. A.** Modelirovanie konvektivnogo teploperenosa v skopleniyah medonosnyh pchel / V. A. Toboev, M. S. Tolstov // Mezhotraslevoj institut “Nauka i obrazovanie” Ezhemesyachnyj nauchnyj zhurnal. – Ekaterinburg. – 2014. – № 3. – S. 116 – 119.

11. **Os'kin, S. V.** Neobhodimost' primeneniya ehlektrotekhnologicheskih sposobov obespecheniya parametrov mikroklimata pchelinyh semej / S. V. Os'kin, L. V. Potapenko, A. A. Blyagoz // Agrotekhnika i ehnergoobespechenie. – 2016. – T. 1, № 4(13). – S. 12 – 21.

12. **Os'kin, S. V.** Modelirovanie teplovogo rezhima pchelinogo ul'ya v usloviyah zimovki / S. V. Os'kin, L. V. Potapenko, E. V. Pustovojtova, N. G. Rassolov // V sbornike : Fiziko-tekhnicheskie problemy sozdaniya novyh tekhnologij v agropromyshlennom komplekse Sbornik nauchnyh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – 2017. – S. 206 – 210.

13. **Os'kin, S. V.** Adaptivnaya tekhnologiya zimnego ehlektroobogreva pchel / S. V. Os'kin, L. V. Potapenko, D. A. Ovsyannikov, Ya. A. Il'chenko// Politematicheskij setevoj ehlektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – № 132. – S. 277 – 287.

14. **Omholt, S.** Thermoregulation in the winter clusters of honeybee, Apis mellifera // J. Theor. Biol. – 1987. – V. 128. – P. 219 – 231.

15. **Watmough, J.**, Camazine S. Self-organized thermoregulation of honeybee clusters // J. Theor. Biol. – 1995. – V. 176. – P. 391 – 402.

16. **Toboev, V. A.** Sovremennye metody izucheniya teplovogo gomeostaza / V. A. Toboev // Pchelovodstvo. – 2006. – № 10. – S. 44 – 46.

17. **Kas'yanov, A. I.** Biologiya obogreva pchelinogo gnezda / A. I. Kas'yanov // Pchelovodstvo. – 2003. – № 2. – S. 16 – 21.

18. **Trifonov, A. D.** Raskhod korma vo vremya zimovki / A. D. Trifonov // Pchelovodstvo. – 1990. – № 11. – S. 21 – 23.

19. **Rybochkin, A. F.** Komp'yuternye sistemy v pchelovodstve: monografiya / A. F. Rybochkin, I. S. Zaharov // Kursk. gos. tekhn. un-t. – 2-izd. – Kursk, 2004. – 420 s.

20. **Os'kin, S. V.** Elektrotekhnologicheskie sposoby i oborudovanie dlya povysheniya proizvoditel'nosti truda v medotovarnom pchelovodstve Severnogo Kavkaza / S. V. Os'kin, D. A. Ovsyannikov. – Krasnodar : Izd-vo OOO “Kron”, 2015. – 198 s.

УДК 004.946

Корзина М. И.[1], Сковородкин С. С.[2]
Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
Россия, г. Архангельск
[1](Тел. +7(911)552-36-99, e-mail: m.korzina@narfu.ru),
[2](Тел. +7(952)300-13-31, e-mail: skovorodkin.s@edu.narfu.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Korzina M. I.[1], Skovorodkin S. S.[2]
Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Russia, Arkhan
[1](Tel. +7(911)552-36-99, e-mail: m.korzina@narfu.ru),
[2](Tel. +7(952)300-13-31, e-mail: skovorodkin.s@edu.narfu.ru)

THE USE OF AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY IN POWER SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрено устройство котлоагрегата Herz Firematic 60 BioControl 3000. Построена его трехмерная модель, которая адаптирована для создания на основе ее приложения с применением технологий дополненной реальности.

Ключевые слова: котлоагрегат, технология, 3Д-моделирование, дополненная реальность.

Abstract. The device of the boiler Herz Firematic 60 BioControl 3000 is considered. Its three-dimensional model, which is adapted for creation on the basis of its application with the use of augmented reality technologies, is constructed.

Keywords: boiler, technology, 3D-modeling, augmented reality.

Введение. Технология дополненной реальности (англ. Augmentedreality, AR) одно из последних достижений науки и техники. Огромным плюсом использования технологии дополненной реальности является ее наглядность, информационная полнота и интерактивность. К дополненной реальности относятся те проекты, которые направлены на дополнение реальности виртуальными объектами. Применение дополненной реальности активно расширяется с развитием технологий. Данная технология имеет широкое применение в архитектуре, маркетинге, компьютерных играх, военном деле. О востребованности 3D-технологий в образовании, бизнесе и промышленности говорят следующие цифры и факты:

– 3D-решения применяются такими крупнейшими мировыми и отечественными концернами, как Boeing, Sudzuki, Lexus, BP, Peugeot Citroen, Land-Rover, Jaguar, РосАтом, ЛукОйл;

– 3D-симуляторы и тренажеры для пилотов, водителей транспорта и спецтехники высвобождают огромное количество реально существующего дорогостоящего оборудования и позволяют в безопасных условиях смоделировать любую реальную ситуацию;

– методики интерактивного обучения с помощью 3D-технологий в вузах могут на 80% повысить запоминаемость учебного материала;

– архитектурная 3D-визуализация в специальных комнатах – 3D-кубах – помогает при создании и эксплуатации зданий, сооружений и их комплексов предотвратить ошибки на ранних этапах проектирования.

Внедрение в систему образования современных виртуальных средств обучения является важнейшим условием усиления обучающего эффекта, которое заключается в интерактивности 3D-моделирования и использовании эффекта дополненной реальности. Например, приложение позволит преподавателю при организации образовательного процесса сделать занятия более наглядными, информативными и, самое главное, интересными для учащихся, что будет оказывать на студентов стимулирующее воздействие [1].

Основной целю работы является создание трехмерной модели котлоагрегата Herz Firematic 60 BioControl 3000, а также ее подготовка для использования в дополненной реальности.

Herz Firematic 60 BioControl 3000 представляет собой водогрейный котел для сжигания древесной щепы и пеллет, установленный в Лаборатории теплоэнергетики и теплотехники учебно-научного центра энергетических инноваций (УНЦЭИ) Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова. Номинальная тепловая мощность котлоагрегата при работе на топливе с влажностью менее 25% составляет 60 кВт. Он предназначен для работы на древесных гранулах (A1 по EN-14961) и щепе (G30, G50). В качестве преимуществ данного котла можно отметить компактность, экономичность и удобство в эксплуатации [2].

Для создания трехмерной модели использовался программный продукт Blender. Программа Blender представляет собой приложение с открытым исходным кодом и свободным распространением (GNU General Public License), в котором содержатся все необходимые функции для создания трехмерных моделей и последующей работы с ними [3].

В целях полностью показать конструкцию котлоагрегата и основных рабочих трактов разработано две модели, которые будут показывать котел с двух различных сторон. В первой модели представлен вид справа, на котором видны в разрезе топочная камера, зольник и жаротрубный теплообменный аппарат. Во второй модели котлоагрегата представлен вид спереди, который включает в себя систему топливоподачи, топочную камеру и зольник. Результаты разработки представлены на рис. 1.

После процесса создания к модели была добавлена анимация, чтобы показать все необходимые процессы, которые происходят во время работы котлоагрегата.

Заключение. В результате проведенной работы рассмотрены преимущества и перспективы дополненной реальности, проанализированы, структурированы и обобщены данные о модели котлоагрегата и движении топлива, проанализированы процессы, происходящие в нем, разработана трехмерная модель котлоагрегата в реальных размерах.

Модель использована в специальном приложении, которое позволяет продемонстрировать обучающимся Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова внутреннее строение котлоагрегата и процессы, которые происходят во время его работы с помощью технологий дополненной реальности.

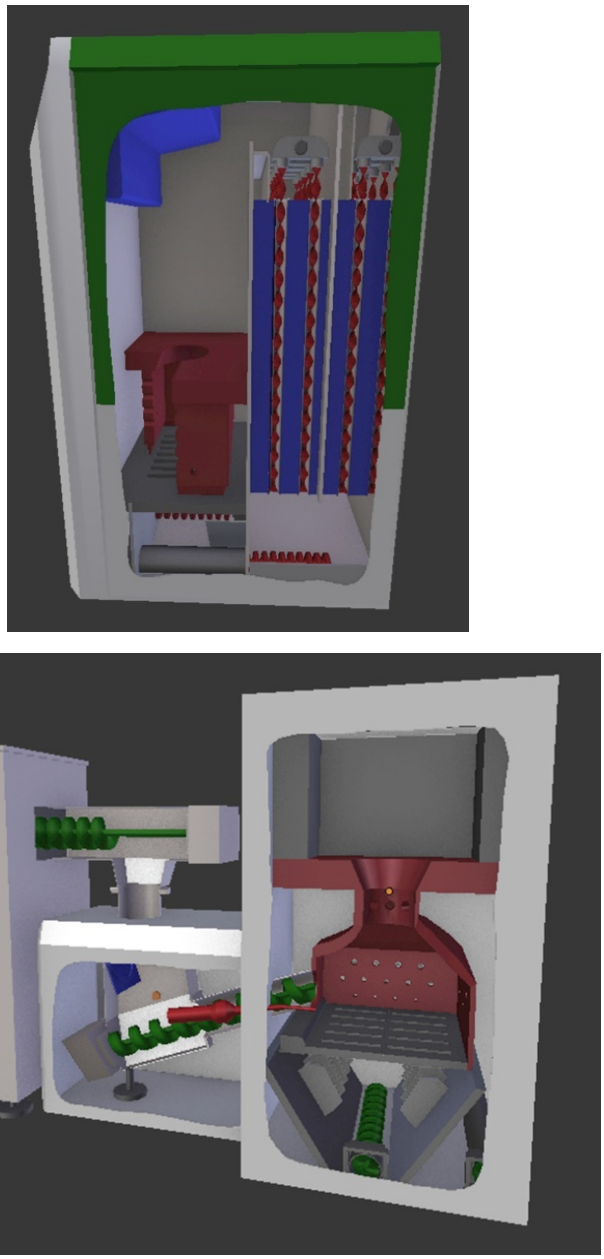


Рис. 1. Модели котлоагрегата Herz Firematic 60 BioControl 3000

Список использованных источников

1. **Дополненная** реальность: Инновационная технология организации образовательного процесса по информатике / Е. В. Киргизова, И. Ш. Шакиров, Т. В. Захарова, А. В. Рубцов // Современные проблемы науки и образования 2015. № 2-2 [Электронный ресурс]. – URL : https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21827 (дата обращения : 20.05.2018).

2. **HERZ** Energietechnic [Электронный ресурс]. – URL : http://www.herz-energie.at/ru/produktsiya/kotly-na-shchepe-pelletakh/herz-firematic-20-60/ (дата обращения : 20.05.2018). – Загл. с экрана.

3. Blender [Электронный ресурс]. – URL : https://www.blender.org/about/ (дата обращения : 20.05.2018). – Загл. с экрана.

УДК 62-111.1

Терюшков В. П.[1],Чупшев А. В.[1], Коновалов В. В.[2], Родионов Ю. В.[3]
[1]Пензенский государственный аграрный университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7902)2001244, e-mail: chupshev.a.v@pgau.ru),
[2] Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),
[3]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (+7920)4780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БАРАБАННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СИЛОВОГО АНАЛИЗА

Terushkov V. P.[1], Cupschev A. V.[1], Konovalov V. V.[2], Rodionov Yu. V.[3]
[1]Penza State Agrarian University, Russia, Penza
(Tel. (+7902)2001244, e-mail: chupshev.a.v@pgau.ru),
[2]Penza State Technological University, Russia, Penza
(Tel. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),
[3]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (+7920)4780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru)

THE SIMULATION OF DRUM DEVICES BASED ON POWER ANALYSIS

Аннотация. Объектом исследования являются силовые показатели работы барабанных устройств на примере смесителя. На основе силового анализа для элементарных секторов сегмента вращающегося материала определены действующие силы. В результате моделирования силового анализа по элементарным секторам рассчитываются численные значения действующих сил, крутящий момент и затрачиваемая мощность. В результате математического моделирования в программе MathCAD 12 установлены числовые и графические результаты расчетов указанных показателей в зависимости от степени заполнения емкости.

Ключевые слова: степень заполнения емкости, барабанный смеситель, силовой анализ, геометрические параметры сегмента материала.

Abstract. The object of the study is the power performance of drum devices on the example of a mixer. On the basis of the power analysis for the basic sectors of the rotating segment of material the operating forces were determined. As a result of power analysis by elementary sectors, the numerical values of the acting forces, torque, and power expended are calculated. As a result of mathematical modeling in the MathCAD 12 program, the numerical and graphical results of calculations of these indicators are established depending on the degree of filling of the tank.

Keywords: degree of filling of the container, drum mixer, power analysis, geometrical parameters of segment material.

Введение. В хозяйственной деятельности человека используются разнообразные барабанные устройства со схожим принципом действия [1 – 6]. Одним из наиболее часто используемых устройств являются барабанные смесители. Они применяются в строительстве, машиностроении, химической и пищевой промышленности, сельском

хозяйстве. В процессе работы барабанных устройств, как правило, у барабанных устройств вращается емкость [1 – 4]. При исследовании смесителей наибольший интерес у исследователей вызывает обоснование качественных показателей смесителя и его производительности [4 – 6]. Другим направлением исследований является силовой анализ работы смесителя [3, 5], позволяющий определять на основе полученных результатов силового анализа мощность привода смесителя.

Численный анализ силового воздействия позволяет моделировать конструкцию барабанного смесителя по заданным условиям его конструкции или производительности. Это дает возможность оптимизировать параметры смесителя и устанавливать функциональные зависимости между особенностями его конструкции и показателями работы.

Целью исследований являлось численное моделирование работы барабанного смесителя, в том числе выявление геометрических показателей вороха материала во вращающемся барабане для проведения силового анализа элементарных секторов сегмента материала и определения затрачиваемой мощности.

В процессе исследований предусматривалось аналитическими методами на основе потребной производительности или параметров смесителя установить геометрические показатели вороха материала в емкости смесительного барабана, установить зависимость между геометрией вороха и действующими силами материала во вращающемся барабане, крутящим моментом и потребляемой мощностью. Для оценки числовых значений конкретных параметров смесителя и его работы на основе установленных формул использовался математический пакет MathCAD.

Рассмотрим поперечное сечение вращающегося барабана с ворохом материала внутри него (рис. 1). Во вращающемся барабане частицы материала будут захватываться движущимся элементом (в рассматриваемом случае – емкостью) и подниматься вверх вдоль стенок цилиндрической емкости *1*. Достигнув некоторого угла подъема, частицы *3* будут ссыпаться вниз, образуя наружную кромку материала *2* (A_0A_1) под углом α – динамическим углом обрушения материала относительно горизонтали, рад.

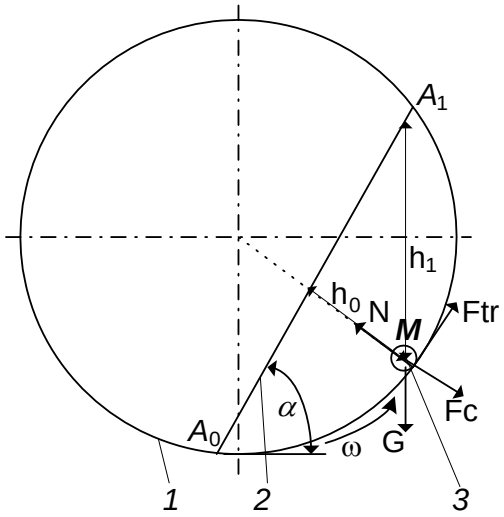


Рис. 1. Схема заполнения цилиндрической емкости барабанного смесителя:
1 – цилиндрическая емкость; *2* – наружная кромка вороха материала;
3 – условная частица материала т. М (аналог проекции элементарного сектора материала);
4 – пруток спирали винтового конвейера; α – угол обрушения материала, рад.

Внешними силами, приложенными на частицу материала M (как аналог элементарного сектора материала), являются давление вышерасположенного столба материала (образующее силу тяжести G), инерционное воздействие от вращения (центробежная сила Fc столба материала над частицей M вдоль радиуса емкости). Под действием указанных сил [7] элементарный сектор материала прижимается к внутренней стенке емкости, создавая силу реакции нормального давления N, а также силу трения F_{tr} материала о стенки емкости. Преодолевая указанные силы, осуществляется силовое воздействие трения вращающейся стенки цилиндрической емкости F_{tr} на частицу M.

Запишем условия силового равновесия элементарного сектора (рис. 1):

$$\begin{cases} \Sigma F_x = F_c - N + G\cos(\alpha) = 0 \\ \Sigma F_y = F_{tr} - G\sin(\alpha) = 0 \end{cases}, \text{ или} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N = F_c + G\cos(\alpha) \\ F_{tr} = G\sin(\alpha). \end{cases} \quad (2)$$

При наличии вращения емкости создается момент трения материала о стенки. Если сила трения F_{tr} мала (при малом коэффициенте трения f материала о стенки емкости, либо большом угле размещения стенки относительно горизонтали), то имеется возможность соскальзывания сегмента материала вдоль стенок емкости. Данное условие описывается первым уравнением в системе (2), где $F_{tr} = Nf$. В противном случае осуществляется подъем материала на некоторую высоту, соответствующую расположению частиц при определенном угле от нижней точки емкости. Дальше происходит ссыпание материала внешних слоев из-за недостаточных центробежных сил и образование поверхности 2 под углом α обрушения вороха материала. Данное условие описывается вторым уравнением в системе (2).

Вращение барабана осуществляется за счет привода, который преодолевает суммарный момент M_k (Н·м) от силы трения частиц всех *j*-х элементарных сегментов материала, соответствующих интервалу углов $\gamma = \angle A_0OA_1$ на рис. 2, т.е. от β_0 до β_1:

$$M_k = \sum_j F_{trj} R. \quad (3)$$

Мощность привода на вращение барабана P, Вт:

$$P = M_k \omega \frac{L}{\Delta l} = \sum_j F_{trj} R\omega \frac{L}{\Delta l} = \sum_j (F_{cj} + G_j \cos(\alpha)) fR\omega \frac{L}{\Delta l}. \quad (4)$$

Для силового анализа движения частиц материала и рабочего органа необходимо знать величины действующих сил (рис. 1) на некую частицу M как аналога элементарного сектора материала:

$G = mg = \rho h_1 \Delta S g$ – сила тяжести, H; m – масса столба материала над условной частицей материала, кг; g – ускорение свободного падения, кг/м^2; ρ – плотность вороха материала, кг/м^3; h_1 – высота вертикального столба материала, м; $\Delta S = l_1 \Delta l$ – площадь элементарного сектора, м^2; $l_1 = R\pi/180°$– длина элементарного сектора по окружности, приходящаяся на центральный угол элементарного сектора – $\varphi' = 1°$, м; R = D/2 – внутренний радиус емкости, м; Δl = 0,001 м – длина элементарного сектора вдоль оси вращения;

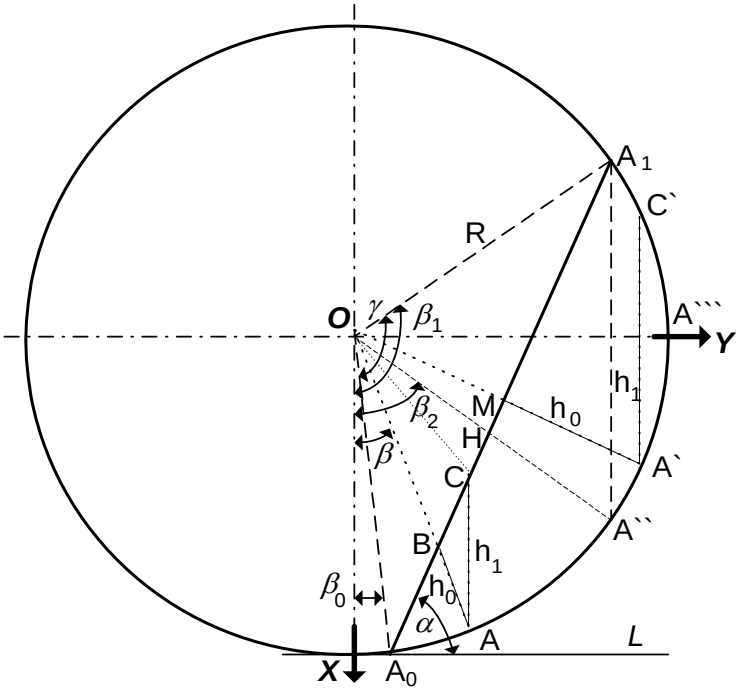


Рис. 2. Схема размещения геометрических параметров вороха материала в цилиндрической емкости:

O – центр вращения и поперечного сечения емкости; A_0A_1 – условная поверхность обрушения вороха материала; α – угол обрушения, рад.; γ – центральный угол, соответствующий сегменту материала, рад.; β_0, β_1, β_2, β – углы расположения точек сегмента материала: нижней, верхней, вертикальной проекции верхней точки на низ окружности, текущего угла сектора, соответственно, рад.; h_1 и h_0 – вертикального и радиального столба материала, м

$F_c = m\omega^2 R'$ – центробежная сила, Н; ω – угловая скорость вращения емкости, c^{-1}; R' – радиус расположения центра тяжести элементарного сектора материала над частицей M в сторону оси вращения, $R' = h_0 \frac{2}{3} \frac{\sin(d\varphi')}{\varphi'}$ м; h_0 – высота радиального столба материала, м;

$F_{tr} = Nf$ – сила рения материала на стенку, Н; N – нормальная реакция стенки емкости на воздействие материала, Н; f – коэффициент трения материала о стенку емкости.

Проведенные численные исследования позволили установить числовые значения геометрических показателей сегмента материала.

Значения h_1 (рис. 3, *а*) изменяются согласно выражению (5) по численным значениям на графике в интервале углов $\beta_0 \le \beta \le \beta_2$.

В таком случае высота слоя материала радиальная и вертикальная, м:

$$h_0 = R - \frac{R\cos(0{,}5\cdot\gamma)}{\cos(\alpha-\beta)}; \quad h_1 = h_1 \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos\alpha}. \tag{5}$$

Достигнув величин углов $\beta = \beta_2$, отсутствует свободная поверхность материала (ф.6), так как верхняя часть материала ограничена верхней частью емкости.

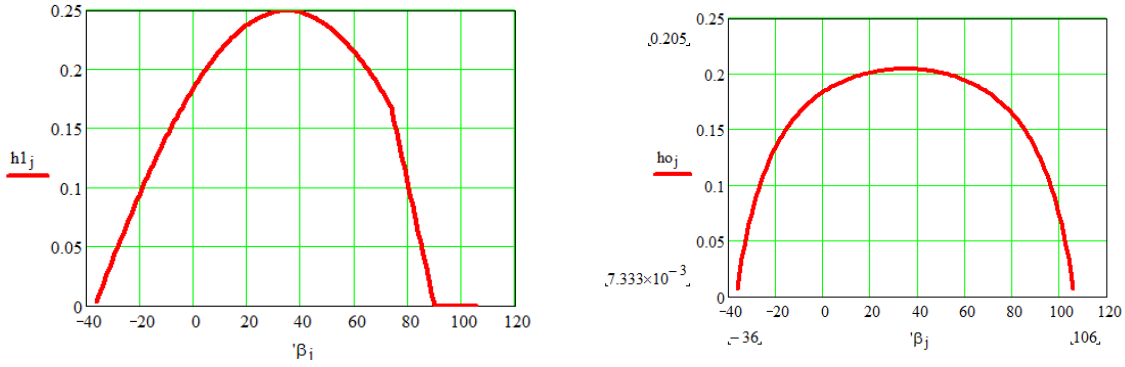
Для дуги $\widetilde{A``A```}$ высота слоя материала

$$h_1 = 2R\cos(\beta). \tag{6}$$

По достижении β = 90° величина h_1 будет далее равна нулю, т.е. при углах, больших

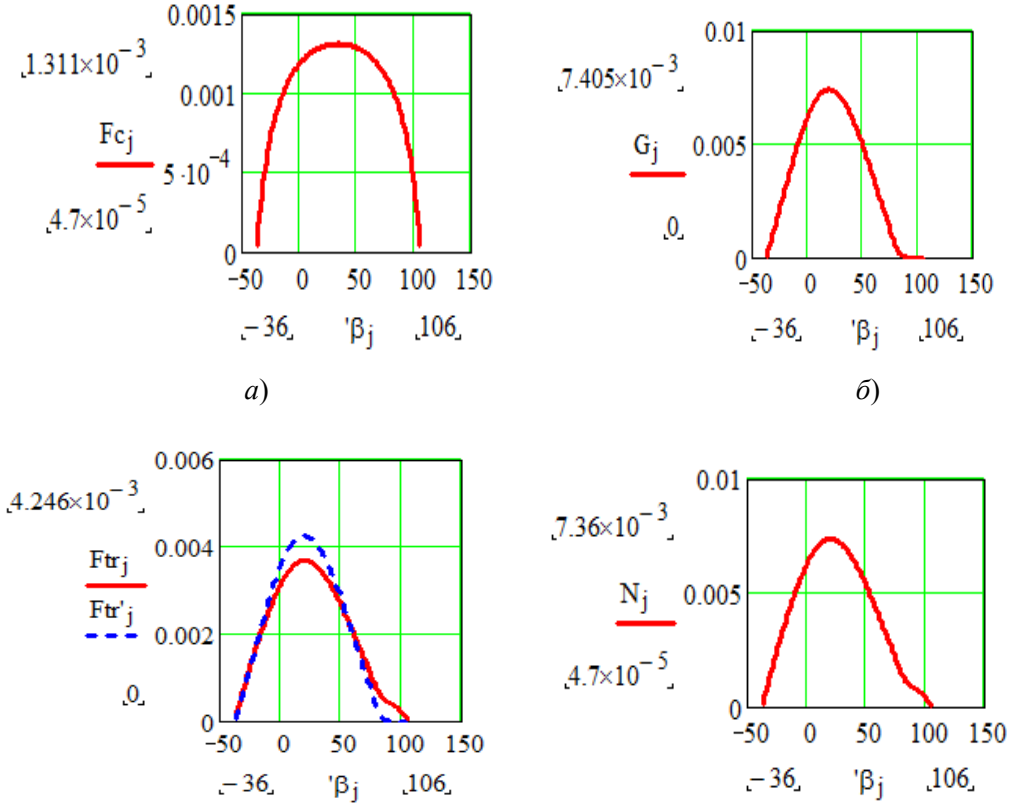
$$\beta = 90° - h_1 = 0. \quad (7)$$

Значения h_0 (рис. 3, *б*) изменяются по сложной дуге (5), отдаленно напоминая синусоиду. С учетом значений высот h_1 и h_0, величины действующих сил изменяются схожим образом (рис. 4).



а) *б*)

Рис. 3. Высоты слоя материала:
вертикальная h_1 (м) и радиальная h_0 (м), приходящиеся на элементарный сектор, расположенный в направлении угла β



а) *б*)

с) *d*)

Рис. 4 Силы, действующие на элементарный сектор, расположенный в направлении угла β:
а – центробежная сила, Н; *b* – сила тяжести, Н; *с* – нормальная реакция, Н; *d* – сила трения, Н

Характер центробежной силы F_c соответствует характеру высоты h_0, а характер изменения силы тяжести G – характеру h_1. С учетом взаимодействия указанных сил изменяется характер нормальной реакции N. Сила трения F_{tr} изменяется по аналогии нормальной реакции N, с учетом первого уравнения системы (2). При этом, в случае, когда числовые значения силы трения по данной формуле меньше чем значения силы трения по второму уравнению системы (2), наблюдается надежный контакт материала и поверхности емкости ($\beta \approx 60°$). Позже данное условие не выполняется и появляется возможность скольжения материала по стенке емкости. Его ограничивают частицы материала, расположенные ниже.

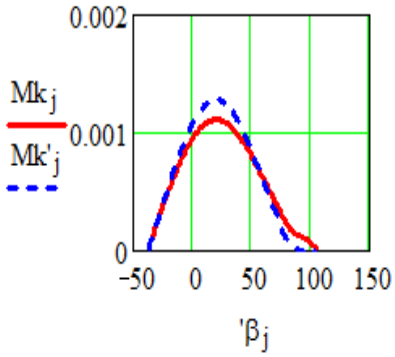


Рис. 5. Крутящий момент (Н·м), приходящийся на элементарный сектор, расположенный в направлении угла β

Указанные функции силы трения вызывают возникновение двух вариантов крутящих моментов. Сопоставляя их суммарные значения и переводя в потребляемую мощность, получим два варианта мощности. Расчетная мощность по вариантам составляет 134 Вт и 140 Вт, т.е. разница 4,9%. Степень заполнения емкости 30% при диаметре и длине емкости 0,6 м, плотности материала 650 кг/м^3 и коэффициенте трения f материала по стенке 0,5, $\alpha = 45°$.

Заключение. Таким образом, установленные выражения позволяют осуществлять моделирование изменения основных геометрических показателей сегмента материала в цилиндрических емкостях, обеспечивающие расчет с ошибкой, не превышающей 5%, что позволяет установить функции силы трения, крутящего момента и мощности на вращение емкости. Реализация выявленных зависимостей с помощью компьютерных программ (например, MathCAD) позволяет как проводить расчет действующих сил, моментов и величины потребляемой мощности для конкретных параметров, так и осуществлять численные исследования данного процесса, оптимизируя параметры смесителя.

Список использованных источников

1. **Савиных, П. А.** Влияние конструктивно-технологических параметров дробилки зерна ударно-отражательного действия на ее энергетические показатели / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов / Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2014. – Т. 3. – С. 142 – 148.

2. **Определение** объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера / В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1(75). – С. 91 – 94.

3. **Першин, В. Ф.** Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана / В. Ф. Першин // Порошковая металлургия. – 1986. – № 10. – С. 1.

4. **Петрова, С. С.** Повышение качества смешивания кормов с обоснованием конструктивно-режимных параметров барабанного смесителя : автореф. дис. … канд. техн. наук / С. С. Петрова. – Пенза, 2004. – 16 с.

5. **Терюшков, В. П.** Численное моделирование движения материала по наклонной лопасти барабанных устройств / В. П. Терюшков, А. И. Бобылев, В. В. Коновалов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2017. – С. 40 – 49.

6. **Исследование** перемещения зернового материала устройством ворошения / Ю. М. Исаев, Н. М. Семашкин, С. А. Каленков, В. А. Злобин // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-2. – С. 289 – 293.

7. Мачнев, В. А. Теоретическая механика / В. А. Мачнев. – Пенза : РИО ПГСХА, 2001. – 140 с.

References

1. **Savinykh, P. A.** The influence of the structural and technological parameters of the grain of the shock-reflective effect on its energy performance / P. A. Savinykh, S. Yu. Bulatov, K. E. Mironov // Proceedings of the international scientific and technical conference on energy Supply and energy saving in agriculture. – 2014. – V. 3. – P. 142 – 148.

2. **Determination** of the volume flow rate of the extrudate in the zone of pressing of a single-screw press-extruder / V. V. Novikov, A. A. Kurochkin, G. V. Schaburova, et al. // Bulletin of the Altai state agrarian University. – 2011. – № 1(75). – P. 91 – 94.

3. **Pershin, V. F.** Model of the mixing process of granular material in the priest river section of the rotating drum / V. F. Pershin // Powder metallurgy. – 1986. – № 10. – P. 164.

4. **Petrova, S. S.** Improving the quality of feed mixing with the justification of structural and regime parameters of the drum mixer : auto-Ref. dis. ... kand. tech. sciences' / S. S. Petrova. – Penza, 2004. – 166 p.

5. **Terushkov, V. P.** Numerical simulation of material motion on an inclined blade drum devices / V. P. Teruskov, A. I. Bobylev, V. V. Konovalov / the book of Virtual modeling, prototyping and industrial design. Proceedings of the IV International scientific-practical conference. – Tambov, 2017. – P. 40 – 49.

6. **Isaev, Yu. M.** Investigation of the movement of the grain material make the device the tedding / Yu. Isaev, N. M. Semechkin, A. S. Kalenkov, A. V. Zlobin // Fundamental research. – 2017. – № 11-2. – P. 289 – 293.

7. **Machnev, V. A.** Theoretical mechanics. – Penza : RIO pgsha, 2001. – 140 p.

УДК 62-522.2

Ванин В. А.[1], Романова Е. В.[2], Григорян В. С.[3]
[1]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов,
[2]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8-953-703-23-46, e-mail: katrin-mintm@mail.ru),
[3]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8-900-519-64-90, e-mail: vlad_grigoryan96@mail.ru)

ПОСТРОЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В СТАНКАХ СО СЛОЖНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Vanin V. A.[1], Romanova E. V.[2], Grigoryan V. S.[3]
[1]Tambov State Technical University, Russia, Tambov,
[2]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8-953-703-23-46, e-mail: katrin-mintm@mail.ru),
[3]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8-900-519-64-90, e-mail: vlad_grigoryan96@mail.ru)

CONSTRUCTION AND OPTIMIZATION OF FORMING CHAINS ON THE BASIS OF HYDRAULIC CONNECTIONS IN MACHINES WITH COMPLEX MOTIONS OF SHAPING

Аннотация. Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) кинематических цепей копировально-фрезерных станков различного технологического назначения в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода в целях создания рациональной конструкции станка, с использованием модульного принципа построения.

Ключевые слова: кинематические цепи, гидравлический шаговый привод.

Abstract. The possibility of constructing internal (forming) kinematic chains of copying and milling machines of various technological purposes in the form of hydraulic connections based on a stepping hydraulic drive with the purpose of increasing the accuracy, reducing the metal capacity, creating a rational machine design using the modular construction principle is considered.

Keywords: kinematic chains, hydraulic stepper drive.

При конструировании металлорежущих станков с точными кинематическими связями необходимым условием является выбор оптимального варианта кинематической цепи на стадии проектирования.

Структура кинематических цепей определяет конструктивную сложность станка, методы его настройки, оказывает существенное влияние на жесткость, точность, виброустойчивость станка.

Рациональное построение цепей металлорежущих станков возможно осуществить, используя модульный принцип на основе гидравлических связей в виде дискретного шагового гидропривода с исполнительными силовыми шаговыми гидродвигателями.

Главной особенностью данного класса приводов является то, что в качестве силового исполнительного органа используется гидравлический шаговый двигатель (ГШД),

в качестве управляющего устройства – генератор гидравлических импульсов, который преобразует энергию рабочей жидкости в гидравлические импульсы и распределяет их в определенной последовательности по рабочим камерам ГШД, а выходной вал шагового гидродвигателя отрабатывает управляющие дискретные сигналы с высокой точностью и большим усилением по мощности.

При использовании внутренних кинематических цепей в качестве силового органа шаговых гидродвигателей связь между заготовкой и инструментом осуществляется благодаря тому, что расход рабочей жидкости посредством рабочих щелей распределительного устройства преобразуется в определенную последовательность гидравлических импульсов, которые распределяются по силовым камерам шагового гидродвигателя, при этом каждому из них соответствует определенный угол поворота выходных валов ГШД, пропорциональный числу импульсов, а скорость вращения пропорциональна частоте их следования.

Используя свойства частотного регулирования скорости исполнительных органов гидравлического шагового привода, представляется возможным гидравлические связи на базе шагового гидравлического привода применять для построения кинематических внутренних цепей металлорежущих станков, имеющих сложные разветвленные многозвенные переналаживаемые механические цепи значительной протяженности.

На рисунке 1 представлена структурная схема копировально-фрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки сложнопрофилированных деталей с системой управления от блока гидрораспределителей, построенных на базе двухкромочного золотника с торцовым распределением рабочей жидкости.

Станок включает в себя инструмент *13*, совершающий вращательное движение от электродвигателя Д через звено настройки i_v, заготовку *11*, установленную на столе *14* станка и совершающую сложное исполнительное движение.

Сложное исполнительное формообразующее движение, составленное из элементарных прямолинейных движений – продольного движения $П_2$ и поперечного $П_3$, осуществляется внутренней связью между продольным перемещением продольного стола *19* и поперечными салазками *14* с заготовкой *11*. Формообразующие связи выполнены в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода.

Продольное перемещение $П_2$ продольного стола *19* осуществляется от шагового гидродвигателя *9*, кинематически связанного со столом посредством ходового винта *12* продольного перемещения стола.

Поперечное перемещение $П_3$ (следящая подача) верхних салазок *14* с заготовкой *11*, необходимое для воспроизведения требуемой фасонной поверхности заготовки, обеспечивается внутренней (формообразующей) связью между продольным суппортом *19* и верхними салазками *14* с заготовкой и осуществляется от шагового гидродвигателя *15*, кинематически связанного с верхними салазками посредством ходового винта *16* поперечной подачи.

Управление шаговыми гидродвигателями *9* и *15* приводов продольного перемещения продольного суппорта (задающая подача) и поперечная подача поперечных салазок *14* (следящая подача) осуществляется от блоков торцовых гидродвигателей *17* и *18*, которые состоят из трех одинаковых (по числу каналов шаговых гидродвигателей) гидравлических распределителей с торцовым распределением рабочей жидкости, выполненных на базе двухкромочного золотника.

Настройка гидравлической внутренней (формообразующей) цепи на требуемое передаточное отношение производится с помощью генератора гидравлических импульсов *3*, который представляет собой набор кодирующих дисков, закрепленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора *4*. Наружная поверхность каждого из кодирующих дисков выполнена таким образом, что его выступы при вращении дисков либо перекрывают сопло, либо оставляют его свободным, причем один выступ может перекрывать только лишь одну щель. При таком расположении щелей в корпусе генератора относительно выступов вращающегося кодирующегося диска одна из щелей всегда перекрывается выступом диска, а через две оставшиеся не перекрытыми щели рабочая жидкость поступает на слив.

При отсутствии управляющего сигнала распределитель находится в левом положении под действием давления питания. При достижении управляющим давлением значения, соответствующего точке срабатывания, распределитель начнет перемещаться из своего крайнего левого положения, причем при страгивании распределитель давление питания действует на всю площадь малого торца и перебрасывает распределитель вправо. Левый торец открывает напорное сопло, а правый торец закрывает слив.

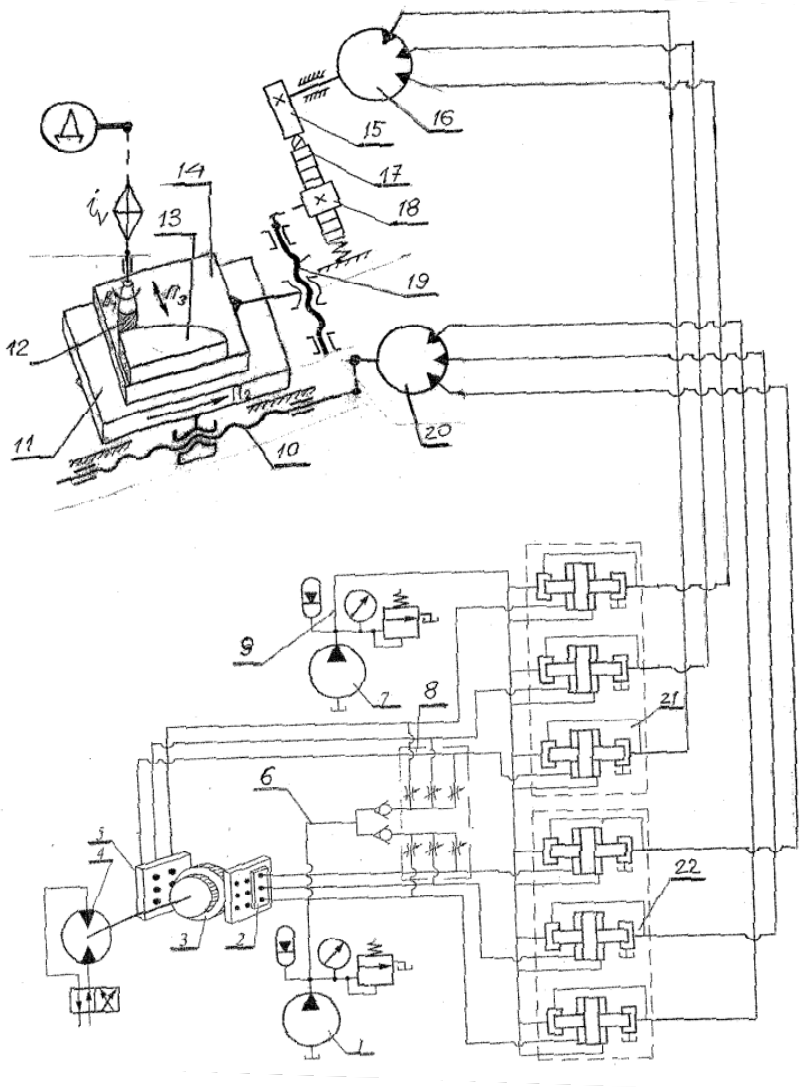


Рис. 1. Структурная схема копировально-фрезерного станка с внутренними гидравлическими связями

Рабочая жидкость для получения управляющих импульсов для гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости поступает от насосной установки *1* через блок дросселей *7* по трубопроводу *6*. Давление питания на вход каждого из гидрораспределителей подается через регулируемый дроссель блока дросселей насосной установки *8*, а затем, в зависимости от положения торцовых гидрораспределителей, по одному из каналов поступает в рабочие камеры шаговых гидродвигателей *9* и *15* приводов заготовки в продольном и поперечном направлениях.

Применение гидравлического шагового привода при построении внутренних (формообразующих) кинематических цепей в виде гидравлических связей взамен механических цепей:

– обеспечивает конструктивную однородность внутренних кинематических цепей для станков различного технологического назначения, в которых при работе требуется обеспечить жесткую функциональную связь между инструментом и заготовкой;

– расширяет возможности применения шагового гидропривода для выполнения сложных взаимосвязанных формообразующих движений в станках.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680-787.

Список использованных источников

1. **Кинематическая** структура зуборезных станков с гидравлическими связями во внутренних (формообразующих) цепях для нарезания зубьев конических колес / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, М. З. До, М. М. Дамат // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 2(40). – С. 308 – 316.

2. **Ванин, В. А.** Кинематические связи в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода / В. А. Ванин, С. В. Мищенко, О. Н. Трифонов. – М. : Изд-во «Машиностроение-1», 2005. – 328 с.

3. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура зуборезных станков с гидравлическими внутренними связями на основе шагового гидропривода для нарезания зубьев некруглых колес / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // СТИН. – 2008. – № 12. – С. 2 – 10.

References

1. **Vanin, V. A.**, Kolodin A. N., M. Z. Do, M. M. Damat. Kinematicheskaya struktura zuboreznyh stankov s gidravlicheskimi svyazyami vo vnut-rennih (formoobrazuyushchih) cepyah dlya narezaniya zub'ev konicheskih koles // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2012. – № 2(40). – S. 308 – 316.

2. **Vanin, V. A.**, Mishchenko S. V., Trifonov O. N. Kinematicheskie svyazi v metallorezhushchih stankah na osnove gidravlicheskogo shagovogo privoda. – M. : Izdatel'stvo “Mashinostroenie-1”, 2005. – 328 s.

3. **Vanin, V. A.**, Kolodin A. N. Kinematicheskaya struktura zuboreznyh stankov s gidravlicheskimi vnutrennimi svyazyami na osnove shagovogo gidroprivoda dlya narezaniya zub'ev nekruglyh koles // STIN. – 2008. – № 12. – S. 2 – 10.

УДК 62-522.2

Ванин В. А.[1], Романова Е. В.[2], Григорян В. С.[3]
[1]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов,
[2]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8-953-703-23-46, e-mail: katrin-mintm@mail.ru),
[3]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8-900-519-64-90, e-mail: vlad_grigoryan96@mail.ru)

ОПТИМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В ВИДЕ ШАГОВОГО ГИДРОПРИВОДА

Vanin V. A.[1], Romanova E. V.[2], Grigoryan V. S.[3]
[1]Tambov State Technical University, Russia, Tambov,
[2]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8-953-703-23-46, e-mail: katrin-mintm@mail.ru),
[3]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8-900-519-64-90, e-mail: vlad_grigoryan96@mail.ru)

OPTIMAL CONSTRUCTION OF THE KINEMATIC STRUCTURE OF MACHINE TOOLS ON THE BASIS OF HYDRAULIC CONNECTIONS IN THE FORM OF STEPPING HYDRAULIC DRIVE

Аннотация. Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) кинематических цепей резьбофрезерных станков различного технологического назначения в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода в целях повышения точности, снижения металлоемкости, создания рациональной конструкции станка используя модульный принцип построения.

Ключевые слова: кинематические цепи, гидравлический шаговый привод.

Abstract. The possibility of constructing internal (forming) kinematic chains of thread-milling machines of various technological purposes in the form of hydraulic connections based on the stepping hydraulic drive with the purpose of increasing the accuracy, reducing the metal capacity, creating a rational machine design using the modular construction principle is considered.

Keywords: kinematic chains, hydraulic stepper drive.

Построение рациональной конструкции кинематических цепей металлообрабатывающих станков, оптимальной по функциональной точности, по металлоемкости и другим показателям, является сложной задачей, решение которой может дать большой технико-экономический эффект для производства вследствие экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Для получения в станке определенного исполнительного движения необходимо создать кинематическую связь между исполнительными звеньями станка (заготовкой и инструментом) и кинематическую связь этих звеньев с источником движения, которая в большинстве случаев осуществляется с помощью механических цепей в цепях главного движения и во внутренних цепях станков.

На кинематическую точность цепи влияют геометрическая неточность элементов и неточность их взаимного расположения, обусловленная погрешностями обработки и сборки. Большое влияние на точность цепи оказывают температурные деформации и крутильная жесткость.

Одним из возможных направлений повышения точности внутренних (формообразующих) цепей станков и сохранения ее в процессе эксплуатации является сокращение протяженности кинематических цепей за счет применения взамен механических связей гидравлических связей на основе шагового гидравлического привода, которая обеспечивает высокую точность согласования угловых перемещений и возможность прямого непосредственного соединения исполнительного двигателя с нагрузкой, исключая при этом промежуточные механические передачи, коробки подач, редукторы [1 – 4].

Структурно шаговый гидропривод представляет собой систему из трех агрегатов: источника рабочей жидкости, управляющего устройства, которое формирует управляющие импульсы давления и распределяет их по рабочим камерам шагового гидродвигателя, и шагового двигателя (ГШД).

Используя свойства частотного регулирования скорости исполнительных органов гидравлического шагового привода, представляется возможным применять гидравлические связи на основе шагового гидравлического привода для построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков, имеющих сложные разветвленные многозвенные переналаживаемые механические цепи значительной протяженности, которые должны обеспечить жесткую связь для создания взаимосвязанных формообразующих движения заготовки и инструмента.

На рисунке 1 приведена структурная схема резьбофрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания цилиндрических винтовых поверхностей переменного шага и переменной глубиной профиля однопрофильным инструментом (дисковой фрезой, имеющей профиль, соответствующий профилю нарезаемой резьбы *12* с модифицированной системой управления).

Переменный шаг и переменная глубина обрабатываемой винтовой поверхности образуется в результате равномерного вращательного движения заготовки и неравномерного поступательного движения суппорта для получения переменного шага и неравномерного поступательного перемещения поперечных салазок суппорта для получения переменной глубины профиля.

Вращение инструмента *13* осуществляется от электродвигателя $Д_1$ через звено настройки i_v. Вращение заготовки *14* (круговая подача) производится от электродвигателя Д через звено настройки i_s.

Продольное перемещение продольного суппорта *20* с фрезерной головкой *4* и инструментом *13* осуществляется от шагового гидродвигателя *6*, кинематически связанного с суппортом *20* посредством ходового винта *3* и управляемого генератором гидравлических импульсов *9*, золотниковая втулка с рабочими щелями, формирующими управляющие импульсы, получает вращение от приводного зубчатого колеса *8*, жестко закрепленного на шпинделе заготовки *14*.

Поперечное перемещение фрезерной головки *4* с инструментом *13* производится шаговым гидродвигателем *17*, кинематически связанного с головкой посредством ходового винта *15* поперечной подачи и управляемым генератором гидравлических импульсов *11*.

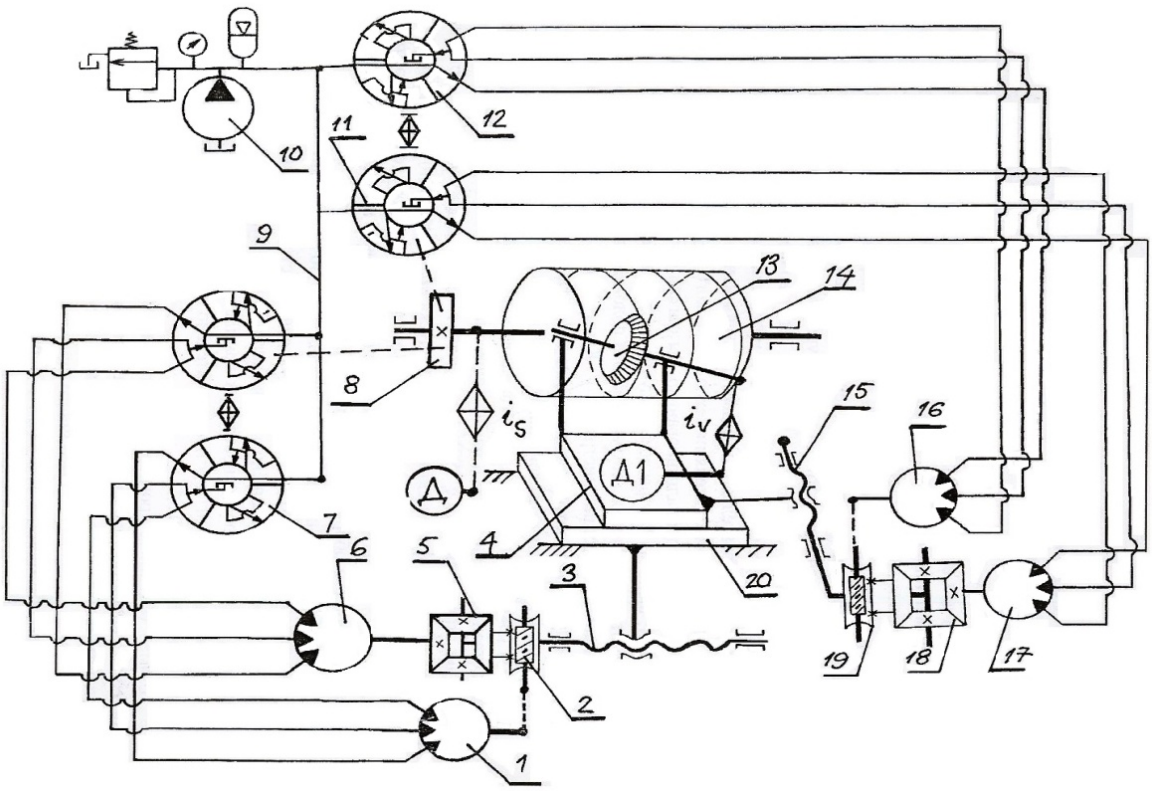


Рис. 1. Структурная схема резьбофрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки винтовых поверхностей переменного шага и переменной глубины профиля

Дифференциальное движение необходимой для получения величины приращения шага винтовой поверхности при продольном перемещении продольного суппорта *20* осуществляется от шагового гидродвигателя *1*, кинематически связанного с ходовым винтом *3* продольной подачи через суммирующий механизм *5* в виде дифференциала с коническими колесами посредством червячной передачи *2* и управляемого генератором гидравлических импульсов *7*, золотниковая втулка с рабочими щелями которого получает вращение через несиловую гитару сменных зубчатых колес i_1 от вращающейся золотниковой втулки генератора гидравлических импульсов *9* цепи продольного перемещения суппорта.

Дифференциальное движение, необходимое для получения величины приращения глубины профиля винтовой поверхности при поперечном перемещении фрезерной головки (цепь изменения глубины профиля), осуществляется от шагового гидродвигателя *16*, кинематически связанного с ходовым винтом *15* поперечной подачи через цилиндрический механизм *18* в виде дифференциала *18* с коническими колесами посредством червячной передачи *19* и управляемого генератором гидравлических импульсов *12*, золотниковая втулка с рабочими щелями которого получаем вращение через несиловую гитару сменных зубчатых колес i_2 от вращающейся золотниковой втулки генератора гидравлических импульсов *11*, размещенного в цепи поперечного перемещения фрезерной головки *4*.

Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подводится от насосной установки *1*.

Эффективность применения гидравлических связей во внутренних цепях станков на основе шагового гидропривода заключается в том, что:

– обеспечивается конструктивная однородность кинематических связей между конечными звеньями – заготовкой и инструментом – для станков различного технологического назначения и разных типоразмеров, при этом возможно исключить конструктивное и размерное многообразие кинематических цепей;

– уменьшается металлоемкость и масса станка за счет сохранения до возможного минимума количества промежуточных звеньев, составляющих механическую кинематическую цепь при замене ее гидравлической связью, что существенно упрощает кинематику станка и одновременно приводит к повышению жесткости и точности, а также позволяет создать более рациональную компоновку.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680 787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура зубо- и резьбообрабатывающих станков с унифицированными гидравлическими связями в формообразующих цепях / В. А. Ванин // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 2 – 6.

2. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура станков с неравномерными движениями формообразования на основе унифицированных гидравлических связей / В. А. Ванин // Вестник машиностроения. – 2009. – № 11. – С. 47 – 51.

3. **Ванин, В. А.** Применение гидравлического шагового привода для построения внутренних цепей металлорежущих станков / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Вестник машиностроения. – 2010 – № 5. – С. 19 – 25.

4. **Ванин, В. А.** Кинематические связи в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода / В. А. Ванин, С. В. Мищенко, О. Н. Трифонов. – М. : Изд-во «Машиностроение-1», 2005. – 328 с.

References

1. **Vanin, V. A.** Kinematicheskaya struktura zubo- i rez'boobrabatyvayushchih stankov s unificirovannymi gidravlicheskimi svyazyami v formoobrazuyushchih cepyah // STIN. – 2008. – № 1. – S. 2 – 6.

2. **Vanin, V. A.** Kinematicheskaya struktura stankov s nerav-nomernymi dvizheniyami formoobrazovaniya na osnove unifici-rovannyh gidravlicheskih svyazej // Vestnik mashinostroeniya. – 2009. – № 11. – S. 47 – 51.

3. **Vanin, V. A., Kolodin A. N.** Primenenie gidravlicheskogo shagovogo privoda dlya postroeniya vnutrennih cepej metallorezhushchih stankov // Vestnik mashinostroeniya. – 2010. – № 5. – S. 19 – 25.

4. **Vanin, V. A.**, Mishchenko S. V., Trifonov O. N. Kinematicheskie svyazi v metallorezhushchih stankah na osnove gidravlicheskogo shagovogo privoda. – M. : Izdatel'stvo “Mashinostroenie-1”, 2005. – 328 s.

УДК 62-111.1

Бобылев А. И., Коновалов В. В., Терюшков В. П., Фомин А. С.
Пензенский государственный аграрный университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7937)4342244, e-mail: tvp141@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ МАТЕРИАЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

Bobylev A. I., Konovalov V. V., Terushkov V. P., Fomin A. S.
Penza State Agrarian University, Russia, Penza
(Tel. (+7937)4342244, e-mail: tvp141@mail.ru

SIMULATION OF CHANGES IN THE MATERIAL GEOMETRY IN A CYLINDRICAL CONTAINER

Аннотация. Объектом исследования являются геометрические параметры сегмента материала в цилиндрической горизонтальной емкости. Определены вертикальные и радиальные высоты материала в секторе, угловые координаты нижнего и верхнего края сегмента материала. Обосновано выражение центрального угла сегмента материала с погрешностью 5%. В результате математического моделирования в программе MathCAD 12 установлены числовые и графические результаты расчетов указанных показателей в зависимости от степени заполнения емкости.

Ключевые слова: степень заполнения емкости, координаты сегмента, геометрические параметры сегмента.

Abstract. The object of study is the geometric parameters of the material segment in a cylindrical horizontal container. The vertical and radial heights of the material in the sector, the angular coordinates of the lower and upper edges of the material segment are determined. The expression of the central angle of the material segment with an error of 5% is substantiated. As a result of mathematical modeling in the MathCAD 12 program, the numerical and graphical results of calculations of the indicated indices are established depending on the degree of filling of the tank.

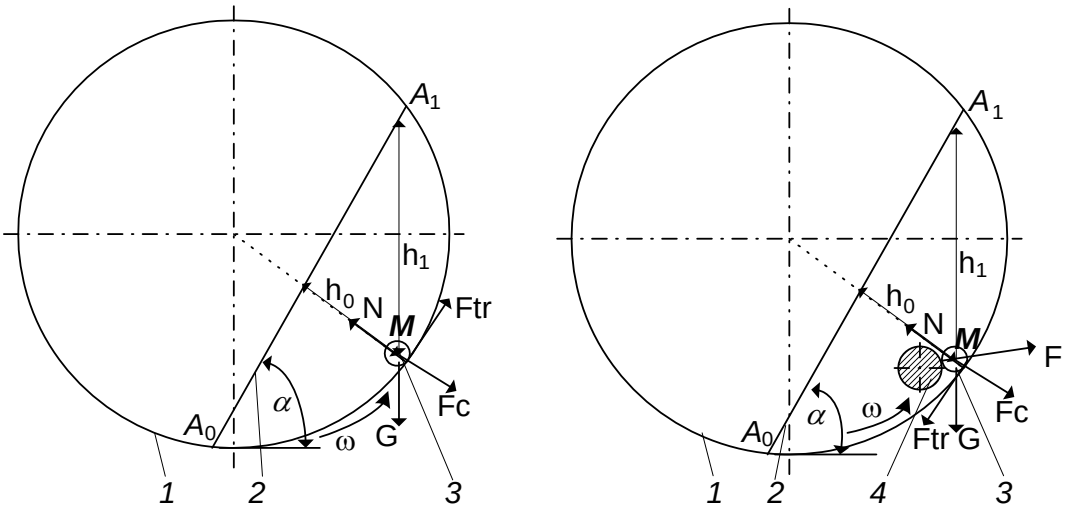
Keywords: degree of filling of container, segment coordinates, geometric parameters of segment.

Введение. В различных отраслях промышленности используются разнообразные устройства с цилиндрической емкостью, заполненной материалом [1 – 6].

При этом емкость может вращаться сама (рис. 1, *а*) [3 – 5] или же быть неподвижна, но, при этом внутри нее может вращаться рабочий орган [6]. Примером является спиральный конвейер (рис. 1, *б*). В обоих случаях частицы материала будут захватываться движущимся элементом и подниматься вверх вдоль стенок цилиндрической емкости *1*. Достигнув некоторого угла подъема, частицы будут ссыпаться вниз [3, 5], образуя наружную кромку материала (A_0A_1) под углом α – динамическим углом обрушения материала относительно горизонтали, рад.

Для силового анализа движения частиц материала и рабочего органа [7] необходимо знать величины действующих сил (рис. 1) на частицу М (как аналога элементарного

сектора материала): $G = mg = \rho g h_1$ – сила тяжести, Н; $m = \rho h_1$ – масса вертикального столба материала над условной частицей материала, кг; g – ускорение свободного падения, кг/м^2; ρ – плотность вороха материала, кг/м^3; h_1 – высота вертикального столба материала, м; $F_c = m`\omega^2 R`$ – центробежная сила, Н; $m` = \rho h_0$ – масса радиального столба материала над условной частицей материала, кг; $h_0$ – высота радиального столба материала, м; ω – угловая скорость движения частицы, рад./с; $R`$ – радиус расположения центра тяжести элементарного сектора материала над частицей М в сторону оси вращения, $R`=\frac{2}{3}\frac{R^3-h_0^3}{R^2-h_0^2}\frac{\sin(d\varphi)}{d\varphi}$ [8]; φ – центральный угол элементарного сектора материала, рад.; N – нормальная реакция давления частицы о стенку цилиндрической емкости, Н; F_{tr} – сила трения материала о стенку емкости, Н; и силу Кориолиса F_k.



а) *б*)

Рис. 1. Схема заполнения цилиндрической емкости:
а – барабанного смесителя; *б* – спирального конвейера; *1* – цилиндрическая емкость; *2* – наружная кромка вороха материала; *3* – условная частица материала (аналог проекции элементарного сектора материала); *4* – пруток спирали винтового конвейера; α – угол обрушения материала, рад.

Внешними приложенными на частицу М силами является давление вышерасположенного столба материала (образующее силу тяжести G), инерционное воздействие от вращения (центробежная сила Fc столба материала над частицей М вдоль радиуса емкости). Преодолевая указанные силы, осуществляется силовое воздействие F движущегося прутка спирали или трения вращающейся стенки цилиндрической емкости F_{tr} на частицу М.

Для расчета указанных показателей определенную сложность вызывает нахождение вертикального h_1 или радиального h_0 столба материала (рис. 2).

Поэтому *целью исследований* явилось определение функциональных зависимостей высоты вертикального и радиального столба материала, позволяющих рассчитать значения и установить зависимости изменения их значений для получения математической модели изменения указанных параметров.

Методика исследований. Методика проведения исследований предусматривала теоретические изыскания взаимосвязи геометрических параметров сегмента материала в цилиндрической емкости, а также проведение численных исследований в программе MathCAD 12 по выявлению численных значений показателей и уравнений регрессии, графической визуализации результатов расчета.

Теоретические исследования. Рассмотрим расположение материала в емкости. Материал располагается вдоль боковой стенки и образует угол α относительно горизонтали (рис. 2). По мере увеличения материала в емкости, угол его обрушения практически не меняется, однако изменяется заполненная площадь поперечного сечения (т.е. изменяется площадь сегмента отсекаемого хордой A_0A_1), и соответственно степень заполнения емкости в данном поперечном сечении. Центральный угол для сегмента обозначим γ, рад. Угловую координату т. A_0 относительно вертикали (ось OX) укажем как β_0 (рад.), т. A_1 относительно (оси OX) укажем как β_1. Текущий угол при расчетах в интервале (β_0; β_1) обозначим как β. Угловую координату т. A`` (вертикальную проекцию т. A_1 на нижнюю часть окружности) относительно вертикали (ось *OX*) укажем как β_2 (рад.).

Площадь круга (м^2), определяется

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4} = \pi R^2, \tag{1}$$

где $R = D/2$ – радиус окружности емкости, м; D – диаметр окружности, м.

Степень заполнения поперечного сечения круга:

$$S_z = {}^{S}/_{S_0}. \tag{2}$$

Площадь сегмента, м^2

$$S = \frac{R^2(\gamma - \sin\gamma)}{2}, \tag{3}$$

где $\gamma = \angle A_0 O A_1$ – центральный угол сектора материала, рад.

Следовательно,

$$\gamma - \sin\gamma = \frac{2S}{R^2}. \tag{4}$$

Встает вопрос: как решить данное уравнение и найти величину угла γ? Точный метод решения отсутствует. Можно представить решение этой задачи компьютерной программе. А можно использовать известное разложение синуса в ряд:

$$\sin\gamma = \gamma - \frac{\gamma^3}{3!} + \frac{\gamma^5}{5!} - \frac{\gamma^7}{7!} + \cdots (n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot n). \tag{5}$$

При отбрасывании всех членов ряда, начиная с некоторого, погрешность по абсолютной величине не будет превосходить абсолютной величины 1-го из отброшенных членов ряда.

Если оставить только два первых члена ряда: $\sin\gamma \approx \gamma - \frac{\gamma^3}{3!}$, то погрешность будет меньше $\frac{\gamma^5}{120}$. Погрешность получается большой $\sim(< 50^0)$.

Но для этого случая можно найти γ точно, решив уравнение

$$\gamma - \sin\gamma = \frac{2S}{R^2}.$$

Имеем

$$\frac{\gamma^3}{3!} \approx \frac{2S}{R^2} \quad \text{или} \quad \gamma \approx \sqrt[3]{\frac{12S}{R^2}}. \tag{6}$$

Можно в разложении взять три первых члена: $\sin\gamma \approx \gamma - \frac{\gamma^3}{3!} + \frac{\gamma^5}{5!}$.

Тогда погрешность будет меньше $\sim\left(< \frac{\gamma^7}{5040} \approx 7^0\right)$, но получается уравнение 5-й степени, которое тоже точно не решается:

$$\frac{\gamma^3}{6} - \frac{\gamma^5}{120} \approx \frac{2S}{R^2} \quad \text{или} \quad \gamma^5 - 20 \cdot \gamma^3 + \frac{240 \cdot S}{R^2} \approx 0. \tag{7}$$

Поэтому лучше оставить четыре члена разложения:

$$\sin\gamma \approx \gamma - \frac{\gamma^3}{3!} + \frac{\gamma^5}{5!} - \frac{\gamma^7}{7!}. \tag{8}$$

Погрешность составит $\sim(< 0{,}6^0)$. Для нахождения γ нужно решить уравнение

$$\frac{\gamma^3}{6} + \frac{\gamma^5}{120} - \frac{\gamma^7}{5040} \approx \frac{2S}{R^2}. \tag{9}$$

В случае установления функции влияния площади заполнения сегмента материалом, возникает возможность определения высот материала вертикальной и радиальной.

Определим взаимосвязь геометрических показателей сектора с учетом установленной зависимости для γ. Рассмотрим случай (рис. 2), когда точки A_0, A_1 и сегмент лежат по одну сторону от вертикали (оси *X*). Выразим в этом случае углы β_0 и β_1 через известные углы α и γ.

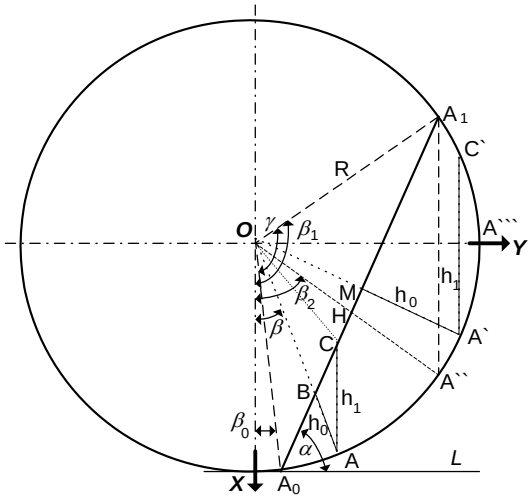


Рис. 2. Схема размещения геометрических параметров вороха материала в цилиндрической емкости:

O – центр вращения и поперечного сечения емкости; A_0A_1 – условная поверхность обрушения вороха материала; α – угол обрушения, рад.; γ – центральный угол, соответствующий сегменту материала, рад.; β_0, β_1, β_2, β – углы расположения точек сегмента материала: нижней, верхней, вертикальной проекции верхней точки на низ окружности, текущего угла сектора, соответственно, рад.; h_1 и h_0 – вертикального и радиального столба материала, м

Из ΔOA_1A_0: $\angle OA_1A_0 = 0.5 \cdot (\pi - \gamma)$.

Из ΔOMA_0: $\angle OA_0M = \pi - \alpha - (0.5 \cdot \pi - \beta_0) = \frac{\pi}{2} - \alpha + \beta_0$, $\angle A_0OA_1 = \beta_1 - \beta_0$.

Отсюда

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2} - \alpha + \beta_0 + \beta_1 - \beta_0 = \pi, \quad \text{и} \quad \beta_1 = \alpha + \frac{\gamma}{2}. \tag{10}$$

В данном случае, $\gamma = \beta_1 - \beta_0$, поэтому

$$\beta_0 = \beta_1 - \gamma, \text{ т.е. } \beta_0 = \alpha - \frac{\gamma}{2}. \tag{11}$$

Итак,

$$\begin{cases} \beta_1 = \alpha + \frac{\gamma}{2} \\ \beta_0 = \alpha - \frac{\gamma}{2} \end{cases}. \ \beta \in [-\beta_0; \beta_1]. \tag{12}$$

Найдем ОВ из ΔOBN, где $(OH \perp A_1A_0)$.

$$\angle BOH = \frac{\gamma}{2} - \beta + \beta_0. \ OH = R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2}\right) = R \cdot \cos\frac{\gamma}{2}.$$

Поэтому

$$OB = \frac{OH}{\cos(\angle BOH)} = \frac{R \cdot \cos\frac{\gamma}{2}}{\cos\left(\frac{\gamma}{2} - \beta + \beta_0\right)}. \ BA = R - OB. \tag{13}$$

Найдем АС, если $A \in \overset{\frown}{A_0A``}$, где AC проведена как вертикаль из т. A до пересечения с A_1A_0. Обозначим β угол от вертикали до OA.

$$\angle BAC = \beta, \angle ACB = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Отсюда $\angle ABC = \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta$.

По теореме синусов: $\frac{AC}{\sin\angle ABC} = \frac{BA}{\sin\angle ACB}$.

Отсюда

$$AC = BA \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}, \text{ или } AC = BA \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos\alpha}. \tag{14}$$

Найдем теперь $A`C`$, если $A` \in \overset{\frown}{A``A```}$. $\angle OA`C` = \beta$ (β – угол от вертикали до $OA`$).

Тогда из $\Delta OA_1A`$

$$A`C` = 2R \cdot \cos\beta. \tag{15}$$

Если т. A_0 лежит слева от вертикали, то все формулы остаются верными, только угол β_0 будет иметь отрицательные значения.

На основе теоретических изысканий установлены высоты слоя материала:

$$h_o = h_1 \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos\alpha} \text{ при } S_z < 0{,}5 \text{ и } h_0 = R \text{ при } S_z \geq 0{,}5; \tag{16}$$

Для дуги $\overset{\frown}{A_0A``}$ высота слоя материала – $h_1 = R - \frac{R \cdot \cos(0.5 \cdot \gamma)}{\cos(\alpha - \beta)}$;

для дуги $\overset{\frown}{A``A```}$ – $h_1 = 2R \cdot \cos(\beta)$;

для дуги $\overset{\frown}{A```A_1}$ – $h_1 = 0$.

Проведем численные исследования по определению угла γ на основе ф. 4.

Численные значения площади сегмента S (м^2) указаны на рис. 3, где номер диаметра окружности D (м) по горизонтали, а номер степени заполнения S_z – по вертикали.

S' =

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000008	0.000049	0.000159	0.000283	0.000503	0.000785	0.001767
2	0.000016	0.000098	0.000318	0.000565	0.001005	0.001571	0.003534
3	0.000024	0.000147	0.000477	0.000848	0.001508	0.002356	0.005301
4	0.000031	0.000196	0.000636	0.001131	0.002011	0.003142	0.007069
5	0.000039	0.000245	0.000795	0.001414	0.002513	0.003927	0.008836
6	0.000047	0.000295	0.000954	0.001696	0.003016	0.004712	0.010603
7	0.000055	0.000344	0.001113	0.001979	0.003519	0.005498	0.01237
8	0.000063	0.000393	0.001272	0.002262	0.004021	0.006283	0.014137
9	0.000071	0.000442	0.001431	0.002545	0.004524	0.007069	0.015904

Sz =

	0
0	0
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9

D =

	0
0	0.01
1	0.025
2	0.045
3	0.06
4	0.08
5	0.1
6	0.15
7	0.2
8	0.25
9	0.3

Рис. 3. Расчетные значения площади сегмента S (м^2) при значениях диаметра окружности D (по горизонтали) и степени заполнения S_z (по вертикали)

В процессе подбора численных значений центрального угла γ требовалось определить, при каких значениях γ, R, S_z у выражения (4) левая и правая часть равны, т.е. приравнять их разность к нулю. Для этого находили точку перехода знака от «минус» к «плюс», определяя разность между правой и левой частями выражения (9).

Интервал указанных разностей G_{000} и G_{001} (как показателя несоответствия нулю разности значений правой и левой частей) составляет 0,1° (рис. 4) относительно численных значений углов γ. При G_{000} значения отрицательны, а для G_{001} значения положительны. Следовательно, на указанном интервале значений угла γ разность значений равна нулю, т.е. с указанной погрешностью найдены искомые значения угла γ.

Численные результаты подбора значений центрального угла γ (град.), при стремлении разности правых и левых частей к нулю, представлены на рис. 5. В столбцах порядковые номера диаметра окружности D в численном эксперименте; а номера строчек соответствуют степени заполнения емкости S_z.

Учитывая, что независимо от диаметра окружности, значения центрального угла γ постоянны, то основным показателем для определения центрального угла γ, соответствующего сегменту материала, является степень заполнения емкости.

Для удобства расчетов произведем аппроксимацию значений угла γ относительно степени заполнения S_z.

Результаты численных исследований. Для обоснования выбора типа уравнения регрессии использовался ряд зависимостей. После обработки исходных данных выявляли конкретные функциональные модели.

G000 =

0	0	0	0	0	0	0
-9.828·10-4	-9.828·10-4	-9.828·10-4	-9.828·10-4	-9.828·10-4	-9.828·10-4	-9.828·10-4
-9.349·10-4	-9.349·10-4	-9.349·10-4	-9.349·10-4	-9.349·10-4	-9.349·10-4	-9.349·10-4
-2.626·10-3	-2.626·10-3	-2.626·10-3	-2.626·10-3	-2.626·10-3	-2.626·10-3	-2.626·10-3
-1.056·10-3	-1.056·10-3	-1.056·10-3	-1.056·10-3	-1.056·10-3	-1.056·10-3	-1.056·10-3
-3.185·10-3	-3.185·10-3	-3.185·10-3	-3.185·10-3	-3.185·10-3	-3.185·10-3	-3.185·10-3
-1.754·10-3	-1.754·10-3	-1.754·10-3	-1.754·10-3	-1.754·10-3	-1.754·10-3	-1.754·10-3
-3.094·10-3	-3.094·10-3	-3.094·10-3	-3.094·10-3	-3.094·10-3	-3.094·10-3	-3.094·10-3
-1.25·10-3	-1.25·10-3	-1.25·10-3	-1.25·10-3	-1.25·10-3	-1.25·10-3	-1.25·10-3
-5.384·10-4	-5.384·10-4	-5.384·10-4	-5.384·10-4	-5.384·10-4	-5.384·10-4	-5.384·10-4

G001 =

0	0	0	0	0	0	0
8.591·10-4	8.591·10-4	8.591·10-4	8.591·10-4	8.591·10-4	8.591·10-4	8.591·10-4
1.71·10-3	1.71·10-3	1.71·10-3	1.71·10-3	1.71·10-3	1.71·10-3	1.71·10-3
5.06·10-4	5.06·10-4	5.06·10-4	5.06·10-4	5.06·10-4	5.06·10-4	5.06·10-4
2.346·10-3	2.346·10-3	2.346·10-3	2.346·10-3	2.346·10-3	2.346·10-3	2.346·10-3
3.036·10-4	3.036·10-4	3.036·10-4	3.036·10-4	3.036·10-4	3.036·10-4	3.036·10-4
1.648·10-3	1.648·10-3	1.648·10-3	1.648·10-3	1.648·10-3	1.648·10-3	1.648·10-3
3.911·10-5	3.911·10-5	3.911·10-5	3.911·10-5	3.911·10-5	3.911·10-5	3.911·10-5
1.395·10-3	1.395·10-3	1.395·10-3	1.395·10-3	1.395·10-3	1.395·10-3	1.395·10-3
1.303·10-3	1.303·10-3	1.303·10-3	1.303·10-3	1.303·10-3	1.303·10-3	1.303·10-3

Рис. 4. Результаты расчетов (G_{000}, G_{001}) → 0 как разности значений правой и левой частей ф. 4 при подборе значений угла γ с шагом 0,1° при значениях диаметра окружности D (по горизонтали) и степени заполнения S_z (по вертикали)

γ' =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2	93.2
2	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1
3	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7
4	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9	161.9
5	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
6	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2	198.2
7	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3	217.3
8	239	239	239	239	239	239	239	239	239	239
9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9

Рис. 5. Результаты подбора значений центрального угла γ (град.) при значениях диаметра окружности D (по горизонтали) и степени заполнения S_z (по вертикали)

Функциональные модели на основе расчетных значений запишутся:
линейная модель –

$$Y_1 = 0.872 + 4.334 \cdot S_z, \quad (17)$$

коэффициент корреляции исходных и расчетных значений – r = 0.922;
полиноминальная модель 2-й степени –

$$Y_2 = 0.846 + 7.164 \cdot S_z - 3.123 \cdot S_z^2, \text{ r} = 0.952; \quad (18)$$

полиноминальная модель 3-й степени –

$$Y_3 = 0.088 + 13.777 \cdot S_z - 22.041 \cdot S_z^2 + 13.864 \cdot S_z^3, \text{ r} = 0.985; \quad (19)$$

экспоненциальная модель –

$$Y_4 = 7.928 \cdot 10^5 \cdot e^{5.466 \cdot 10^{-6} \cdot S_z} - 7.928 \cdot 10^5, \text{ r} = 0.922; \quad (20)$$

логарифмическая короткая модель –

$$Y_5 = 0.9597 \cdot ln(S_z) + 4.0289, \text{ r} = 0.921; \quad (21)$$

логарифмическая модель –

$$Y_6 = 1.8853 \cdot ln(0.0997 + S_z) + 4.3035, \text{ r} = 0.976; \quad (22)$$

степенная модель –

$$Y_7 = 5.28 \cdot S_z^{0.417} - 0.666, \text{ r} = 0.986; \quad (23)$$

логистическая модель –

$$Y_8 = \frac{4,54}{1+4,302 \cdot e^{4.897 \cdot S_z}}, \text{ r} = 0.920; \quad (24)$$

синусоидальная модель

$$Y_9 = 7.726 \cdot sin(S_z + 0.507) - 3.238, \text{ r} = 0.948. \quad (25)$$

Результаты моделирования расчетных значений по вышеуказанным уравнениям и сравнение с исходными значениями угла представлены на рис. 6.

Самая высокая корреляция (r = 0.985) с исходными значениями у полинома 3-й степени (рис. 6, *а*), который и следует использовать при описании значения центрального угла γ (град.). Соответствие исходных и расчетных значений полинома 3-й степени представлено на рис. 6, б.

Для уравнения полинома 3-й степени при степени заполнения S_z более 15% величина погрешности δ (рад.) не превышает 0,135 рад. (рис. 7). Для указанного интервала ошибка Δ (%) в абсолютных значениях не превышает 5% для исходных Y` и расчетных значений Y_3 центрального угла γ (рад.).

Результаты исследований и их обсуждение. На основе теоретических изысканий установлены показатели геометрии сегмента материала в поперечном сечении цилиндрической емкости.

Углы расположения сегмента материала определятся:

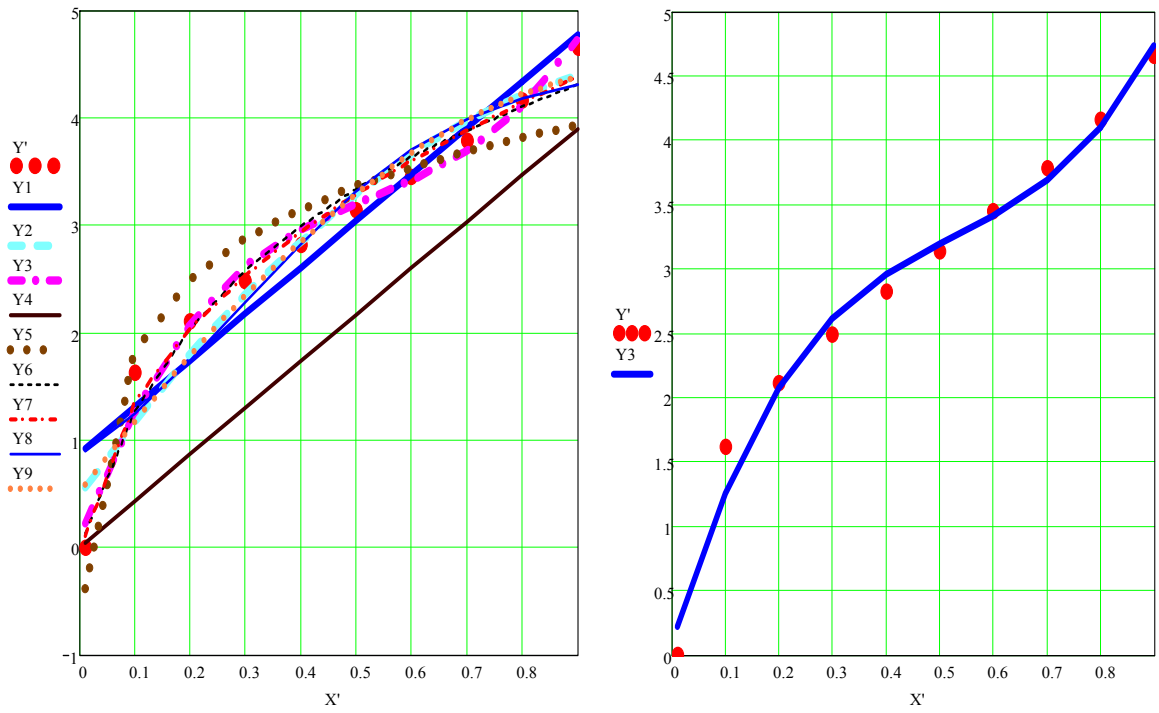
$$\beta_0 = \alpha - \frac{\gamma}{2}, \;\; \beta_1 = \alpha + \frac{\gamma}{2}, \;\; \beta_2 = \beta_1 - 2\left(\beta_1 - \frac{\pi}{2}\right). \quad (26)$$

$$\gamma = 0.088 + 13.777 \cdot S_z - 22.041 \cdot S_z^2 + 13.864 \cdot S_z^3,$$

Координаты характерных точек:

$$A_0 = (R\cos\beta_0\,;\; R\sin\beta_0); \;\; A_1 = (R\cos\beta_1\,; R\sin\beta_1); \quad (27)$$

$$A`` = (R\cos\beta_2\,; R\sin\beta_2);\; A = A` = (R\cos\beta\,; R\sin\beta);\; A``` = (0; R).$$



а) *б*)

Рис. 6. Сходимость исходных и расчетных значений для графических зависимостей:
Y` – исходные значения центрального угла γ (рад.); Y_1 – линейная модель;
Y_2 – полиноминальная модель 2-й степени; Y_3 – полиноминальная модель 3-й степени;
Y_4 – экспоненциальная модель; Y_5 – логарифмическая короткая модель;
Y_6 – логарифмическая модель; Y_7 – степенная модель; Y_8 – логистическая модель;
Y_9 – синусоидальная модель; X` = S_z – степень заполнения емкости

Для текущих (i-х) значений угла β в интервале углов (β_0; β_1), высоты (i-го) слоя материала для степени заполнения $S_z < 0{,}5$ составят, м:

$$h_{0_i} = R - \frac{R \cdot \cos(0.5 \cdot \gamma)}{\cos(\alpha - \beta_i)}.$$

При $S_z \geq 0{,}5$ высоты составят

$$h_{0_i} = R. \tag{28}$$

Для дуги $\overset{\frown}{A_0 A``}$ – $$h_{1_i} = h_{0_i} \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta_i)}{\cos\alpha}.$$

Для дуги $\overset{\frown}{A``A```}$ – $$h_{1_i} = 2R \cdot \cos(\beta_i). \tag{29}$$

Для дуги $\overset{\frown}{A```A_1}$ – $$h_{1_i} = 0.$$

Проведенные теоретические исследования позволили установить числовые значения геометрических показателей (рис. 7). Числовые значения углов (град.) размещения характерных точек для значений S_z при этом равны:

$\gamma_i \cdot \frac{180}{3.14} =$

	0
0	5.045
1	72.181
2	118.816
3	149.717
4	169.655
5	183.396
6	195.711
7	211.366
8	235.131
9	271.774

;

$\beta 0_i \cdot \frac{180}{3.14} =$

42.478
8.91
-14.408
-29.859
-39.827
-46.698
-52.855
-60.683
-72.565
-90.887

;

$\beta 1_i \cdot \frac{180}{3.14} =$

47.522
81.09
104.408
119.859
129.827
136.698
142.855
150.683
162.565
180.887

;

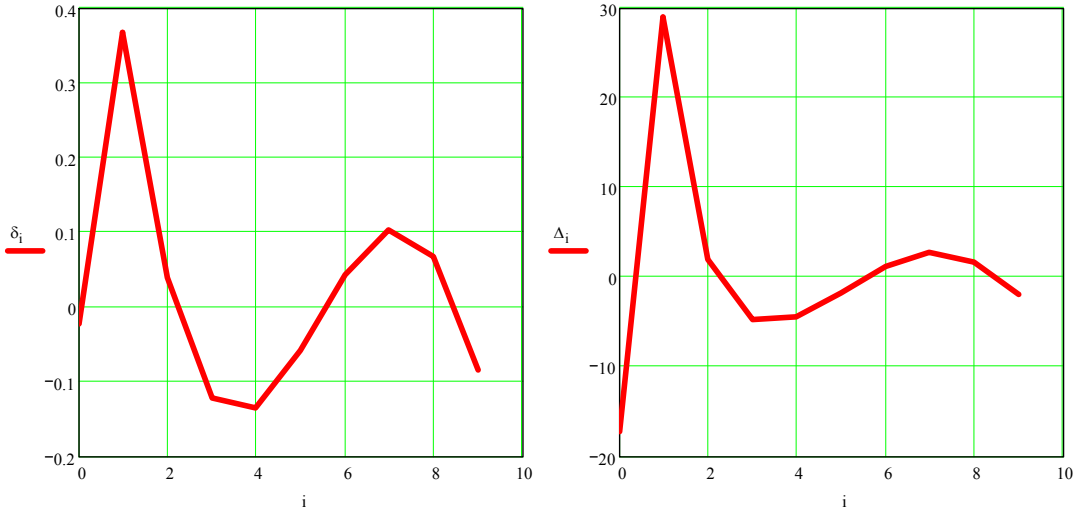
$\beta 2_i \cdot \frac{180}{3.14} =$

132.569
99.001
75.684
60.233
50.264
43.393
37.236
29.408
17.526
-0.796

;

$D := 0.18$;

$'\alpha \cdot \frac{180}{3.14} = 45$.



$Sz_i =$

	0
0	0
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9

Y' =	Y3 =	δ_i =	Δ_i =
0.2	0.224	-0.024	-17.215
1.626	1.259	0.367	28.954
2.113	2.073	0.04	1.961
2.489	2.612	-0.122	-4.755
2.824	2.96	-0.135	-4.516
3.14	3.199	-0.059	-1.774
3.457	3.414	0.043	1.196
3.791	3.687	0.104	2.666
4.169	4.102	0.067	1.645
4.656	4.741	-0.085	-1.976

Рис. 7. Влияние степени заполнения $S_z = 0{,}1 \cdot i$ на величину ошибки Δ (%) и погрешности δ (рад.) при числовых расчетных значениях степени заполнения S_z, исходных значениях Y` (рад.), расчетных значений Y3 (рад.), ошибки Δ (%) и погрешности δ (рад.)

Значения h_1 (рис. 8, *а*, *д*, *к*) изменяются по зависимостям графиков в интервале углов $\beta_0 \le \beta \le \beta_2$ в зависимости от S_z. Достигнув величин углов $\beta = \beta_2$, представленных на (рис. 8, *б*, *е*, *л*), значения h_1 изменяются далее уже по значениям, указанным на данных графиках. По достижении $\beta = 90°$ величина h_1 (рис. 8, *в*, *ж*, *м*) будет далее равно нулю. Значения h_0 (рис. 8, *а*, *в*, *ж*) при $S_z < 0{,}5$ изменяются по аналогии с выражением, близким к синусу, а при $S_z \ge 0{,}5$ высоты равны R.

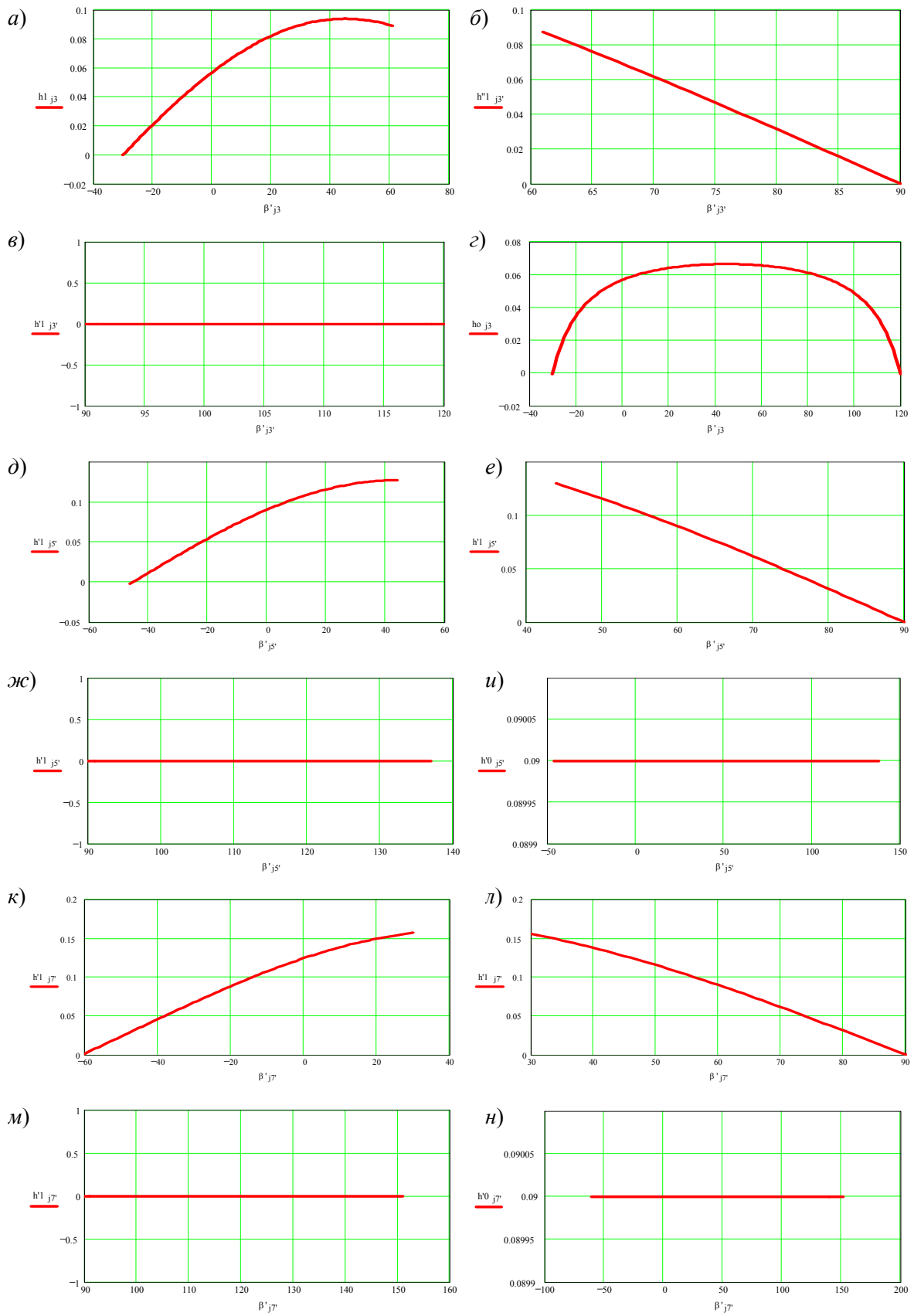


Рис. 8. График изменения высоты столба материала h_1 (*а*, *б*, *в* – по интервалу углов) и h_0 (*г*) при степени заполнения емкости 30% (*а*, *б*, *в*, *г*), 50% (*д*, *е*, *ж*, *и* – по интервалу углов) и 70% (*к*, *л*, *м*, *н* – по интервалу углов) для емкости D = 0,18 м при α = 45°

Заключение. Таким образом, установленные выражения позволяют осуществлять моделирование изменения основных геометрических показателей сегмента материала в цилиндрических емкостях, обеспечивающие расчет показателей с ошибкой, не превышающей 5%.

Список использованных источников

1. **Савиных, П. А.** Влияние конструктивно-технологических параметров дробилки зерна ударно-отражательного действия на ее энергетические показатели / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов / Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2014. – Т. 3. – С. 142 – 148.

2. **Определение** объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера / В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Н. А. Харыбина, Д. Н. Азиаткин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1(75). – С. 91 – 94.

3. **Першин, В. Ф.** Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана / В. Ф. Першин // Порошковая металлургия. – 1986. – № 10. – С. 1.

4. **Петрова, С. С.** Повышение качества смешивания кормов с обоснованием конструктивно-режимных параметров барабанного смесителя : автореф. дис. … канд. техн. наук / С. С. Петрова. – Пенза, 2004. – 16 с.

5. **Терюшков, В. П.** Численное моделирование движения материала по наклонной лопасти барабанных устройств / В. П. Терюшков, А. И. Бобылев, В. В. Коновалов / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. IV Междунар. науч.о-практ. конф. – Тамбов, 2017. – С. 40 – 49.

6. **Исследование** перемещения зернового материала устройством ворошения / Ю. М. Исаев, Н. М. Семашкин, С. А. Каленков, В. А. Злобин // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-2. – С. 289 – 293.

7. **Мачнев, В. А.** Теоретическая механика / В. А. Мачнев. – Пенза : РИО ПГСХА, 2001. – 140 с.

8. **Коновалов, В. В.** Обоснование технических средств приготовления и выдачи кормов в свиноводстве / В. В. Коновалов. – Пенза : РИО ПГСХА, 2005. – 312 с.

References

1. **Savinyh, P. A.** Vliyanie konstruktivno-tekhnologicheskih parametrov drobilki zerna udarno-otrazhatel'nogo dejstviya na ee ehnergeticheskie pokazateli / P. A. Savinyh, S.Yu. Bulatov, K. E. Mironov / Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii Energoobespechenie i ehnergosberezhenie v sel'skom hozyajstve. – 2014. – T. 3. – S. 142 – 148.

2. **Novikov, V. V.** Opredelenie ob′emnogo raskhoda ehkstrudata v zone presso-vaniya odnoshnekovogo press-ehkstrudera / V. V. Novikov, A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova, N. A. Harybina, D. N. Aziatkin // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 1(75). – S. 91 – 94.

3. **Pershin, V. F.** Model' processa smeshivaniya sypuchego materiala v pope-rechnom sechenii vrashchayushchegosya barabana / V. F. Pershin // Poroshkovaya metallurgiya. – 1986. – № 10. – S. 1.

4. **Petrova, S. S.** Povyshenie kachestva smeshivaniya kormov s obosnovaniem konstruktivno-rezhimnyh parametrov barabannogo smesitelya : avto-ref. dis. … kand. tekhn. Nauk / S. S. Petrova. – Penza, 2004. – 16 s.

5. **Teryushkov, V. P.** Chislennoe modelirovanie dvizheniya materiala po naklonnoj lopasti barabannyh ustrojstv / V. P. Teryushkov, A. I. Bobylev, V. V. Konovalov / V sbornike: Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promysh-lennyj dizajn. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Tambov, 2017. – S. 40 – 49.

6. **Isaev, Yu. M.** Issledovanie peremeshcheniya zernovogo materiala ustrojstvom vorosheniya / Yu. M. Isaev, N. M. Semashkin, S. A. Kalenkov, V. A. Zlobin // Fundamental'nye issledovaniya. – 2017. – № 11-2. – S. 289 – 293.

7. **Machnev, V. A.** Teoreticheskaya mekhanika / V. A. Machnev. – Penza : RIO PGSKHA, 2001. – 140 s.

8. **Konovalov, V. V.** Obosnovanie tekhnicheskih sredstv prigotovleniya i vydachi kormov v svinovodstve / V. V. Konovalov. – Penza, RIO PGSKHA, 2005. – 312 s.

УДК 004.946

Дедов Д. Л., Архипов А. Е., Черемисин А. П., Бочарова А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79082981042, e-mail: alexeiarh@gmail.com)

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМОЙ БЕГОВОЙ ДОРОЖКИ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Dedov D. L., Arkhipov A. E., Cheremisin A. P., Bocharova A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. +79082981042, e-mail: alexeiarh@gmail.com)

THE DEVELOPMENT OF A CONTROLLED TREADMILL FOR INTEGRATION OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY

Аннотация. В статье рассмотрена проблема реалистичного взаимодействия с объектами виртуальной среды и перемещения в ней, также предложен проект разработки всенаправленной беговой дорожки.

Ключевые слова: виртуальная реальность, управляемая всенаправленная беговая дорожка, тренажерные комплексы, обучение персонала.

Abstract. The article deals with the problem of realistic interaction with the objects of the virtual environment and movement in it; also a project to develop an omnidirectional treadmill is proposed.

Keywords: virtual reality, controlled omnidirectional treadmill, training complexes, personnel training.

Виртуальная реальность все больше и больше входит в различные сферы человеческой деятельности. К ним относятся игры, образование, кино, маркетинг, промышленность, медицина [1 – 4].

На сегодняшний день основное развитие систем виртуальной реальности идет в сторону улучшения графических возможностей и удобства использования. Увеличивается разрешение и угол обзора дисплеев в шлемах виртуальной реальности, расширяется точность и поле отслеживания положения тела человека в пространстве, улучшается звук, интегрируется технология дополненной реальности. Вместе с тем, управление персонажем и тактильные ощущения от взаимодействия с виртуальными объектами остаются на прежнем уровне, поскольку управление происходит с помощью привычных клавиатуры и мыши, либо специальных контроллеров, которые также представляют собой джойстики с кнопками и сенсорными панелями [5].

Данная проблема особенна актуальна при разработке тренажерных комплексов профессионального назначения, где требуется максимальная реалистичность для изучения и привития определенных навыков и ощущений. Конечно, в некоторых тренажерных системах возможно использование имитации профессионального оборудования, например, в медицинских тренажерах для хирургов используются электронные скальпели, позволяющие в полной мере достигнуть естественных тактильных контактов. Что же касается тренажеров с необходимостью имитации физических нагрузок – проблема остается открытой [6]. Явным примером недостатка данного подхода служит

тренажер для обучения шахтеров (рис. 1). В тренажере отрабатывается активное перемещение по виртуальной шахте, что при управлении с джойстика вызывает эффект укачивания у обучаемого.

Поэтому для решения данных проблем необходимо использование некой программно-аппаратной платформы, включающей необходимые компоненты для реализации.

На сегодняшний день существует несколько разработок, способных решить некоторые проблемы. Одна из них – игровая платформа Virtuix Omni (рис. 2). Активная область в ней представляет собой неподвижное чашеобразное полотно, покрытое материалом с низким коэффициентом трения и направляющими бороздками. Использование платформы возможно только в специальной обуви, подошва которых также покрыта скользящим материалом. Также платформа имеет специальный каркас, удерживающий пользователя в центре активной зоны. Для отслеживания движений пользователя используется сенсорный игровой контроллер для консоли Xbox 360 – Kinect.

Данная конструкция также не лишена недостатков. Устройство имеет специальные поручни, служащие в качестве каркаса безопасности, но сковывающие движения. Также становятся невозможны тренировки в спецодежде. Сама поверхность Virtuix Omni неплоская.

Рис. 1. Тренажер для обучения шахтеров

Рис. 2. Игровая платформа Virtuix Omni

Края дорожки находятся под уклоном (чтобы пользователь мог скользить), что приводит к ощущению подъема по уступу. Также минусом является невозможность имитирования особенностей рельефа местности, таких как подъем в гору, либо спуск с уступа. Таким образом, совокупность недостатков в контексте тренажерных комплексов способствует привитию неправильных навыков, что недопустимо.

Из всего вышесказанного следует необходимость разработки программно-аппаратной платформы, которая будет включать в себя всенаправленную беговую дорожку с изменяемым углом наклона, позволяющая пользователю передвигаться максимально естественно и предусматривающая возможность имитировать силу физических нагрузок (рис. 3).

Одним из возможных решений данной задачи может быть конструкция активного полотна, работающая по принципу активной системы гусениц. Активная область будет состоять из независимых друг от друга полотен, снабженных набором роликов и лент. Такие элементы позволяют перемещение, перпендикулярное основному направлению движения, что делает возможным перемещение по диагонали, и, следовательно, полное всестороннее. Сильная сторона данного подхода в том, что полотно беговой дорожки будет плоским и нескользящим. Пользователь будет перемещаться по нескольким не зависимым друг от друга лентам, а система отслеживания положения тела будет подстраивать скорость движения лент под скорость шага и направление движения.

Отслеживание положения тела выполняется на базе системы виртуальной реальности HTC Vive, и пары отслеживающих датчиков Vive tracker, надеваемых на ноги (рис. 4). Система управления будет выполнена в среде разработки Unity 2018.

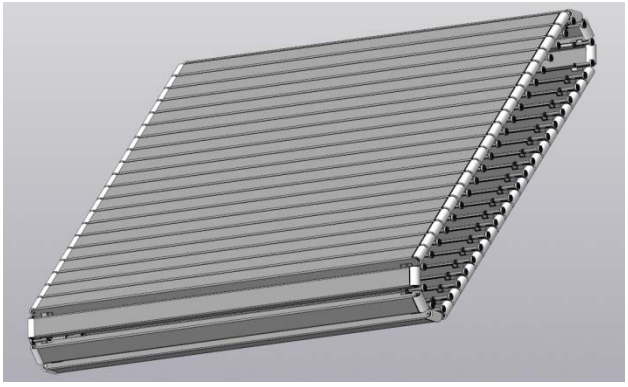


Рис. 3. Основная конструкция полотна

Рис. 4. Отслеживающие датчики для ног

Алгоритм функционирования программно-аппаратной платформы [7 – 10] позволит осуществить:

1) управление скоростью и направлением движения полотна дорожки в прямой зависимости от реального направления и скорости шага человека;

2) анализ рельефа местности виртуального пространства, что позволит задать угол наклона полотна дорожки, имитируя изменения рельефа местности.

Данный подход позволит повысить реалистичность тренажерного комплекса на основе технологий VR, поскольку перемещение в виртуальном пространстве будет происходить без эффекта «отторжения». Кроме того, это позволит осуществить оценку состояния обучаемого в стрессовых ситуациях и вывести уровень интеграции человека в виртуальную среду на новый уровень.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Разработка** адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327. – № 2. – P. 022075.

4. **Автоматизированная** информационная система обучения персонала промышленных предприятий на основе виртуальных тренажерных комплексов / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов, А. А. Руднев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 86 – 94.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Разработка** программного и методического обеспечения виртуального тренажерного комплекса / Д. Л. Дедов, М. Н. Краснянский, А. А. Руднев, М. В. Ионов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2. – С. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Т. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – C. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

References

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – T. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Razrabotka** adaptivnyh trenazhernyh sistem professional'nogo naznacheniya dlya modelirovaniya processa rasprostraneniya pozharov / M. N. Krasnyanskij, D. L. Dedov, A. D. Obuhov, A. E. Arhipov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2017. – № 3(65). – S. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 327. – № 2. – P. 022075.

4. **Avtomatizirovannaya** informacionnaya sistema obucheniya personala promyshlennyh predpriyatij na osnove virtual'nyh trenazhernyh kompleksov / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. A. Rudnev // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2013. – № 11. – S. 86 – 94.

5. **Krasnyanskij, M. N.** Obuchenie operatorov neftekhimicheskih proizvodstv s primeneniem komp'yuternyh / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. – 2011. – № 11. – S. 50 – 56.

6. **Razrabotka** programmnogo i metodicheskogo obespecheniya virtual'nogo trenazhernogo kompleksa / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskij, A. A. Rudnev, M. V. Ionov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2013. – № 2. – S. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – T. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – C. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

УДК 004.94

Подвальный С. Л., Бредихин А. В., Школьникова Ю. М.
Воронежский государственный технический университет, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7-910-34-85-562, e-mail: maypochta@yandex.ru)

ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Podvalny S. L., Bredikhin A. V., Shkolnikova Yu. M.
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh
(Tel. +7-910-34-85-562, e-mail: maypochta@yandex.ru),

AN APPROACH TO THE ORGANIZATION OF THE MULTIAGENT SYSTEM PRODUCTION

Аннотация. Мультиагентные системы в последние годы успешно используются в банковской сфере, логистике, решении военных задач. В области машиностроения современным трендом является внедрение цифровых производств и технологий интернет-вещей. На наш взгляд совмещение мультиагентных систем и средств цифрового производства позволит качественно повысить уровень управления производственными процессами. В данной статье предложен подход к организации производственной мультиагентной системы основанный на сервис-ориентированной архитектуре. Рассмотрена онтология агентов, выделены сервисы и определен механизм их взаимодействия между собой. В качестве средств коммуникации между агентами предложена спецификация xml, позволяющая организовать информационную поддержку процессов взаимодействия между агентами и сервисами. Результаты данной работы актуальны для построения мультиагентной системы в задачах управления процессами машиностроительного производства.

Ключевые слова: виртуальное моделирование, мультиагентные системы, PLM, оперативное планирование, «интернет вещей».

Abstract. Multi-agent systems are usefully employed in banking sector, logistics and military commitments. In machine-building industry the trend line is implementation of digital productions and Internet of Things concepts. In our opinion combine of digital production and multi-agent systems gives the opportunity of production control improvement. In this paper we propose the approach to the organization of a production multi-agent system based on the service-oriented architecture. The agent's technology is considered, services are separated and communication between them is defined. As the means of communication we propose the XML manifest that provides an opportunity to informational support of interaction between agents and services. The results of this work are relevant to building of a multi-agent system for production control in machine-building industry.

Keywords: virtual modeling, multi-agent systems, PLM, operational planning, Internet of things.

Введение. Задача повышения эффективности оперативного управления ресурсами в реальном времени, в условиях использования цифровых производств становится очевидной для предприятий машиностроительной отрасли. Возможность агрегировать

большие объемы технологических и производственных данных в электронном виде требует создания аналитики, и как следствие, использование ее в процессах планирования и учета производственных ресурсов. Выбирая решения на базе ERP/APS-систем, предприятия решают задачу получения идеализированного планирования производства, в тоже время без возможности адекватного реагирования на внешние изменения среды. Централизованные информационные системы не способны контролировать все компоненты производственной среды, а темп ее изменения гораздо выше скорости реакции на принятие решения для управляющей ИС.

В разрезе данных ограничений более выгодно представляется нам мультиагентный подход в задачах управления производственными процессами предприятия и его формационного обеспечения. Преимуществом данного подхода является адаптация к изменениям как внутри производственной системы, так и реакция на внешние воздействия в реальном времени. По своей сути, производственная система, как совокупность процессов и взаимодействующих ресурсов, представляется именно мультиагентной, так как обладает всеми ее онтологическими характеристиками. Преимущества и положительный опыт использования мультиагентных систем в управлении ресурсами в области логистики, управления группировками спутников, банковской сферы достаточно широко рассмотрены в работах П. О. Скобелева, G. A. Rzevski, В. И. Городецкого и других исследователей. Задача данной работы рассмотреть частные вопросы архитектуры мультиагентной системы управления ресурсами машиностроительного предприятия.

Постановка задачи. При рассмотрении вопроса организации управления ресурсами машиностроительного предприятия было выделено ряд отличительных особенностей, влияющих на характер проектирования мультиагентной системы:

– наличие спецификации изделия, определяющей его состав и конфигурацию с учетом серийности и наличие опционов;

– ключевым директивным документом является технологический процесс (комплект технологической документации), который определяет маршрут изготовления, перечень необходимой для изготовления номенклатуры ресурсов по каждой операции, нормы использования;

– последовательность и срок выполнения технологических процессов определяется технологией сборки изделия, но корректируется с учетом внешних факторов и воздействия управленческих решений;

– наличие системы нормирования материальных, трудовых и машинных ресурсов;

– поэкземплярная номенклатура ресурсов имеет свой жизненный цикл;

– в рамках производственного процесса происходит борьба за ресурсы, регулируемая человеческими факторами;

– производство не подвержено жесткой детерминации сроков выполнения операций, так как могут быть изменены под воздействием человеческих факторов и изменением производственной программы «на лету».

В реализации архитектуры МАС машиностроительного производства целесообразно выделить несколько условных типов агентов: агенты, ассоциированные с физиче-

скими ресурсами производственной среды; агенты, ассоциированные с технологическими процессами; агенты, связанные с человеческими ресурсами; агенты состава изделия.

Агенты, ассоциированные с физическими ресурсами, представляют собой виртуальных двойников оборудования, инструмента, технологического оснащения, материального обеспечения. В рамках концепции «интернета вещей» агенты получают всю необходимую информацию от своих физических двойников, что позволяет адекватно реагировать на их изменения и принимать своевременные решения при взаимодействии с другими агентами. Каждый программный агент идентифицируется в общей системе и проходит жизненный путь совместно с физическим двойником.

Программные агенты типа «технологический процесс» не имеют физической ассоциации, но связаны с совокупностью технологических данных о процессе изготовления. Рождение данного агента происходит в момент запуска в производство. Содержательная часть создается в процессе подготовки производства специалистами технологических служб и может быть представлена из систем управления инженерными данными (PDM). По завершении выполнения технологического процесса ассоциированный с ним программный агент уничтожается.

Агенты, связанные с человеческими ресурсами, предназначены для внедрения человека в мультиагентную систему. С использованием графического интерфейса происходит передача агенту информации о состоянии связанного человека и результате принятия его решения в процессе его взаимодействия с другими программными агентами системы. Данный подход делает вмешательство человека в систему открытым, запланированным и контролируемым. Вмешательство человека в систему другими способами является нежелательным.

Агенты состава изделия ассоциированы с физическими компонентами (сборочные единицы, детали, стандартные изделия и т.п.). Задачей данных агентов является обеспечить целостность конечного изделия и контроль выполнения этапов технологического процесса изготовления. Агент состава изделия проходит все состояния от полуфабриката до стадии конечного продукта, определенного конструктором-разработчиком. Поэкземплярный учет позволит поддерживать не только процессы производства, но и сервисное эксплуатационное обслуживание. Стоит отметить высокие требования к аппаратно-вычислительным ресурсам и необходимость более детального рассмотрения способов программного выполнения для реализации данного подхода.

Разработка подхода к созданию производственной мультиагентной системы. В процессе апробации прототипа мультиагентной системы машиностроительного производства были выявлены ряд проблем и ограничений, которые требуют пересмотра существующей архитектуры системы. На рисунке 1 схематично показана архитектура прототипа.

Выделим некоторые из них:

– в случае добавления новых подтипов программных агентов существует необходимость дополнительных работ по изменению программного кода, что ограничивает возможность гибкой расширяемости мультиагентной платформы;

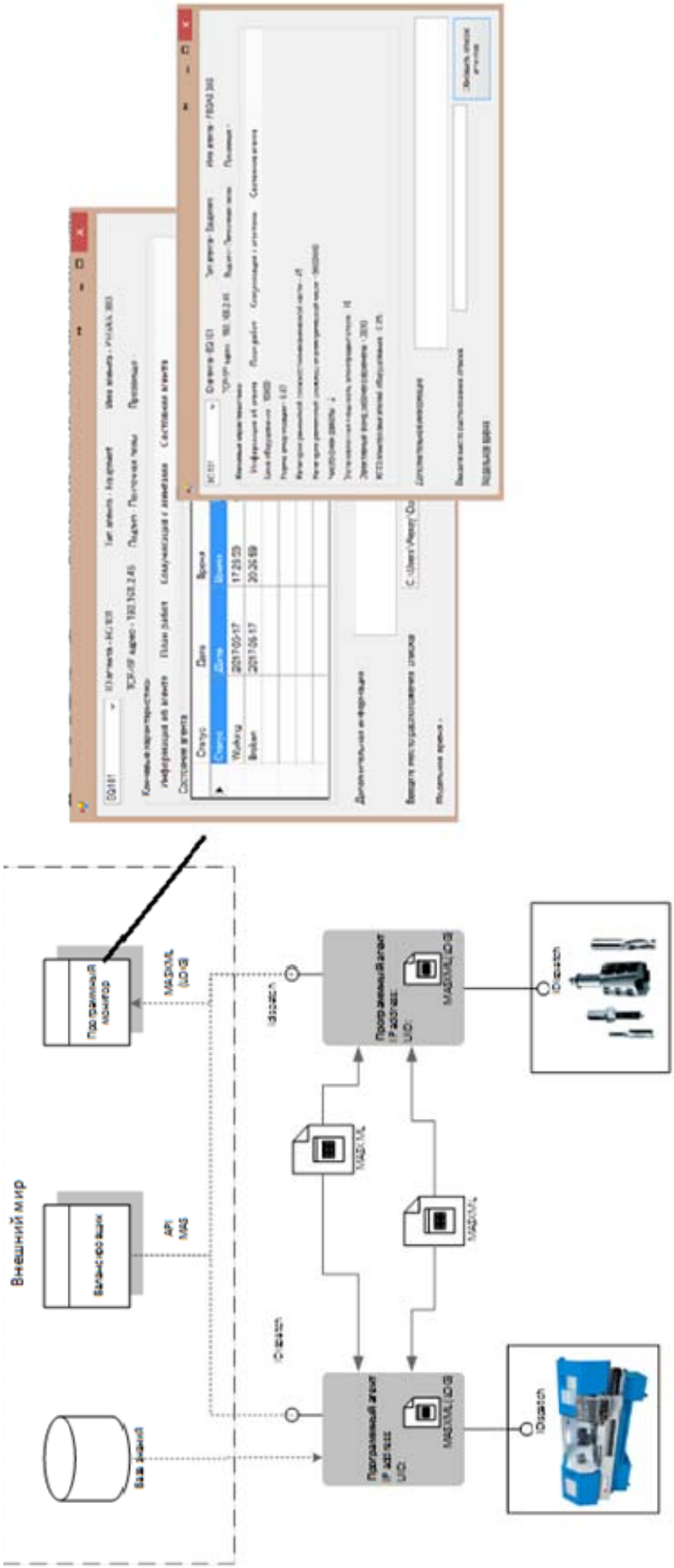


Рис. 1. Архитектура прототипа мультиагентной системы

– в процессе углубления анализа ассоциированной с агентом предметной области возникает необходимость развития его поведенческих функций, что приводит к необходимости изменения алгоритма и программного кода агента. В ряде случаев изменения не должны затрагивать связанные подтипы агентов;

– разработанная спецификация языка взаимодействия между агентами показала недостаточную гибкость в процессе развития агента. Переход на новую типизацию и архитектуру требует разработки новой редакции спецификации языка взаимодействия;

– увеличение числа активных программных агентов приводило к снижению производительности процессов взаимодействия. Использование идентификации с протоколом TCP/IP показало по производительности низкие результаты.

Новая модификация архитектуры мультиагентной системы базируется на двух ключевых подходах: реализация сервис-ориентированной организации и описание поведения агента, его реакции на внешние воздействия через управляющий файл самоопределения агента. Выделение отдельных сервисов позволит унифицировать выполнение агентами вызываемых действий. В рамках сервиса более гибко проводятся изменения, которые доступны для всех агентов в системе, что позволяет рассчитывать на дальнейшее повышение качества их работы.

Для каждого подтипа агента характерен собственный жизненный путь, определяемый его поведением, реакцией на внешние воздействия и взаимодействием с другими агентами. Описание данного пути рассматривается нами как workflow-процесс, в котором указываются действия агента, ассоциированные с обращением к сервисам. На рисунке 3 показано схематичное представление части пути агента, где определяются его состояния и действия при выполнении определенной задачи. Взаимодействие между сервисом и агентом реализуется через сообщения.

Инструментом для реализации данного подхода выступает Workflow Foundation. Данная технология входит ориентирована на визуальное программирование, использует декларативную модель программирования. В рамках описании поведения агента используются три типа процессов:

– последовательный процесс (Sequential Workflow) – переход от одного шага в другой без возвратов обратно;

– конечный автомат (State-Machine Workflow) – переход из одного состояния в другое, возможны и произвольные возвраты в предыдущие состояния;

– процесс, управляемый правилами (Rules-driven Workflow) – частный случай последовательного процесса, в котором переход на следующий шаг определяется набором правил.

В рассматриваемой нами архитектуре определены следующие сервисы:

1. Сервис обеспечения бизнес-процессов агентов. Функциональность сервиса определяется решением задачи управления поведением агента и инициализацией обращения к сервисам платформы в соответствии с заданным маршрутом работы. На стадии рождения агента создается соответствующий его подтипу экземпляр бизнес-процесса. Агент, взаимодействуя с ним, имеет возможность контроля своих внутренних процессов, и в обратную сторону при изменении внешних воздействий влияет на его выпол-

нение. Тем самым имеется возможность создания унифицированного программного «тела» агента, а его самоидентификация и жизнедеятельность определяются путем считывания набора настроек.

2. Сервис синхронизации модельного времени. В связи с тем, что агенты выполняются в единой среде, для их адекватной работы необходимо обеспечить синхронность их выполнения во времени. Акцент на применении модельного времени представляет возможность виртуализации работы мультиагентной системы и проведения экспериментов. Данные эксперименты могут показать определенный прогноз и ответить на вопрос «что будет, если» внести контролируемые изменения в систему.

3. Сервис планирования работы агента. В данном сервисе реализуется задача управлением расписанием работ агента. Данный сервис взаимодействует с базой данных планирования. Ведет учет утвержденных и зарезервированных диапазонов в расписании, проводит работы по отмене резерва при соответствующем запросе от агента. Временны́е диапазоны в расписании связаны с агентами заказчиками, что представляет возможность получения отчетов

4. Сервис принятия решения. Данный сервис обеспечивает аналитическую работу агента по принятию решения о выборе агентов-исполнителей своего заказа. Так же проводит анализ целесообразности и экономической выгоде исполнения предложенных работ от агентов-заказчиков. Архитектура сервиса направлена на возможность расширения критериев при определении оптимального варианта, что позволяет говорить о возможности повышения качества мультиагентной системы.

5. Сервис коммуникации между агентами. Сервис обеспечивает взаимодействие между агентами путем обмена сообщениями, ведет учет активных агентов и их актуального состояния. Основным форматом для передачи сообщений является xml на основе разработанной спецификации для мультиагентной системы (masxml). Технологически работа сервиса обеспечивается через программный фреймворк Windows Communication Foundation (WCF), который делает возможным построение безопасных и надежных транзакционных систем через упрощенную унифицированную программную модель межплатформенного взаимодействия.

6. Сервис технико-экономических расчетов. Данный сервис предоставляет агенту возможность проведения расчетов при обработке заказа. В дальнейшем, результаты используются в процессе принятия решения.

7. Сервис парсинга данных. Функционал сервиса направлен на извлечение необходимых данных из входящих к агенту сообщений, а также формирование ответных сообщений. В рамках всей мультиагентной системы используется единая спецификация xml для MAS.

Социальная составляющая программных агентов, заключающаяся во взаимодействии с другими сущностями (агенты, люди и т.д.), реализуется через передачу сообщений в формате xml и обменом дополнительных файлов. Данный формат также применяется при передаче информации между сервисами. Для описания структуры передаваемой информации была разработана спецификация (схема) данных xml – MAS XML. Ключевой задачей при разработке данной схемы являлось обеспечение универсальности при использовании ее программными агентами.

Выводы. Разработанный подход к созданию производственной мультиагентной системы позволяет:

– организовать работу между программными агентами в концепции «интернета вещей»;

– обеспечить их эффективное взаимодействие.

Разработанная онтология агентов в задачах управления производством и подход к настройке поведенческих функций предоставляет возможность масштабирования системы и повышения качества принятия агентами ситуационных решений. Данная мультиагентная система имеет перспективы внедрения на опытных производствах создании инновационной техники и способствовать развитию выполнение стратегии цифровой экономики России.

УДК 621.9.08

Солдатов А. В.[1], Фидаров В. Х.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (8902)9367267, e-mail: andrty_soldatoff2012@yandex.ru),
[2](Тел. (8910)8233961, e-mail:fidval@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ (УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОКАРНОГО СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Soldatov A. V.[1], Fidarov V. Kh.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (8902)9367267, e-mail:andrty_soldatoff2012@yandex.ru),
[2](Tel. (8910)8233961, e-mail:fidval@mail.ru)

STUDY OF THE INFLUENCE OF RIGIDITY (STRAINS) TECHNOLOGY OF THE LATHE ON MACHINING ACCURACY

Аннотация. В статье приводится описание программы в среде *MathCad* для исследования влияния упругих деформаций технологической системы на точность обработки.
Ключевые слова: MadCad, точность, жесткость, упругие деформации.

Abstract. This article describes the program in MathCad to study the effect of elastic deformation of the technological system on the accuracy of processing.
Keywords: MadCad, accuracy, strength, elastic deformation.

Одной из важнейших задач современного машиностроения является повышение точности, надежности и долговечности работы машин. Эти показатели работы зависят от качества изготовления деталей, из которых состоит машина и качества их сборки. Одним из важнейших показателей качества деталей является их геометрическая точность.

Технологическая система (ТС) – станок–приспособление–инструмент–заготовка (СПИЗ) представляют собой упругую систему, деформации которой в процессе обработки под действием сил резания приводят к изменению относительного положения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки и вызывают погрешность размеров и геометрической формы изготавливаемых деталей, т.е. точность обработки зависит как от сил резания, так и от жесткости технологической системы СПИЗ [1].

Жесткостью (j) технологической системы принято называть отношение составляющей силы резания (P_y) к смещению (y) режущего инструмента в направлении нормали к обрабатываемой поверхности

$$j = \frac{P_y}{y}. \tag{1}$$

Для упрощения технологических расчетов, связанных с упругими деформациями системы СПИЗ, пользуются понятием податливости, численно равной величине, обратной жесткости.

Податливость ($\omega_{тс}$) технологической системы – способность этой системы упруго деформироваться под действием внешних сил [2]

$$\omega_{тс} = \frac{y}{P_y}. \tag{2}$$

Технологическая система токарного станка состоит из последовательно соединенных звеньев и ее податливость определяется суммой податливостей отдельных звеньев – суппорта с резцом, передней и задней бабок, заготовки детали: $\omega_{тс} = \omega_{суп} + \omega_{пб} + \omega_{зб} + \omega_{заг}$, а ее жесткость – по формуле

$$\frac{1}{j_{тс}} = \frac{1}{j_{суп}} + \frac{1}{j_{пб}} + \frac{1}{j_{зб}} + \frac{1}{j_{заг}}.$$

Для случая обработки заготовки детали типа «вал» в центрах токарного станка податливость технологической системы может быть определена по формуле [1]

$$\omega_{тс} = \omega_{суп} + \omega_{пб}\left\{\frac{l - x^2}{l}\right\} + \omega_{зб}\left\{\frac{x}{l}\right\}^2 + \frac{10^7\{l - x\}^2 x^2}{3EI}, \tag{3}$$

где $\omega_{суп}$, $\omega_{пб}$, $\omega_{зб}$ – податливость суппорта передней и задней бабок соответственно; l – длина детали; x – текущая координата, характеризующая положение резца от передней бабки до точки приложения силы резания, мм; E – модуль упругости, Па; $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; I – момент инерции сечения детали, мм^2

$$I = \pi D_0^4/64 \approx 0{,}05 D_0^4, \tag{4}$$

где D_0 – номинальный диаметр детали после обработки.

Из (3) видно, что податливость (жесткость) ТС зависит от диаметра и длины обрабатываемой заготовки l и от координаты x положения резца относительно длины заготовки. В связи с этим упругие деформации ТС, вызывающие погрешности обработки, будут переменными по длине обрабатываемой заготовки и при определенных силах резания размер и форма детали могут выйти за пределы допуска. Зная параметры жесткости ТС и характеристики заготовки, можно разработать рекомендации для назначения оптимальных режимов резания, при которых погрешности обработки не выйдут за пределы допуска.

Для удобства в технических расчетах оперируют понятием средней жесткости.

Поскольку жесткость звеньев станка носит нелинейный характер в области малых нагрузок, жесткость элементов технологической системы находят экспериментально статическим методом. Сущность статического метода заключается в том, что испытуемый станок с помощью специального приспособления нагружают силой, имитирующей составляющую силы резания P_y, ступенчато от нуля до некоторой наибольшей величины; для каждой ступени нагружения измеряют смещение испытуемого элемента в направлении нормали к обрабатываемой поверхности детали. Затем производят разгружение, фиксируя остаточные смещения. По результатам нагружения и разгружения строят график зависимости $y = f(P_y)$.

При этом нагрузочная *1* и разгрузочная *2* ветви характеристики жесткости обычно не совпадают из-за наличия гистерезиса (рис. 1). Площадь петли гистерезиса характеризует величину энергии, затраченную на преодоление сил трения в стыках за один полный цикл нагружения. При выполнении технологических расчетов целесообразно пользоваться средней жесткостью, для определения которой методом наименьших квадратов устанавливают вид аппроксимирующей функции и коэффициентов при ее переменных.

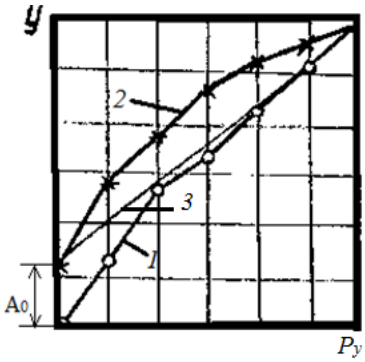


Рис. 1. Зависимость величины смещения элемента технологической системы под действием внешней нагрузки

Для определения средней жесткости нагрузочную *1* и разгрузочную кривые аппроксимируют линейной зависимостью *3* (рис. 1) вида

$$P_{yi} = \mathrm{A}_0 + \mathrm{A}_{yi}\,, \tag{5}$$

где A_0 и A_{yi} – постоянные коэффициенты, подлежащие определению.

Коэффициенты A_0 и А определяют путем совместного решения уравнений (6) и (7)

$$n\mathrm{A}_0 + \mathrm{A}_1\sum_{i=1}^{n} y_i = \sum_{i=1}^{n} p_{y_i}\,, \tag{6}$$

$$\mathrm{A}_0\sum_{i=1}^{n} y_i + \mathrm{A}_1\sum_{i=1}^{n} y_i^2 = \sum_{i=1}^{n} p_{y_i} y_i\,, \tag{7}$$

где n – количество экспериментальных точек (1, 2, ..., n); y_i – смещение узла станка, соответствующее i-му опыту, мм; p_{y_i} – величина нагрузки в i-м опыте, Н.

Решая уравнения (6) и (7) по каждому узлу станка, получают уравнение аппроксимирующих прямых, в которых коэффициент A_1 характеризует среднее значение жесткости соответствующих узлов станка.

Для проведения эксперимента используется токарно-винторезный станок модели 1М61. Нагружение элементов станка и измерение упругих деформаций производится при помощи специального приспособления, показанного на рис. 2. Приспособление устанавливается в центрах токарного станка посредствам осей *1*. Рычаги *8* жестко связаны с цапфами *7* и осями *1*. Скоба *4* имеет возможность поворачиваться на цапфах и устанавливаться в требуемое положение при помощи фиксатора *2* и сектора *9*.

Изменяя угол наклона скобы *4*, можно получать различные соотношения между усилиями, имитирующими силы резания P_y и P_z.

Угол наклона скобы при выполнении эксперимента может быть принят равным 90° и 30° к вертикальной плоскости.

Оправка *5* с шаровым наконечником устанавливается в резцедержателе станка. Нагружение осуществляется при помощи винта *3*.

Упругие смещения суппорта, передней и задней бабок станка измеряются при помощи индикаторов *10* часового типа, с точностью 0,01 мм. Величины нагрузок устанавливаются по индикатору динамометра *6* [3].

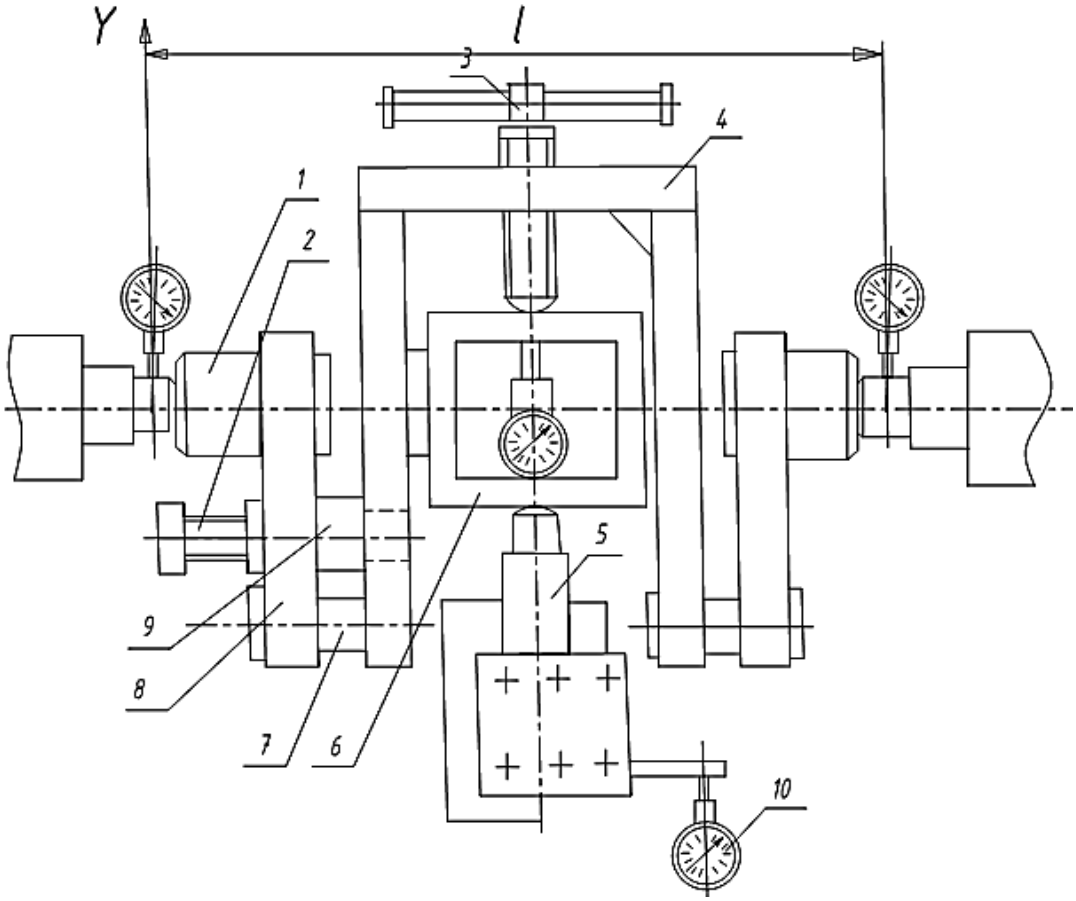


Рис. 2. Схема приспособления для нагружения и измерения упругих деформаций токарного станка

Для автоматизации обработки экспериментальных данных была разработана программа в среде Mathcad.

При запуске программы появляется окно (рис. 3).

В появившемся окне необходимо задать исходные данные для суппорта:

1) количество экспериментальных точек, *n*;
2) величина нагрузки в *i*-м опыте, P_{y_i};
3) перемещение узла станка, соответствующее *i*-му опыту, y_i;
4) податливость суппора, $\omega_{суп}$.

Программа рассчитывает сумму величины нагрузки P_{y_i}, сумму перемещений узла станка y_{is}, квадратную сумму перемещений узла станка y_{ik}, коэффициенты A_0 и A_1, радиальную составляющую сил резания P_{y_i}.

Затем задаем такие же исходные данные для передней и задней бабки. Программа рассчитывает сумму величины нагрузки P_{y_i}, сумму перемещений узла станка y_{is}, квадратную сумму перемещений узла станка y_{ik}, коэффициенты A_0 и A_1, радиальную составляющую сил резания P_{y_i}.

Программа рассчитывает значения средней жесткости каждого узла и строит графики жесткости.

Далее задаем табличные исходные данные:

1) глубину резания, t;
2) диаметр заготовки, $D_{заг}$;
3) скорость резания, v;
4) скорость подачи, s;
5) модуль упругости, E;
6) длину детали, l;
7) коэффициент, зависящий от геометрии резца, состояния режущей кромки, режимов резания и других факторов λ;
8) коэффициент, зависящий от механических свойств обрабатываемого материала, C_p;
9) коэффициент, X от 0 до 1;
10) y_{max}, y_{min}, D_{max}, D_{min}.

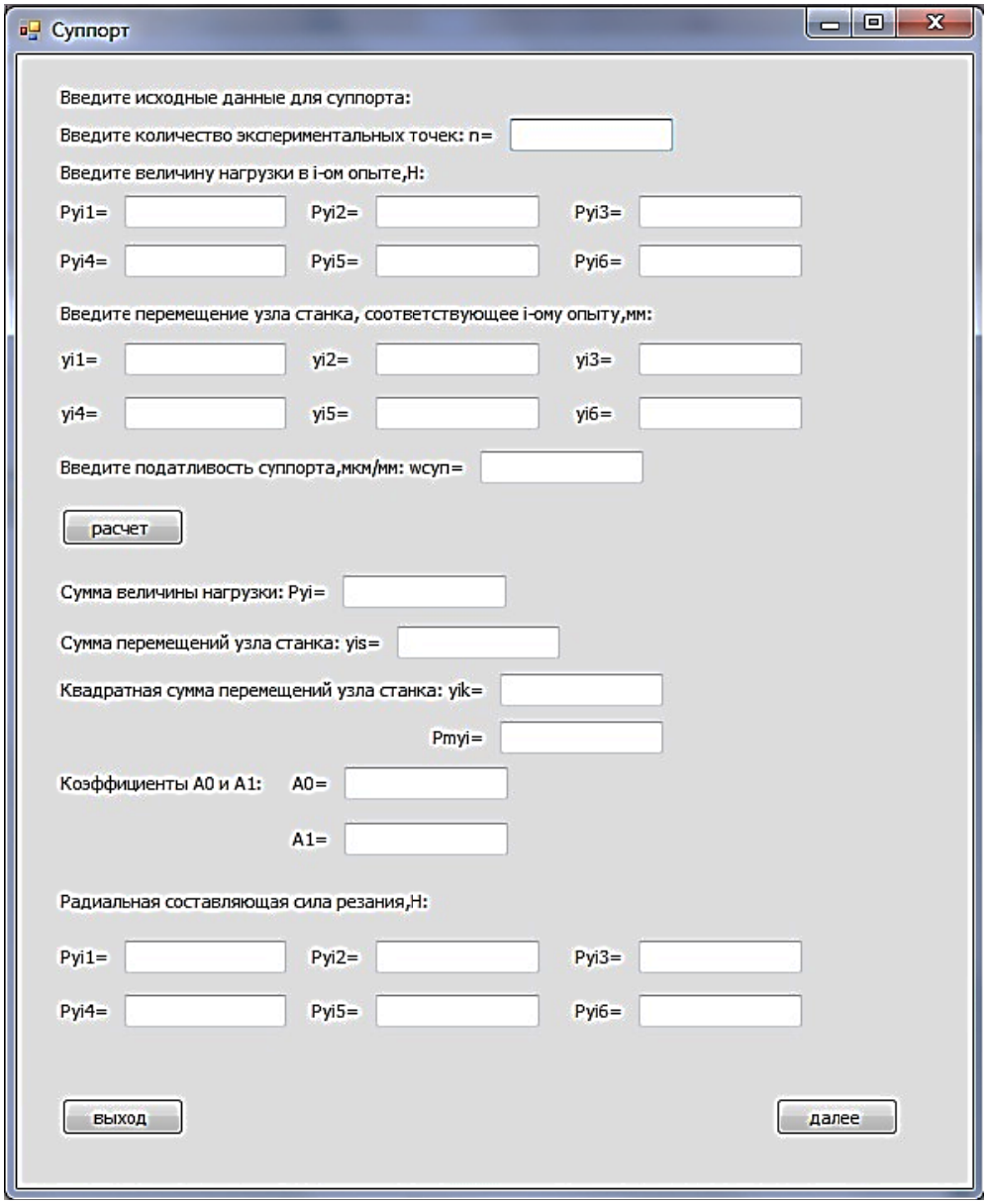


Рис. 3. Исходное окно программы

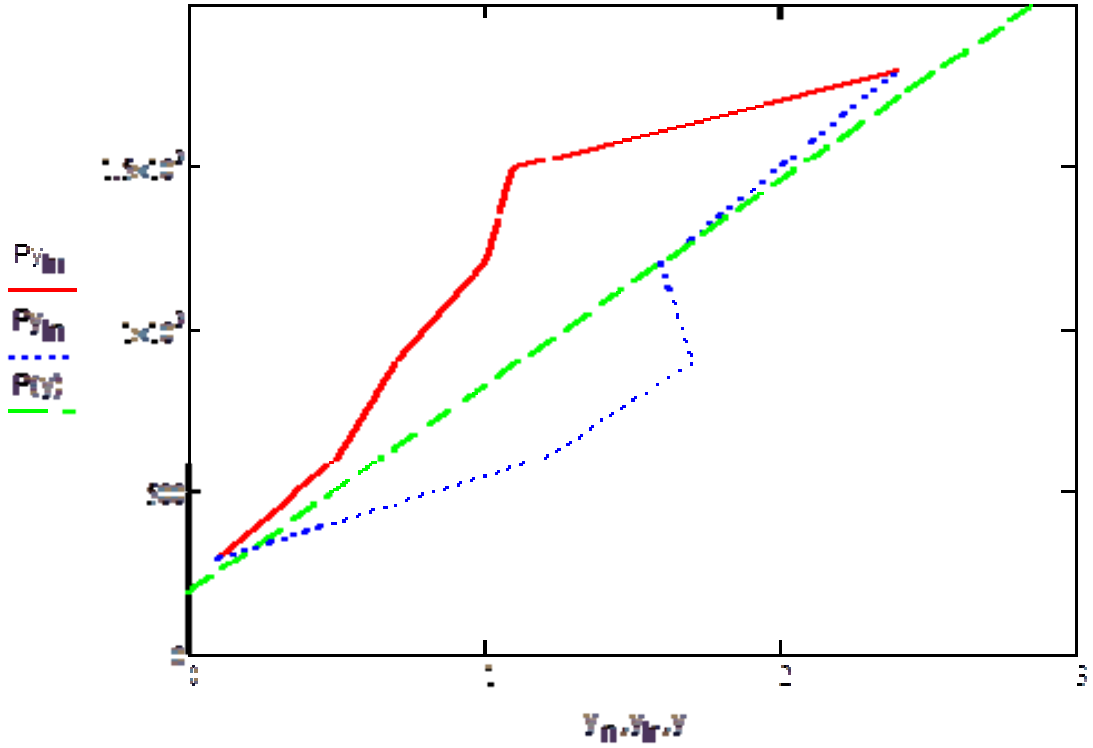


Рис. 4. График жесткости суппорта станка

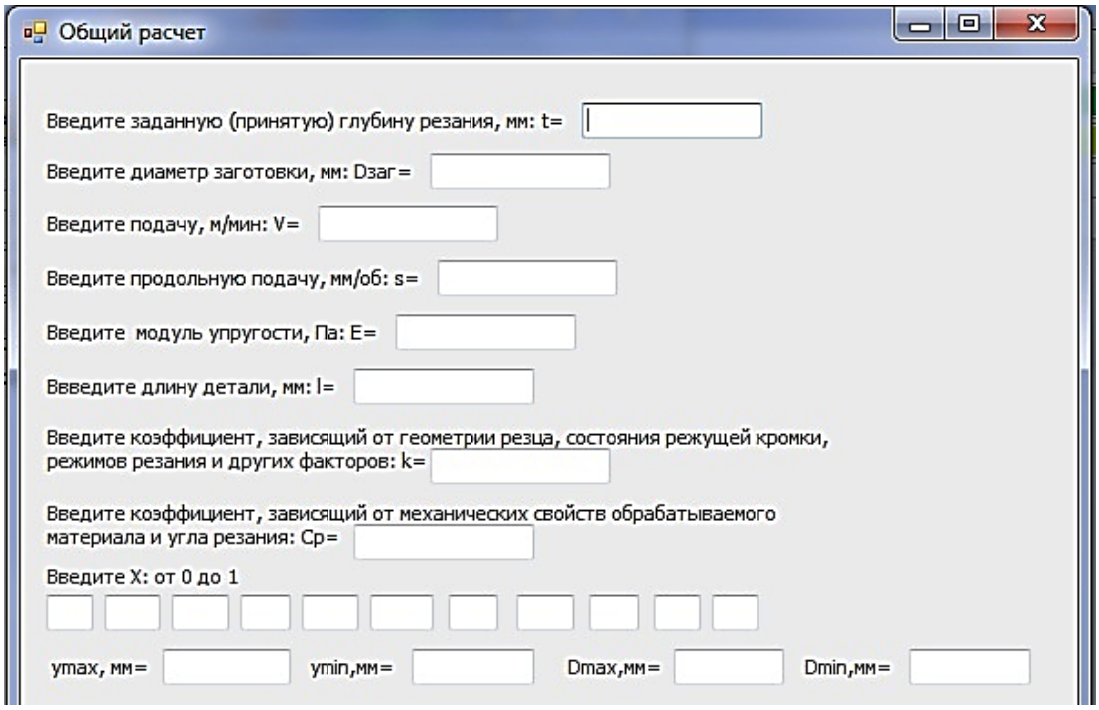


Рис. 5. Табличные исходные данные

Программа рассчитывает номинальный диаметр детали D_0, радиальную составляющую силы резания P_y, податливость для параллельных сечений ω_{ci}, упругие деформации в каждом сечении вала y_i и погрешность формы в продольном сечении $\Delta D_{\max}$.

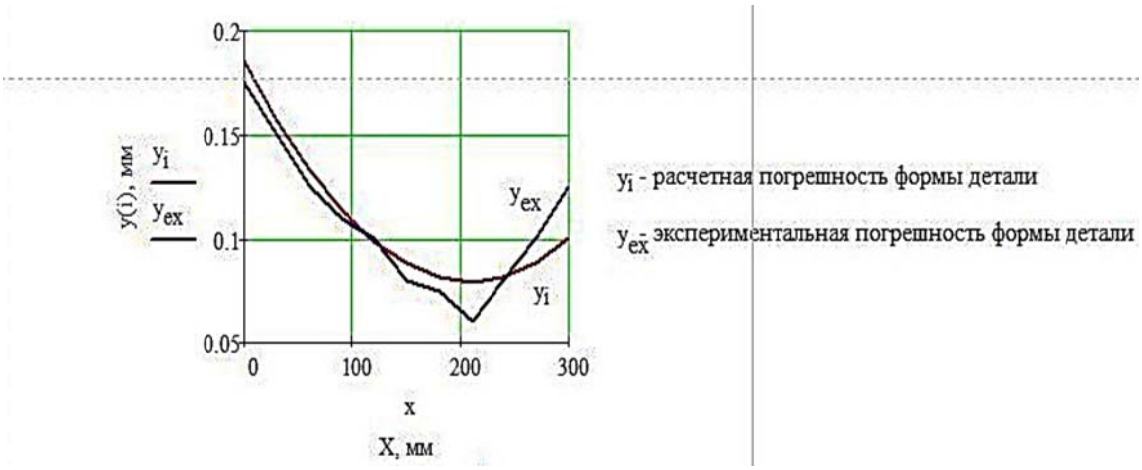


Рис. 6. График изменения погрешности формы в радиальном направлении по продольному сечению детали от задней бабки к передней

Выход из программы осуществляется нажатием на кнопку **Выход**.

Разработанная программа дает возможность прогноза погрешности формы детали в зависимости от режимов резания, и назначать такие режимы, которые гарантированно обеспечат заданную точность детали.

Список использованных источников

1. **Кован, В. М.** Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс] : учебник / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова. – М. : Изд-во «Машиностоение», 1977. – С. 60 – 65

2. **Маталин, А. А.** Технология машиностроения : учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – С. 74 – 104.

3. **Технология** машиностроения : учебное пособие / В. И. Муратов, А. Н. Преображенский, В. Н. Хватов, В. Х. Фидаров. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 34 – 50.

References

1. **Kovan, V. M.** Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. Uchebnik dlya vuzov. [Ehlektronnyj resurs] / V. M. Kovan, V. S. Korsakov, A. G. Kosilova. – M. : Izd-vo Ma-shinostoenie, 1977. – S. 60 – 65.

2. **Matalin, A. A.** Tekhnologiya mashinostroeniya. Uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov po special'nosti “Tekhnologiya mashinostroeniya, metallorezhushchie stanki i instrumenty”. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985. – S. 74 – 104.

3. **Tekhnologiya** mashinostroeniya. Uchebnoe posobie / V. I. Muratov, A. N. Preobrazhenskij, V. N. Hvatov, V. H. Fidarov. – Tambov : Izd-vo Tamb. Gos. Tekhn. Un-ta, 2003. – C. 34 – 50

УДК 66.067.55

Селиванова З. М.[1], Куренков Д. С.[1], Хоан Т. А.[2]
[1]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630030, e-mail: selivanova@ mail.jesby.tstu.ru),
[2]Информационный центр высоких технологий – войска связи Вьетнама,
г. Ханой, Вьетнам
(Тел. +84 918 926 696, e-mail: futurevip1608@mail.ru)

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Selivanova Z. M.[1], Kurenkov D. S.,[1], Hoang T. A.[2]
[1]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630030, e-mail: selivanova@ mail.jesby.tstu.ru),
[2]High Tech Information Center, Vietnam Communications Force, HaNoi, Vietnam
(Tel. +84 918 926 696, e-mail: futurevip1608@mail.ru)

VIRTUAL MODELLING OF INTELLECTUAL DATA-MEASURING SYSTEMS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS AND PRODUCTS

Аннотация. Представлено формализованное описание функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий; выполнено виртуальное моделирование системы, в результате которого созданы математические модели преобразования измерительной информации в интеллектуальной системе при проведении теплофизических измерений в программной среде Mathcad, применение которых позволяет повысить точность определения параметров теплофизических свойств исследуемых объектов.

Ключевые слова: интеллектуальная информационно-измерительная система, оперативность и точность контроля, теплофизические свойства материалов, моделирование систем.

Abstract. A formalized description of functioning of intellectual data-measuring system for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products is given; virtual modeling of system was made; it resulted in mathematical models of transformation of measuring information in intellectual system when carrying out heatphysical measurements in the program Mathcad environment which application allows increasing the accuracy of determination of parameters of heatphysical properties of the studied objects are created is executed.

Keywords: intellectual information and measuring system, efficiency and accuracy of control, heatphysical properties of materials, modeling of systems.

Функционирование интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) при проведении теплофизических измерений в условиях неопределенности связано с решением актуальной задачи формализованного описания ИИИС, что будет способствовать повышению оперативности и точности определения качественных свойств материалов и изделий из них. К неопределенности при проведении теплофизи-

ческих измерений относятся: нечеткость математического описания структуры системы и ее составляющих элементов, модели исследуемых материалов, воздействующих внешних факторов, алгоритма функционирования ИИИС, методов измерения параметров теплофизических свойств исследуемых материалов и изделий, метрологического обеспечения, информационной и измерительной ситуаций; невозможность учета всех внешних и внутренних факторов, воздействующих на исследуемые материалы, систему и процесс теплофизического измерения; ограниченность и недостаточная достоверность априорной и текущей информации. Применение виртуального моделирования ИИИС в программной среде Mathcad позволит учесть вышеуказанные виды неопределенности и решить поставленную задачу оперативного и точного контроля параметров теплофизических свойств (ТФС) материалов.

Формализованное описание состояния ИИИС при функционировании в условиях неопределенности представлено следующими множествами [1 – 3]:

а) множеством режимов работы ИИИС:

$$\boldsymbol{Y} = \{Y_i\}, \tag{1}$$

где $i = 1, 2, \ldots, n$ – число режимов ИИИС ($Y_к$ – режим контроля, $Y_и$ – режим теплофизического измерения, $Y_о$ – режим обработки результатов измерений);

б) множеством структур ИИИС:

$$\boldsymbol{S} = \{S_j\}, \tag{2}$$

где $j = 1, 2, \ldots, m$ – число структур ИИИС (структуры системы для реализации теплофизических измерений при оценке параметров теплофизических свойств исследуемых материалов, соответственно, низкой, средней и высокой теплопроводности);

в) множеством информационных ситуаций:

$$\boldsymbol{I} = \{I_k\}, \tag{3}$$

где $k = 1, 2, \ldots, l$ – число информационных ситуаций при функционировании ИИИС (информационные ситуации включают сведения из базы знаний системы о теплофизических свойствах исследуемых материалов, методах измерения, структурах ИИИС, методах метрологического анализа и обработки результатов теплофизических измерений, о воздействующих дестабилизирующих факторах, информацию пользователя и эксперта, сведения об уровнях определенности информации (детермированная, неопределенная, нечеткая);

г) множеством измерительных ситуаций:

$$\boldsymbol{X} = \{X_c\}, \tag{4}$$

где $c = 1, 2, \ldots, p$ – число измерительных ситуаций при функционировании ИИИС (измерительные ситуации формируются на основе анализа результатов тестовых теплофизических измерений и включают сведения о диапазонах теплопроводности исследуемых материалов, методах теплофизических измерений, воздействующих дестабилизирующих факторах, оптимальных режимных параметрах проведения теплофизических измерений);

д) множеством исследуемых материалов:

$$\boldsymbol{M} = \{M_N\}, \tag{5}$$

где $N = 1, 2, \ldots, d$ – количество исследуемых материалов при проведении теплофизических измерений для различных диапазонов теплопроводности материалов (низкий, средний, высокий);

е) множеством управляющих сигналов ИИИС:

$$\boldsymbol{U} = \{U_\nu\}, \tag{6}$$

где $\nu = 1, 2, \ldots, q$ – число управляющих сигналов при реализации режимов функционирования ИИИС (управляющие сигналы перевода ИИИС из режима контроля в режимы измерения и затем обработки результатов теплофизического измерения; реализации выбранного метода измерения, оптимальных режимных параметров, структуры ИИИС в зависимости от информационной и измерительной ситуаций).

На основе вышеизложенного следует, что каждое состояние функционирования ИИИС в условиях неопределенности будет характеризоваться шестеркой, состоящей из элементов шести множеств (1) – (6) ***Y***, ***S***, ***I***, ***X***, ***M***, ***U***, а состояние ИИИС при функционировании в условиях неопределенности можно записать в виде множества

$$Q = \{Y_i, S_j, I_k, X_c, M_N, U_\nu\}.$$

При формализации описания режимов функционирования ИИИС Y_i для теплофизических измерений учитываем, что каждому режиму работы ИС Y_i ставится в соответствие структура ИИИС, информационная и измерительная ситуации, исследуемый материал. В свою очередь, режимы функционирования ИИИС реализуются управляющими сигналами U_ν.

Следовательно, реализация режимов работы ИИИС осуществляется при трех функциональных ситуациях:

а) функциональной ситуации режима контроля:

$$\{y_к, U_\nu\};$$

б) функциональной ситуации режима теплофизического измерения:

$$\{y_и, U_\nu\};$$

в) функциональной ситуации режима обработки результатов измерений:

$$\{y_о, U_\nu\}.$$

Таким образом, множество состояний ИИИС при функционировании в условиях неопределенности может быть разбито на три подмножества Q_1, Q_2, Q_3, элементы которых включают элементы множества Q:

$$(Q_1, Q_2, Q_3) \in (Y \times S \times I \times X \times M \times U).$$

Для обеспечения точности определения ТФС материалов ИИИС разработаны и исследованы математические модели сигналов с измерительного зонда системы в программной среде Mathcad [3].

При передаче измерительной информации ИИИС на передаваемый сигнал влияют возмущающие воздействия случайного характера, вследствие этого введены случайные функции в математическую модель сигнала с измерительного зонда (7), соответствующего измеренной температуре при тепловом воздействии линейного нагревателя на исследуемое изделие [4 – 7]:

$$T(x,\tau) = L(\tau) \quad \frac{C}{\tau}\exp\left(\frac{D}{\tau}\right) + F(\tau), \tag{7}$$

где $T(x,\tau)$ – температура; $L(\tau)$ и $F(\tau)$ – функции, соответствующие случайным погрешностям измерительного зонда ИИИС в результате воздействия дестабилизирующих факторов, $\frac{Q}{4\pi\lambda} = C$; $\frac{x^2}{4a\tau} = D$; Q – мощность теплового воздействия; τ – время; x – расстояние от точки контроля до линейного источника тепла, λ и α – коэффициенты тепло- и температуропроводности, характеризующие ТФС исследуемых материалов и изделий.

Параметры модели (7) в среде Mathcad заданы интервальными значениями:

$$C \in [0\ldots50]; \quad D \in [100\ldots50]; \quad L(\tau) \in [0{,}5\ldots10]; \quad F(\tau) \in [0\ldots0{,}001].$$

Математическая модель преобразования измерительной информации $U(\tau)$ в ИИИС ТФС материалов представлена в общем виде [8]

$$U(\tau) = B(\tau) + F(\tau), \tag{8}$$

где $B(\tau)$ – функция, зависящая от сигнала измерительного зонда ИИИС, поступающего в измерительный канал системы; $F(\tau)$ – случайная функция, не зависящая от сигнала, который формирует шум или аддитивную помеху.

Разработана математическая модель измерительного канала ИИИС (8) при учете преобразования сигнала с измерительного зонда:

$$B(\tau) = T(x,\tau)S(\tau) = T(x,\tau)[K_U + I(\tau)] + E(\tau), \tag{9}$$

где $S(\tau)$ – функция, соответствующая процессу преобразования сигнала $T(x,\tau)$ в измерительном канале системы; K_U – коэффициент усиления усилителя измерительного канала; $I(\tau)$ – функция, описывающая искажения измерительного сигнала в усилителе; $E(\tau)$ – функция, учитывающая погрешность преобразования сигнала в аналого-цифровом преобразователе.

Модель шума, как аддитивная смесь узкополосных случайных процессов, имеет следующий вид [9]:

$$F(\tau) = A(\tau)\cos[\omega(\tau) + \varphi(\tau)], \tag{10}$$

где $A(\tau)$, $\omega(\tau)$, $\varphi(\tau)$ – соответственно, амплитуда, частота и фаза случайного сигнала помехи. Получена математическая модель измерительного канала ИИИС с использованием зависимости преобразования сигнала с измерительного зонда $B(\tau)$ (9) и модели шума (10):

$$U(\tau) = T(x,\tau)\left[K_U + I(\tau)\right] + E(\tau) + A(\tau)\cos\left[\omega(\tau) + \varphi(\tau)\right].$$

Разработанные математические модели преобразования измерительной информации в ИИИС применяются при проведении теплофизических измерений.

Виртуальное моделирование ИИИС в программной среде Mathcad позволяет для каждого режима системы выбрать функциональную ситуацию, которая обеспечивает реализацию режимов работы ИИИС на основе выбора соответствующей структуры системы, информационной и измерительной ситуаций; допустимую погрешность определения параметров теплофизических свойств материалов не более 5%, и, следовательно, формирует оптимальный алгоритм функционирования интеллектуальной системы в условиях неопределенности.

Список использованных источников

1. **Селиванова, З. М.** Информационные технологии создания интеллектуальных информационно-измерительных систем контроля / З. М. Селиванова // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 12. – С. 32 – 34.

2. **Селиванова, З. М.** Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, А. А. Самохвалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273 – 283.

3. **Берков, Н.** Применение пакета Mathcad : практикум / Н. А. Берков, Н. Н. Елисеева. – М. : МГИУ. – 2007. – 132 с.

4. **Теплофизические** измерения и приборы / Е. С. Платунов и др. – Л. : Энергия, 1973. – 256 с.

5. **Belyaev, V. P.** Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials / V. P. Belyaev, S. V. Mischenko, P. S. Belyaev // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, Is. 4, 1. – P. 392 – 398.

6. **Karavaev, I. S.** The development of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters / I. S. Karavaev, V. I. Selivantsev, Y. I. Shtern, M. Y. Shtern // Proceedings of the, January, 29 – 31, 2018, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus. – 2018. – P. 781 – 786.

7. **Shtern, Y. I.** Development of the method of software temperature compensation for wireless temperature measuring electronic instruments / Y. I. Shtern, I. S. Karavaev, M. Y. Shtern, M. S. Rogachev // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – P. 632 – 638.

8. **Selivanova, Z. M.** A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors / Z. M. Selivanova, T. A. Khoan // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, Is. 5. – P. 473 – 480.

9. **Баскаков, С.** Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Ленанд, 2016. – 528 с.

References

1. **Selivanova, Z. M.** Informacionnye tekhnologii sozdaniya intellektual'nyh informacionno-izmeritel'nyh sistem kontrolya / Z. M. Selivanova // Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. – 2009. – № 12. – S. 32 – 34.

2. **Selivanova, Z. M.** Proektirovanie intellektual'nyh informacionno-izmeritel'nyh sistem nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskih svojstv materialov. / Z. M. Selivanova, A. A. Samohvalov // Vestnik TGTU. – 2010. – T.16, № 2. – S. 273 – 283.

3. **Berkov, N.** Primenenie paketa Mathcad. Praktikum / N. A. Berkov, N. N. Eliseeva. – M. : MGIU. – 2007. – 132 s.

4. **Platunov, E. S.** Teplofizicheskie izmereniya i pribory / E. S. Platunov i dr. – L. : Ehnergiya, 1973. – 256 s.

5. **Belyaev, V. P.** Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials / V. P. Belyaev, S. V. Mischenko, P. S. Belyaev // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, Is. 4, 1. – P. 392 – 398.

6. **Karavaev, I. S.** The development of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters / I. S. Karavaev, V. I. Selivantsev, Y. I. Shtern, M. Y. Shtern // Proceedings of the, January, 29 – 31, 2018, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus. – 2018. – P. 781 – 786.

7. **Shtern, Y. I.** Development of the method of software temperature compensation for wireless temperature measuring electronic instruments / Y. I. Shtern, I. S. Karavaev, M. Y. Shtern, M. S. Rogachev // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – P. 632 – 638.

8. **Selivanova, Z. M.** A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors / Z. M. Selivanova, T. A. Khoan // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, Is. 5. – P. 473 – 480.

9. **Baskakov, S.** Radiotekhnicheskie cepi i signaly / S. I. Baskakov. – M. : Lenand, 2016. – 528 s.

УДК 621.001.57(075.8)

Акжигитов И. И., Авдеева О. В.
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза
(Тел. 8(905)3679317, e-mail: Ildar-Charty1995@mail.ru),
(Тел. 8(8412)564683, e-mail: atpgu@yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПОРНОГО УСТРОЙСТВА

Akzhigitov I. I., Avdeeva O.V.
Penza State University, Russia, Penza
(Тел. 8(905)3679317, e-mail: Ildar-Charty1995@mail.ru),
(Тел. 8(8412)564683, e-mail: atpgu@yandex.ru)

MATHEMATICAL MODEL OF PRESSURE DEVICE

Аннотация. Разработанная математическая модель отлива бумажной массы позволяет установить, что имеются три управляемых и управляющих параметра с нелинейными и перекрестными взаимными связями. В свою очередь управляющие параметры формируются специальными устройствами бумагоделательной машины. Координаты верхней планки напорного устройства x и y задаются с помощью специального механизма (манипулятора), перемещающего верхнюю планку. Напор водной суспензии, поступающей на сетку, создается напорным устройством. Моделирование математической модели выполнялось в пакете Simulink среды программирования Matlab.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, скорость сетки, высота щели выпускного устройства, координата падения струи бумажной массы на сетку, производительность бумажной массы.

Abstract. The developed mathematical model for paper pulp molding allows us to establish that there are three controllable and control parameters with nonlinear and cross-linking. In turn, the control parameters are formed by special devices of the paper machine. The coordinates of the upper bar of the pressure device x and y are set using a special mechanism (manipulator) that moves the upper bar. The pressure of the aqueous suspension entering the grid is created by the pressure device. The mathematical model was simulated in the Simulink package of the Matlab programming environment.

Keywords: paper machine, mesh speed, height of the slot of the exhaust device, the coordinate of the fall of the jet of paper pulp on the grid, the performance of paper pulp.

Равномерный отлив бумаги на машине достигается при условии постоянства количества и концентрации бумажной массы, подаваемой на машину в единицу времени при установившемся ее режиме работы.

Это условие можно изобразить уравнением баланса сухого вещества, поступающего на машину в виде бумажной массы, уходящей с машины готовой бумаги и потерь волокна со сточными водами:

$$Q = P + p = Bvq + p, \tag{1}$$

где Q – количество вещества, поступающего на машину с массой из машинного бассейна, кг/мин; P – минутная выработка бумаги на накате (без обрывов), кг; p – потеря

вещества со сточными водами, кг/мин; B – ширина бумаги на накате, м; v – скорость бумажной ленты на накате (скорость машины), м/мин; q – вес 1 м^2 бумаги, кг.

В этом уравнении ширина бумаги на накате является величиной постоянной, безвозвратные потери вещества при установившемся режиме машины также можно считать величиной постоянной, к тому же они по своему значению невелики. Поэтому уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$Q = kvq;\ \ kq = \frac{Q}{v};\ \ kv = \frac{Q}{q}, \tag{2}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Из этих выражений видно, что для того, чтобы вес квадратного метра бумаги оставался неизменным, необходимо постоянное соотношение между количеством подаваемой в единицу времени массы и скоростью машины.

Поскольку первоначальное формирование бумажного полотна и его свойств происходит на мокрой части бумагоделательной машины (БДМ), ограничимся построением математической модели отлива бумажной массы на сетку машины поскольку дальнейшие процессы обработки бумаги (сушка, каландрирование и намотка) практически не влияют на ее неравномерность.

Рассмотрим процесс напуска бумажной массы на сетку бумагоделательной машины. На рисунке 1 показана схема процесса напуска бумажной массы. Верхняя планка напорного устройства может перемещаться вверх-вниз и вправо-влево, регулируя направление и положение струи бумажной массы относительно сетки, что показано стрелками на рис. 1.

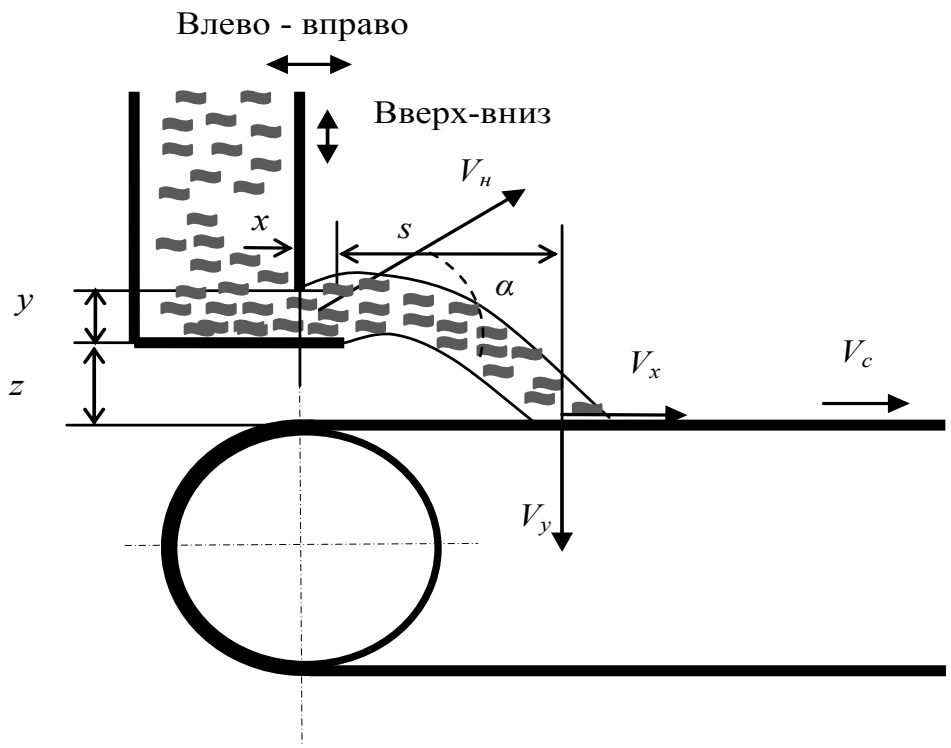


Рис. 1. Схема процесса напуска бумажной массы на сетку

Процесс характеризуется следующими основными параметрами: скоростью сетки V_c, скоростью выпуска бумажной массы из напорного устройства $V_н$ под углом α, горизонтальной скоростью бумажной массы, поступающей на сетку V_x, высотой щели выпускного устройства y, определяющей толщину струи бумажной массы, положением подвижной верхней планки относительно неподвижного основания x, высотой подъема щели выпускного устройства относительно сетки z, координатой падения струи бумажной массы на сетку s.

Для стабилизации процесса напуска бумажной массы необходимо стабилизировать координату падения струи бумажной массы на сетку s и горизонтальную скорость бумажной массы, поступающей на сетку V_x. Поэтому при построении математической модели отлива бумажной массы на сетку в первую очередь установим взаимосвязь выше названных параметров рассматриваемого процесса с остальными его параметрами.

Скорость поступления выход бумажной массы на сетку определяется по известной формуле Торричелли

$$V_н = 60\mu\sqrt{2gp},\ \text{м/мин}, \tag{3}$$

где g – ускорение силы тяжести, g = 9,81 м/с^2; p – напор массы перед выпускной щелью напорного ящика, м; μ – коэффициент вытекания массы.

Значение μ зависит от формы выпускного отверстия, наличия местных сопротивлений вытеканию потока, концентрации массы, степени ее разработки, реологических характеристик, величины потока массы. Значение μ всегда меньше 1, для современных напускных устройств μ = 0,95...0,99.

Горизонтальная $V_{нx}$ и вертикальная $V_{нy}$ составляющие скорости $V_н$ будут соответственно равны

$$\begin{aligned} V_{нx} &= V_н \cos \propto; \\ V_{нy} &= V_н \sin \propto, \end{aligned} \tag{5}$$

где $\propto = atan\frac{x}{y}$.

Если считать, что сопротивление движению бумажной массы после выхода ее из напорного устройства пропорционально ее скорости, тогда можно записать:

$$\frac{dV}{dx} = -\beta V. \tag{6}$$

Откуда горизонтальная скорость поступления массы на сетку V_x будет равна

$$V_x = V_{нx}e^{-\beta s}. \tag{7}$$

Пренебрегая сопротивлением воздуха, из очевидных физических отношений движения тела под действием силы тяжести запишем выражение для траектории движения струи бумажной массы:

$$s_y = -\frac{g}{2V_{нx}^2}s_x^2 + \frac{V_{нy}}{V_{нx}}s_x + z. \tag{8}$$

При $s_x = s$, $s_y = 0$, откуда после подстановки заданных s_x и s_y в (8) найдем искомую величину s

$$s = \frac{V_{нx}}{g}\left(V_{нy} + \sqrt{V_{нy}^2 + 2zg}\right). \quad (9)$$

Практический интерес представляет решение обратной задачи нахождения управляющих параметров процесса по его управляемым параметрам. Управляющими параметрами рассматриваемого процесса являются координаты верхней планки напорного устройства x, y и напор p, управляемыми параметрами – горизонтальная составляющая скорости бумажной массы при контакте с сеткой V_x и координата падения струи бумажной массы на сетку s.

Используя формулу (7) и (9), найдем соответственно $V_{нx}$ и $V_{нy}$:

$$V_{нx} = V_x e^{\beta s}, \quad (10)$$

$$V_{нy} = \frac{gs}{2V_{нx}} - \frac{zV_{нx}}{s}. \quad (11)$$

Зная $V_{нx}$ и $V_{нy}$, из (5) нетрудно найти угол подъема струи α:

$$\propto = arctg\left(\frac{V_{нx}}{V_{нy}}\right). \quad (12)$$

Тогда искомый напор найдем из (2.34), полагая μ = 1,

$$p = \frac{V_{нx}^2 + V_{нy}^2}{2g}. \quad (13)$$

Поскольку первоначальное формирование бумажного полотна и его свойств происходит на мокрой части БДМ, то без учета явления флокуляции суспензии волокон целлюлозы, будем считать, что степень однородности суспензии волокон в воде постоянна. Тогда, как уже отмечалось, принимая во внимание высокую стабильность скорости привода сетки БДМ, для стабилизации, вес бумажного полотна необходимо стабилизировать производительность бумажной массы Q, поступающей из напорного ящика, которая задается выражением

$$Q = \rho b y V_н, \quad (14)$$

где ρ – плотность водной суспензии; b – ширина выпускной щели напорного устройства; y – высотой щели выпускного устройства; $V_н$ – скорость выпуска бумажной массы из напорного устройства.

Задаваясь требуемым по условиям технологического процесса значением производительности Q, можно вычислить требуемое значение y, поскольку остальные члены выражения (14) заданы:

$$y = \frac{Q}{\rho b\sqrt{V_{нx}^2 + V_{нy}^2}}. \quad (15)$$

Откуда положение подвижной верхней планки относительно неподвижного основания x будет равно

$$x = \tan \propto y. \quad (16)$$

На рисунке 2 представлена Simulink – модель этого процесса.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования.

Полученная математическая модель отлива бумажной массы позволяет установить, что имеются три управляемых и управляющих параметра с нелинейными и перекрестными взаимными связями. В свою очередь управляющие параметры формируются специальными устройствами бумагоделательной машины.

Координаты верхней планки напорного устройства x и y задаются с помощью специального механизма (манипулятора) перемещающего верхнюю планку.

Напор водной суспензии, поступающей на сетку, создается напорным устройством.

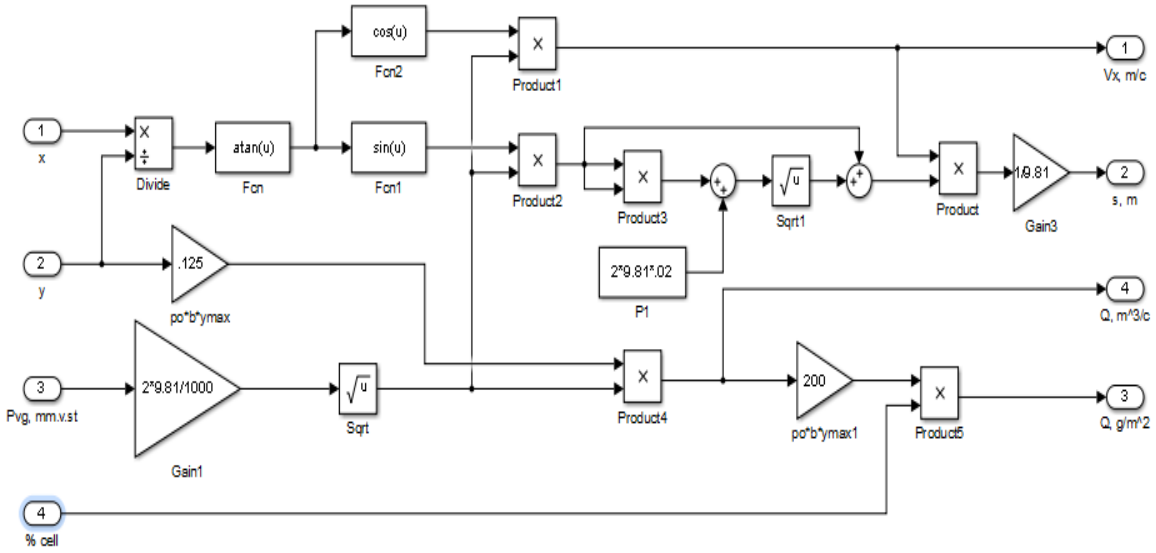


Рис. 2. Simulink-модель процесса отлива бумажной массы

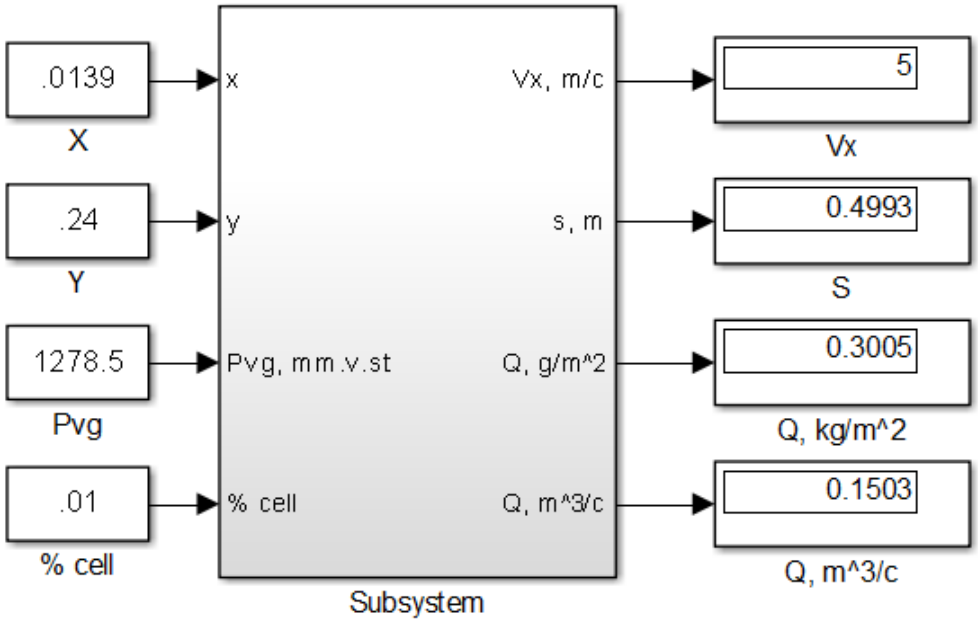


Рис. 3. Результаты моделирования

Список использованных источников

1. **Иванов, С. Н.** Технология бумаги / С. Н. Иванов – М. : Изд-во «Школа бумаги», 2006. – 310 с.

2. **Дунаев, Д. В.** Системный подход к обеспечению требуемых печатных свойств бумаги на основе информации о качестве печати : дис. … канд. техн. наук / Д. В. Дунаев. – СПб., 2006. – 148 с.

3. **Фляте, Д. М.** Свойства бумаги : учебное пособие / Д. М. Фляте. – СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2012. – 384 с.

4. **Технология** целлюлозно-бумажного производства : в 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. – СПб. : Политехника, 2004. – 315 с.

5. **Технология** целлюлозно-бумажного производства : в 3 т. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства бумаги и картона. – СПб. : Политехника, 2005. – 423 с.

References

1. **Ivanov, S. N.** Tekhnologiya bumagi / S. N. Ivanov – M. : izd-vo “Shkola bumagi”, 2006. – 310 s.

2. **Dunaev, D. V.** Sistemnyj podhod k obespecheniyu trebuemyh pechatnyh svojstv bumagi na osnove informacii o kachestve pechati. Dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni kandidata tekhnicheskih nauk. – SPb., 2006. – 148 s.

3. **Flyate, D. M.** Svojstva bumagi: ucheb. posobie / D. M. Flyate. – SPb., M., Krasnodar : Lan', 2012. – 384 s.

4. **Tekhnologiya** cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva [Tekst] : V 3 t. T. 1. Syr'e i proizvodstvo polufabrikatov. Ch. 3. Proizvodstvo polufabrikatov. – SPb. : Politekhnika, 2004. – 315 s.

5. **Tekhnologiya** cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva : V 3 t. T. 2. Proizvodstvo bumagi i kartona. Ch. 1. Tekhnologiya proizvodstva bumagi i kartona.– SPb. : Politekhnika, 2005. – 423 s.

УДК 66.047

Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)639152, e-mail: panpost@ yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ, ВЫСЫХАЮЩЕЙ НА ПОДЛОЖКЕ

Pakhomov A. N., Gatapova N. Z., Pakhomova Yu. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 639152, e-mail: panpost@ yandex.ru)

SURFACE MODELING OF A LIQUID DROPLET DRYING ON A SUBSTRATE

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования поверхности капли жидкой дисперсной системы, высыхающей на горизонтальной подложке. Моделирование поверхности капли является принципиальной задачей в расчете процесса сушки жидких дисперсных продуктов. Это связано с сильным влиянием параметров поверхности капли на величины коэффициентов тепло- и массотдачи и значение площади поверхности испарения. В статье представлено описание разработанной экспериментальной установки для определения параметров поверхности капли. Показана некорректность допущения формы капли как элемента сегмента сферы. Представлены некоторые результаты визуализации поверхности капли для различных условий смачиваемости.

Ключевые слова: капля, подложка, поверхность, форма, моделирование, испарение, сушка, дисперсная система, смачивание.

Abstract. The article presents the results of modeling the surface of a liquid droplet dispersed system drying on a horizontal substrate. Modeling of the droplet surface is a fundamental task in calculating the drying process of liquid dispersed products. This is due to the strong influence of the droplet surface parameters on the values of the heat and mass transfer coefficients and the value of the evaporation surface area. The article presents a description of the developed experimental setup for determining the parameters of the droplet surface. The incorrectness of the assumptions about the form of drops as part of a segment of a sphere is shown. Some results of visualization of the droplet surface for different wettability conditions are presented.

Keywords: drop, substrate, surface, shape, simulation, evaporation, drying, dispersion system, wetting.

Введение. Процесс сушки капель жидких дисперсных продуктов в реальных условиях очень сложен для описания. Как правило, одновременно испаряется множество капель, процесс испарения является нестационарным и протекает в среде с неоднородным температурным полем [1]. В процессе взаимодействия поверхности капли и потока сушильного агента изменяется форма капли, а внутри капли возникает сложная циркуляция жидкой фазы. Процесс теплообмена между высыхающей каплей и сушильным агентом осуществляется, как правило, комбинированно, конвекцией и тепловым излучением [2].

Соответственно теоретическое описание процесса сушки капли является очень сложным и для моделирования этого процесса необходимо ввести ряд упрощающих предположений. Как показала практика, наиболее эффективным способом моделирова-

ния подобных процессов является построение идеализированных моделей объекта и процесса и дополнение этих моделей определенными поправками, учитывающими влияние различных факторов. При этом влияние некоторых усложняющих модель факторов может быть исключено [3].

При моделировании процесса сушки капель жидких дисперсных систем на твердых диффузионно-непроницаемых подложках важнейшую роль играет корректное моделирование поверхности капли [1]. Форма поверхности капли, лежащей на подложке, зависит от величины краевого угла смачивания, значения коэффициента поверхностного натяжения, угла наклона подложки, характера закрепления линии контакта периметра капли с подложкой, наличия или отсутствия обдува, скорости и направления потока сушильного агента.

Моделирование поверхности капли представляет большой интерес не только в описании процессов сушки, но и для таких процессов как экстрагирование, осаждение, коагуляция, флотация, процессы пропитки и нанесения покрытий.

Экспериментальная часть. Для экспериментального изучения формы поверхности капли, находящейся на подложке, нами использовалась специальная установка (рис. 1). Установка состоит из цифрового измерительного микроскопа *1*, устройства позиционирования подложки в заданном положении *2*, черного кожуха *3* и системы освещения *4*, позволяющей минимизировать блики на поверхности фотографируемой капли.

Капля жидкости заданного объема дозировалась на подложку, расположенную под определенным углом, и производилась макросъемка капли с различных ракурсов. Основными для анализа были фотографии, сделанные в проходящем и отраженном свете сбоку (перпендикулярно плоскости подложки), и сверху (параллельно плоскости подложки).

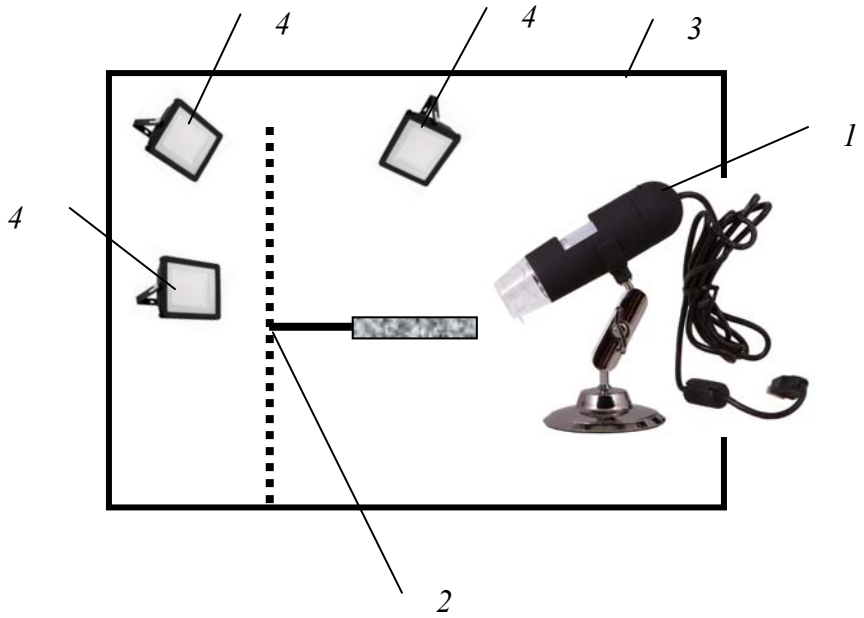
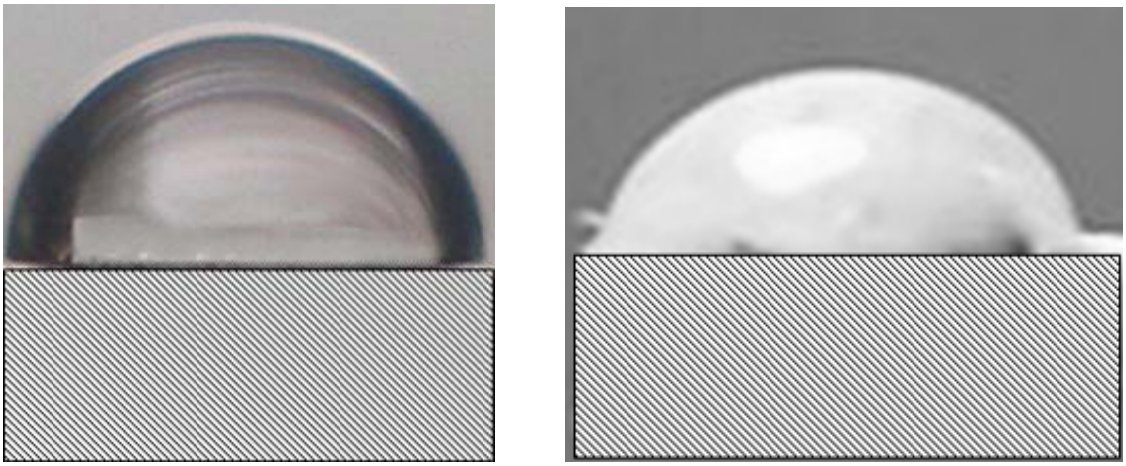


Рис. 1. Установка для получения характеристик поверхности капли, лежащей на подложке

Полученные фотографии анализировались в графическом редакторе в целях получения экспериментальных данных по величине краевого угла смачивания, размеров капли (в частности максимальной высоты капли), периметра смачивания. Также получали вид профиля капли.

В качестве основных экспериментальных подложек использовалась фторопластовая и алюминиевая подложка. В качестве исследуемых жидкостей использовалась вода и жидкая послеспиртовая барда. На рисунке 2 представлена фотография капли жидкой послеспиртовой барды на фторопластовой подложке.



а) *б*)

Рис. 2. Фотография капли жидкой послеспиртовой барды на подложке:
а – фторопласт; *б* – алюминий

В результате обработки экспериментальных данных для воды и фторопласта угол смачивания составил около 113°, для воды и алюминия – 55°. Результаты обработки экспериментальных данных для промышленных жидких дисперсных продуктов показал, что смачиваемость подложки жидкостью сильно зависит от чистоты жидкости и чистоты поверхности, от наличия поверхностно-активных веществ, примесей и т.п. Поэтому, в зависимости от партии (а следовательно, от режима работы бражной колонны), замеренные углы смачивания послеспиртовой барды и фторопласта изменяются от 75 до 103°, послеспиртовой барды и алюминия изменяются от 45 до 90°.

Результаты моделирования. Для математического моделирования кинетики сушки капли жидкости важным является расчет формы поверхности капли в зависимости от условий смачиваемости и характера закрепления контактной линии. В некоторых моделях форму капли упрощенно принимают за сегмент шара. Покажем, что такое упрощение модели поверхности некорректно, так как оно не учитывает влияния массовых сил на искривление свободной поверхности. Оценку влияния поверхностных и массовых сил на форму поверхности капли проведем по значению числа Бонда Bo:

$$\mathrm{Bo} = \frac{\rho g h r_0}{2\sigma \sin\theta}.$$

При существенном влиянии массовых сил значение Bo ≥ 1, соответственно искривление сферической поверхности значительно. При лимитирующем влиянии поверхностных сил значение числа Bo << 1 и искривлением сферической поверхности можно

пренебречь. Приведем оценку значения числа Во для капель жидкой послеспиртовой барды заданного размера, нанесенных на алюминиевую подложку, при разном значении краевого угла смачивания:

$\rho = 1012$ кг/м^3;

$\sigma = 0{,}055$;

$g = 9{,}8$;

$r_0 = 0{,}006$ м;

$\theta \approx 45 \div 90°$ и $\delta_m \approx 0{,}002 \div 0{,}0035$ м (по результатам наблюдений);

$\delta_m(45) \approx 2$ мм;

$\delta_m(90) \approx 3{,}5$ мм;

$$\text{Во}(45°) = \frac{1012 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}002 \cdot 0{,}006}{2 \cdot 0{,}055 \cdot \sin(45)} = 1{,}27;$$

$$\text{Во}(90°) = \frac{1012 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}0035 \cdot 0{,}006}{2 \cdot 0{,}055 \cdot \sin(90)} = 2{,}12.$$

Таким образом, допущение о форме поверхности капли как сегмента сферы при моделировании будет приводить к существенной погрешности.

Для получения численной оценки отклонения истинной площади поверхности капли от площади сегмента эквивалентной сферы и истинного объема капли от объема сегмента эквивалентного шара были проведены расчеты площади поверхности капли, объема капли, размеров капли для различных случаев смачивания по методике [3].

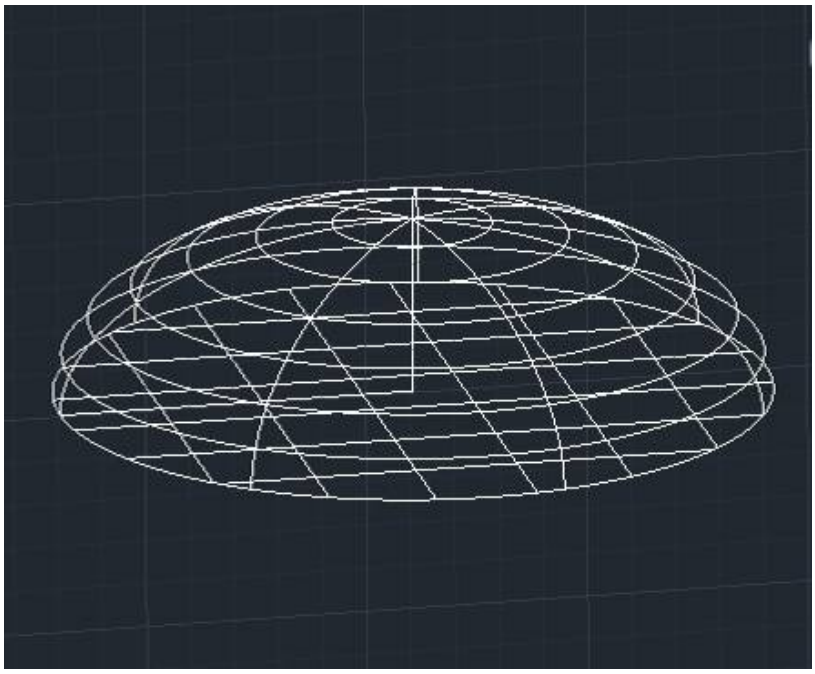
В качестве исходных данных для краевого угла смачивания был взят ряд значений: 45, 70, 90 и 103°. Для расчетов был взят радиус капли = 4 мм. В таблице 1 приведены полученные значения истинной площади поверхности капли, площади сегмента эквивалентной сферы, истинного объема капли, объема сегмента эквивалентного шара, максимальной толщины истинной капли и значения отношений площадей и объемов истинной капли и эквивалентных сегментов.

1. Сравнение истинных параметров капли с параметрами эквивалентных сегментов

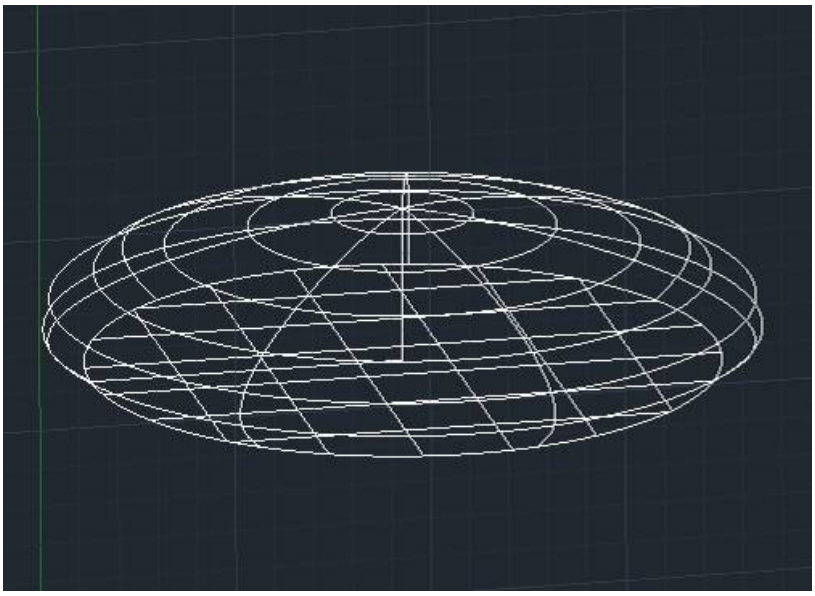
Объем капли V_k, м^3	$3{,}68 \cdot 10^{-8}$	6,321e – 8	9,032e – 8	1,169e – 7
Угол смачивания	45°	70°	90°	103°
Максимальная толщина капли dm, мм	1,285	2,017	2,596	3,164
Площадь поверхности капли S_k, м^2	$6{,}477 \cdot 10^{-5}$	1,022e – 4	1,323e – 4	1,6e – 4
Объем сегмента эквивалентного шара $V_ш$, м^3	$3{,}36 \cdot 10^{-8}$	5,582e – 8	7,63e – 8	9,742e – 8
$V_k / V_ш$	1,183	1,225	1,277	1,2
Площадь поверхности сегмента эквивалентного шара $S_ш$, м^2	$5{,}574 \cdot 10^{-5}$	6,38e – 5	7,289e – 5	8,254e – 5
$S_k / S_ш$	1,162	1,6	1,815	1,942

Как следует из данных табл. 1, расхождение величин площади и объема составляет от 16 до 27% и зависит от величины краевого угла смачивания. Таким образом, для моделирования поверхности капли, лежащей на подложке, нельзя принимать форму капли как сегмент сферы.

На рисунке 3 представлены результаты 3D-моделирования поверхности смачивающих и не смачивающих подложку жидкостей. Расчет формы поверхности проводился по уравнениям 1 – 16. Диаметр капли – 4 мм. Краевой угол – 55 и 113°.



а)



б)

Рис. 3. 3D-модель капли жидкости, лежащей на подложке:
а – краевой угол – 55°; *б* – краевой угол – 113°

Выводы. Как показали экспериментальные исследования, смачиваемость является крайне не стабильным процессом, сильно зависящим от концентрации и природы примесей в жидкости, шероховатости поверхности подложки, характера загрязнений поверхности подложки и т.п. Как показали наши исследования, величина краевого угла смачивания оказывает лимитирующее воздействие на величину площади поверхности моделируемой капли и ее форму. При этом, как правило, справочные данные по углам смачивания для большинства жидкостей приводятся в виде некоторых диапазонов значений, что приводит к необходимости экспериментального определения величины углов смачивания в конкретных условиях для возможности корректного моделирования поверхности капли.

Для моделирования процесса сушки капли особое значение имеет величина площади поверхности испарения и значения коэффициентов тепло и массотдачи. Для капли, как правило, поверхность испарения равна поверхности капли, а величины коэффициентов тепло- и массотдачи сильно зависят от формы поверхности капли. Нами показано, что для моделирования поверхности капли, лежащей на подложке, нельзя принимать форму капли как сегмент сферы, так как подобное допущение приводит к серьезным погрешностям в расчете площади поверхности (до 27% в случае величины краевого угла более 90°). Поэтому корректный расчет параметров поверхности капли оказывает в целом определяющее влияние на точность моделирования процесса сушки капли.

Список использованных источников

1. **Коновалов, В. И.** Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.

2. **Пахомова, Ю. В.** Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.

3. **Пахомов, А. Н.** Сушка капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова. – М. : Изд-во «Перо», 2013. – 122 с.

References

1. **Konovalov, V. I.** Geometriya, cirkulyaciya i teplomassoperenos pri isparenii kapli na podlozhke / V. I. Konovalov, A. N. Pakhomov, Yu. V. Pakhomova // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2011. – V. 17, № 2. – S. 371 – 387.

2. **Pakhomova, Yu. V.** Osobennosti mekhanizma i kinetiki sushki kapel' dispersij (na primere sushki poslespirtovoj bardy) / Yu. V. Pakhomova, V. I. Konovalov, A. N. Pakhomov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2011. – V. 17, № 1. – S. 70 – 82.

3. **Pakhomov, A. N.** Sushka kapel' zhidkih dispersnyh produktov / A. N. Pakhomov, Yu. V. Pahomova. – M., 2013. – 122 p.

УДК629.7.012

Черемисин А. П., Бочарова А. Н., Архипов А. Е.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89106584528, e-mail: esctarkov@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Cheremisin A. P., Bocharova A. N., Arkhipov A. E.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89106584528, e-mail: esctarkov@mail.ru)

APPLICATION OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN THE VEHICLEDESIGN

Аннотация. В статье рассмотрена технология процесса автоматизированной топологической оптимизации и ее использование при проектировании рамы мотоцикла на электротяге, а также описан процесс постановки задачи для получения данных, необходимых при прочностном расчете.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, расчет, автоматизированное проектирование, проектирование транспорта.

Abstract. The article describes the technology of the automated topological optimization process and its use in designing the electric motorcycle frame, as well as an algorithm for formulating a problem to obtain the data necessary for the strength analysis.

Keywords: topological optimization, calculation, computer-aided design, vehicle design.

Масштабы распространения электротранспорта с каждым годом все растут. Данный вид техники отличается своей энергоэффективностью, позволяет реализовывать новые сценарии автоматизированного управления транспортом, однако в данной области достаточно задач, требующих математического моделирования, оптимизации, проектирования. Оборудование на основе электрической тяги используется во многих отраслях человеческой деятельности, при проектировании транспорта, тренажерных комплексов [1, 3, 5, 6], промышленного оборудования [7]. В данной статье рассмотрим процесс проектирования рамы мотоцикла на электротяге.

Одним из возможных способов задания правильной геометрии изделия является применение автоматизированной топологической оптимизации [2]. С ее помощью инженер имеет возможность на основе требуемых характеристик получить максимально прочную конструкцию, а также уменьшить вес изделия, сэкономив при этом максимально возможное количество расходного материала.

Процесс топологической оптимизации выполняется в несколько этапов.

Первым этапом является прочностный расчет. Он начинается с того, что инженер ставит задачу, вводя ее исходные данные (условия закрепления, действующие нагрузки, механические свойства детали), задав при этом контурную геометрическую область конструкции.

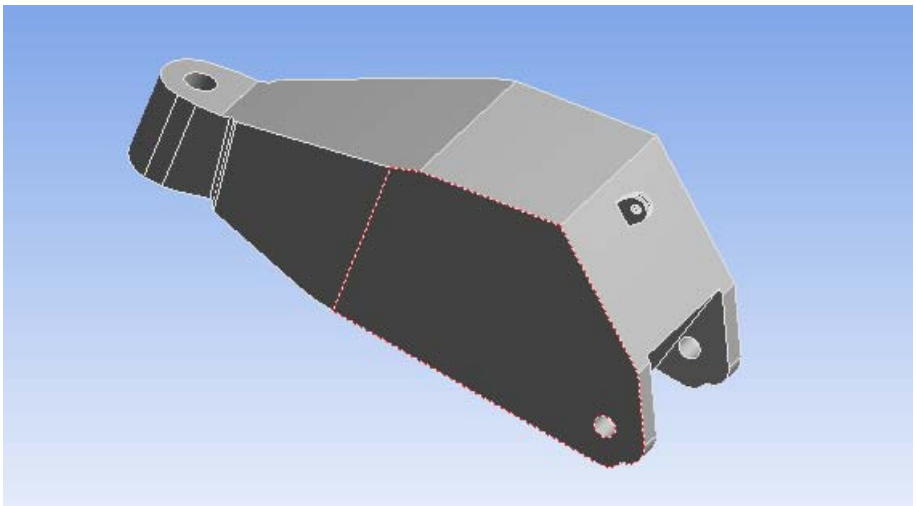


Рис. 1. Начальный вид заполненной модели рамы

Далее компьютер производит решение прочностной задачи методом конечных элементов, т.е. делит область трехмерной модели на заданное количество подобластей (элементов), иными словами, создает сетку, плотность которой задается исходя из вычислительной мощности компьютера и требуемой точности конечного результата. Для каждого элемента программа составляет и решает интегральные уравнения, учитывая при этом взаимосвязи между всеми элементами.

В результате расчета (рис. 2) можно наглядно увидеть распределение нагрузок в различных областях трехмерной модели изделия.

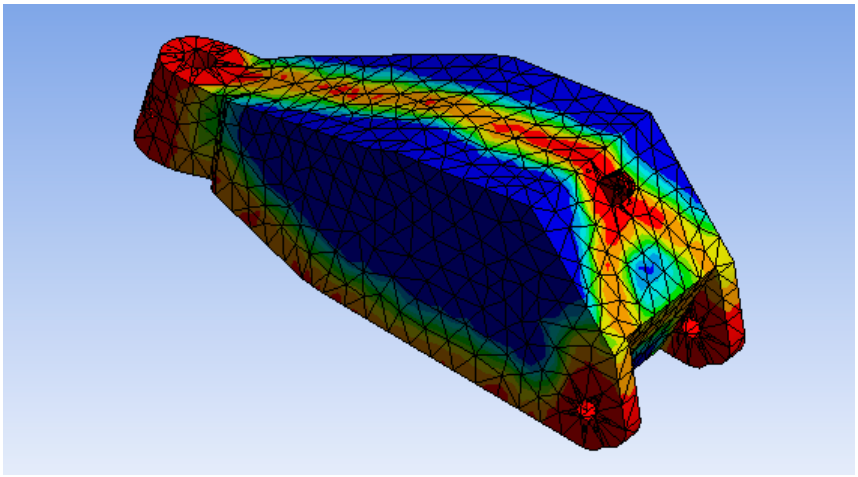


Рис. 2. Результат прочностного расчета

Следующим шагом является задание целевой функции, которой могут быть: ограничение деформации конструкции, снижение податливости, увеличение собственных частот и др. Потом проводится непосредственно топологическая оптимизация, основанная на полученных данных из прочностного расчета. Удаляются те области, которые наименее подвержены деформации.

В результате получается новая более оптимальная геометрия разрабатываемой детали (рис. 3).

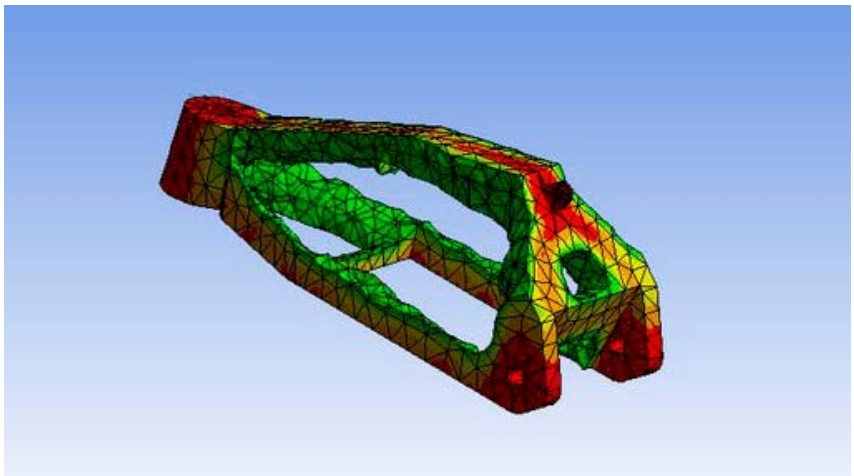


Рис. 3. Результат топологической оптимизации модели рамы

Результат, изображенный на рис. 3, является лишь показательным и не является абсолютно точным по причине отсутствия установленных данных для прочностного расчета. Данная топологическая оптимизация была произведена с целью узнать примерный вес изделия для дальнейшего составления задачи, в которой этот показатель должен учитываться. Целью этой задачи и является получение более точных данных для прочностного расчета. В ней следует учесть общий вес транспортного средства; вес дополнительного груза, а также его центр тяжести; характер нагрузки. Видов последнего для транспортного средства может быть множество, поэтому требуется решение нескольких задач для разных условий (падение с высоты под разным углом, торможение и т.д.). В итоге требуется получить величину сил, действующих на каждое крепление рамы, а также их точное направление действия.

Целью проведения топологической оптимизации модели рамы электромотоцикла является проведение дальнейших исследований с целью изучить применимость данной технологии для проектирования каркасов транспортных средств [4]. Стоит вопрос целесообразности производства рамы из сплошного материала, полученной путем топологической оптимизации взамен трубчатому каркасу.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Gardan, N.** Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing / N. Gardan, A. Schneider // Journal of Manufacturing Systems. – 2015. – Т. 37. – P. 417 – 425.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor complex / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 0220765.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Разработка** программного и методического обеспечения виртуального тренажерного комплекса / Д. Л. Дедов, М. Н. Краснянский, А. А. Руднев, М. В. Ионов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2. – С. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

References

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12,№ 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Gardan, N.** Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing / N. Gardan, A. Schneider // Journal of Manufacturing Systems. – 2015. – Т. 37. – P. 417 – 425.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor complex / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 0220765.

5. **Krasnyanskij, M. N.** Obuchenie operatorov neftekhimicheskih proizvodstv s primeneniem komp'yuternyh / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. – 2011. – № 11. – S. 50 – 56.

6. **Razrabotka** programmnogo i metodicheskogo obespecheniya virtual'nogo trenazhernogo kompleksa / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskij, A. A. Rudnev, M. V. Ionov // Voprosy sovremennoj nauki I praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2013. – № 2. – S. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

УДК 62-503.55

Сиухин А. А., Зверев М. В., Балашов П. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8(910)7578470, e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Siuhin A. A., Zverev M. V., Balashov P. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8(910)7578470, e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru)

FEATURES OF ROAD BLADING IN CONSTRUCTION

Аннотация. В статье представлены разработки, направленные на повышение качества и долговечности дорожного полотна, применяемые при профилировании. Отмечена важность строительства качественного дорожного полотна для пользователей. Рассмотрены основные аспекты дорожного строительства, влияющие на долговечность и качество дорожной одежды. Рассмотрена рекомендованная конструкция дорожной одежды. Рассмотрен принцип действия разрабатываемой лазерной ротационной системы нивелирования.

Ключевые слова: система нивелирования, дорожное строительство, дорожно-строительные машины, спецтехника, строительство, дороги.

Abstract. The article presents the design solutions used inroad blading to improve the quality and durability of the road bed. The importance of building high-quality roads is noted. The main aspects of road construction affecting the durability and quality of road beds are considered. The recommended road designis considered. The principle of operation of the developed laser rotational leveling system is considered.

Keywords: leveling system, road construction, road-building machines, special equipment, construction, roads.

Дорожное строительство – одна из наиболее развитых отраслей строительства, которая включает в себя процесс проектирования, строительства, ремонта и технического обслуживания автомобильных и шоссейных, подъездных дорог и городских улиц.

Правильная укладка слоев дорожной одежды позволит повысить срок службы дорожного полотна. Качественное дорожное полотно позволяет повысить уровень безопасности водителей и снизить количество дорожно-транспортных происшествий.

Важным моментом при укладке слоев дорожного полотна является стадия профилирования поверхности перед строительством. От точности проведения этапа профилирования зависит осадка грунта, которая при строительстве сооружений влияет на прочность фундамента и долговечность строения.

Дорожные одежды имеют строго регламентированный состав, срез показан на рис. 1. Первый нижний слой представляет собой 70 см песка, второй слой – 10 см щебня, третий слой – 33 см укатываемого бетона, четвертый слой – 26 см асфальта. Четвертый слой состоит из 10 см крупнозернистого пористого асфальта, поверх которого укладывается 8 см крупнозернистого и 8 см мелкозернистого асфальта.

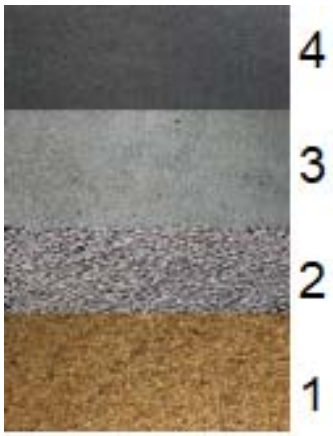


Рис. 1. Срез слоев дорожной одежды

Именно такой состав позволяет дорожному полотну наиболее долго сохранять свою форму, отводить жидкость и противостоять разрушительному воздействию окружающей среды. При дорожном строительстве влияние осадков наиболее заметно и опасно, именно талая вода, размывая нижний слой песка, образует пустоты, в которые просыпаются верхние слои, что ведет и образованию пустот в дорожной одежде или ям в дорожном покрытии. Размытие песка проявляется наиболее явно при недостаточной толщине второго слоя, слоя щебня.

Третий и четвертый слой позволяют дорожному полотну выдерживать динамические нагрузки от проезжающего транспорта. Правильная укладка четвертого слоя препятствует образованию продольной колеи на дороге.

Для повышения точности работ по профилированию дорожно-строительную технику оснащают специальным высокоточным оборудованием – системами нивелирования.

Система нивелирования – это навесное оборудование, позволяющее отслеживать положение рабочего органа дорожно-строительной машины в реальном времени. Системы нивелирования позволяют контролировать положение РО в зависимости от поступающего задания, также некоторые системы позволяют изменять положение РО без участия оператора строительной машины.

Использование подобных систем позволяет наиболее точно производить послойную укладку слоев дорожной одежды. Системы нивелирования значительно упрощают и удешевляют процесс строительства дорожного полотна. Применение системы нивелирования позволяет уменьшить количество проходов дорожно-строительной машины в режиме профилирования от 10 – 15 до 2–3 раз. Уменьшение проходов позволяет снизить количество затраченных машино-часов, способствует экономии топлива и сокращению сроков строительства.

В европейских странах запрещено использование дорожно-строительной техники без систем нивелирования на общественных объектах.

Перед разработкой системы нивелирования нами был проведен сравнительный анализ рынка используемых систем, в ходе которого наиболее перспективной для разработки была выделена лазерная система нивелирования. На рынке представлены два основных типа лазерных систем нивелирования, отличающиеся принципом строения лазерной плоскости.

В первом случае используется точечный лазер, проходящий через плоскую линзу, которая рассеивает луч, превращая его в плоскость. Имеет небольшой радиус действия и охватывает небольшую дугу окружности перед линзой. Достоинством такой системы является низкая стоимость.

Во втором – построение ЛП осуществляется путем вращения точечного лазера, системы такого типа имеют больший радиус действия, лазерная плоскость создается вокруг построителя, имеет меньшее рассеивание, но значительно большую стоимость.

Разрабатываемая система нивелирования основана на принципе работы лазерного ротационного нивелира и фоточувствительных элементов, способных определять ее положение, что позволяет контролировать высотный уровень сразу на нескольких дорожно-строительных машинах на участке (рис. 2).

Особенностью разрабатываемой системы нивелирования является возможность потокового строительства широких участков трасс и сооружений. Следовательно, все однообразные дорожно-строительные машины работают по одной выставленной высотной отметке. Это позволяет упростить работу геодезиста, так как от него требуется только разовая установка лазерного нивелира.

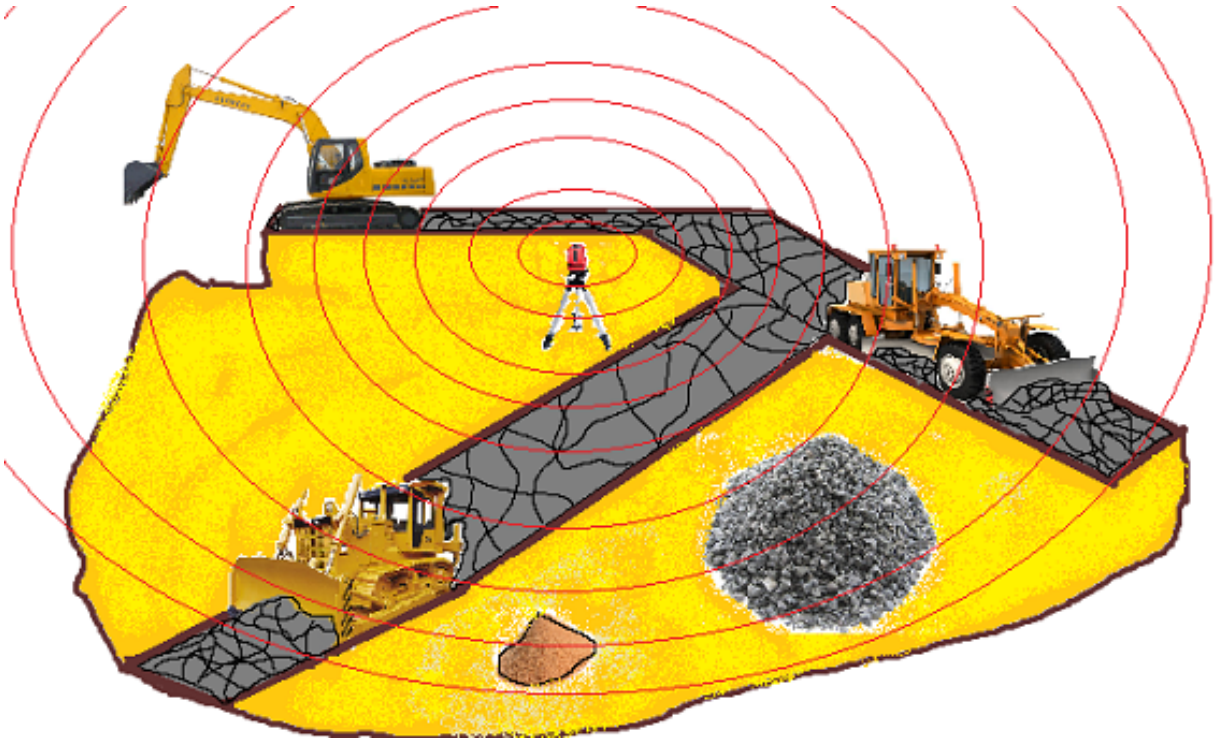


Рис. 2. Контроль положения РО нескольких дорожно-строительных машин на участке

Для работы ротационную систему нивелирования устанавливают на штативе на определенной высоте от жестко определенной высотной отметки (грунтового репера). На дорожно-строительную машину устанавливают фоточувствительный элемент, способный фиксировать лазерную плоскость. При профилировании изменение положения плоскости определяется чувствительным элементом и предается на дисплей в кабину оператора дорожно-строительной машины. Одна подобная система способна охватывать до 800 м в диаметре.

Недостатком лазерной системы нивелирования является рефракция лазерных лучей при прохождении атмосферных явлений, таких как туман. Поэтому использование лазерных систем в подобных условиях противопоказано. Еще одним недостатком использования таких систем является невозможность использования системы в условиях непрямой видимости. Препятствиями могут выступать строительные объекты, другая строительная техника, работающая на участке. При работе с лазерным оборудованием большой мощности требуется защита для глаз, потому что даже кратковременное попадание лазерного нивелира в глаза кратковременно ослепляет, что препятствует нормальной работоспособности оператора дорожно-строительной машины. Поэтому при работе с лазерным оборудованием любой мощности требуется использование защитной оптики.

При потоковом строительстве на большом участке, таком как парковки, стадионы или взлетно-посадочные полосы наиболее оправдано использование именно лазерных ротационных систем нивелирования. Применение систем нивелирования позволяет максимально близко приблизить размеры слоев дорожной одежды к стандартизованным, что делает дорожное полотно наиболее надежным при эксплуатации, препятствует его износу, образованию продольной колеи, способствует водоотводу, что препятствует образованию внутренних пустот.

Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой необходимого математического [1 – 6] и алгоритмического [7 – 10] обеспечения систем нивелирования.

Данная статья опубликована в рамках гранта № 13127GU / 2018 от 23.05.2018 (*код 0039888*), *заявка № 40034 конкурса У.М.Н.И.К. 17-12* (*б*), *Тамбовская область – 2017.* «*Разработка системы нивелирования для строительной техники*».

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «*Цифровое машиностроение*».

Список использованных источников

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Разработка** адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров // М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Автоматизированная** информационная система обучения персонала промышленных предприятий на основе виртуальных тренажерных комплексов / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов, А. А. Руднев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 86 – 94.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Разработка** программного и методического обеспечения виртуального тренажерного комплекса / Д. Л. Дедов, М. Н. Краснянский, А. А. Руднев, М. В. Ионов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2. – С. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Yu. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – T. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

References

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – T. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Razrabotka** adaptivnyh trenazhernyh system professional'nogo naznacheniya dlya modelirovaniya processa rasprostraneniya pozharov // M. N. Krasnyanskij, D. L. Dedov, A. D. Obuhov, A. E. Arhipov // Voprosy sovremennoj nauki I praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2017. – № 3(65). – S. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Avtomatizirovannaya** informacionnaya sistema obucheniya personala promyshlennyh predpriyatij na osnove virtual'nyh trenazhernyh kompleksov / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. A. Rudnev // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2013. – № 11. – S. 86 – 94.

5. **Krasnyanskij, M. N.** Obuchenie operatorov neftekhimicheskih proizvodstv s primeneniem komp'yuternyh / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. – 2011. – № 11. – S. 50 – 56.

6. **Razrabotka** programmnogo I metodicheskogo obespecheniya virtual'nogo trenazhernogo kompleksa / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskij, A. A. Rudnev, M. V. Ionov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2013. – № 2. – S. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – T. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

УДК 62-503.55

Сиухин А. А., Зверев М. В., Балашов П. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8(910)7578470, e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru)

ПРИМЕНЯЕМЫЕ СИСТЕМЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Siukhin A. A., Zverev M. V., Balashov P. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8(910)7578470, e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru)

THE SYSTEMS OF LEVELLING USED IN CONSTRUCTION OF ROADS

Аннотация. В статье приведен сравнительный анализ использования систем нивелирования, отмечены основные положительные и отрицательные стороны использования приведенных систем нивелирования. Описан принцип действия рассмотренных систем. Рассмотрены условия, при которых возможно использование всех типов систем нивелирования при строительстве.

Ключевые слова: система нивелирования, дорожное строительство, дорожно-строительные машины, спецтехника, строительство, дороги.

Abstract. The article presents a comparative analysis of the use of leveling systems; the main positive and negative aspects of using the given leveling systems are noted. The principle of operation of the considered systems is described. The conditions under which it is possible to use all types of leveling systems in constructionare considered.

Keywords: leveling system, road construction, road-building machines, special equipment, construction, roads.

Строительство дорог сегодня по сложности не уступает возведению зданий. Непрерывный рост количества машин, повышение интенсивности движения по трассам, рост грузоподъемности современных транспортных средств предъявляют более и более высокие требования к прочности и долговечности дорожного полотна.

Наиболее важным считается внедрение новых технологий развития строительства и дорожно-строительной техники для повышения качества проведения дорожно-строительных работ.

Для повышения точности работ по подготовке местности перед дорожным строительством дорожно-строительная техника, оснащенная системами нивелирования, делит местность на точные высотные уровни, на которых будет строиться фундамент. Точность уровней влияет на долговечность и сопротивление разрушению фундамента.

Система нивелирования – это навесное оборудование, позволяющее отслеживать положение рабочего органа (РО) дорожно-строительной машины в реальном времени.

На рынке представлено множество систем нивелирования, которые разделяются на группы по типу технологий, на которых они основаны: ультразвуковые, лазерные и GPS, некоторые из них позволяют контролировать положение РО в зависимости от поступающего задания, также изменять положение РО без участия оператора строительной машины.

Наиболее простыми являются ультразвуковые системы нивелирования. Они основаны на ультразвуковых датчиках, способных определять линейное расстояние до объектов. Для работы с подобной системой рабочий орган (РО) дорожно-строительной машины оснащают навесным оборудованием с ультразвуковыми датчиками, а вдоль прямолинейного строительного участка устанавливают высотные метки, соединенные на одном уровне копирной струной. Даже сама простая ультразвуковая система нивелирования позволяет оператору дорожно-строительной машины не отвлекаться от работы, так как высотное отклонение РО передается от дальномеров на дисплей кабину. Так же вместо копирной струны возможно использование любых горизонтальных объектов, например, бордюры.

Одним из недостатков можно считать то, что расстояние между копирными струнами должно быть равно ширине машины с навесным оборудованием, чтобы ультразвуковые датчики находились ровно над копирными струнами.

На рисунке 1 представлена схема работы ультразвуковой системы нивелирования. Цифрой *1* обозначена базовая поверхность, относительно которой будет профилироваться дорожное полотно. Цифрой *2* обозначен РО дорожно-строительной техники, в данном случае нож отвала автогрейдера или бульдозера. На верхней части РО устанавливается крепление для штатива ультразвуковой системы нивелирования. Цифрой *3* обозначен ультразвуковой дальномер, который фиксируется на штативе на определенном расстоянии от базовой поверхности или копирной струны. Данные о расстоянии передаются на монитор в кабину оператору дорожно-строительной машины.

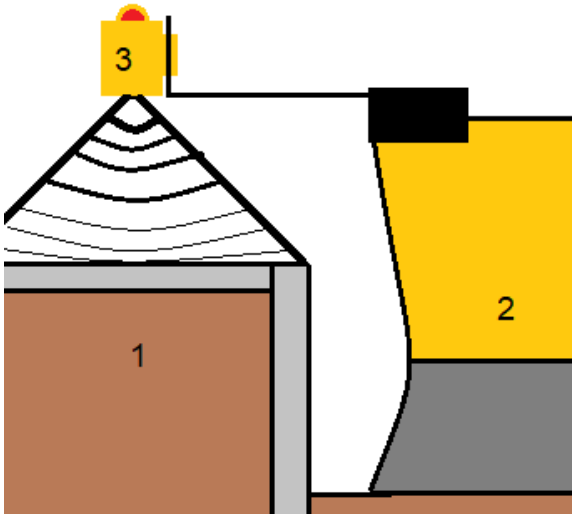


Рис. 1. Принципиальная схема работы ультразвуковой системы нивелирования

Ультразвуковые системы упрощают процесс профилирования, но требуют значительного количества времени для установки высотных меток и натяжения копирных струн при профилировании поверхности.

Следующим типом систем нивелирования являются лазерные системы нивелирования. Системы строят лазерную плоскость, которую способны улавливать фоточувствительные элементы.

Существует две основные разновидности применяемых лазерных систем нивелирования.

Первый тип – нивелиры с плоским лазером. Отличаются простотой конструкций, но сложной линзой, которая рассеивает луч лазера, превращая его в плоскость. У них небольшой радиус действия и низкая стоимость.

Второй тип – ротационные нивелиры. Имеют более сложную конструкцию, которая вращает призму, создавая лазерную плоскость. У них больший радиус действия и бóльшая стоимость по сравнению с нивелирами с плоским лазером.

При работе нивелир устанавливают на штативе на отмеренной от репера высотной отметке. Светочувствительное навесное оборудование монтируют на РО дорожно-строительной машины. При движении навесное оборудование фиксирует изменение положения лазерной плоскости, а данные о смещении передает на монитор в кабину оператора.

К достоинствам данной системы относится возможность контроля положения РО всех строительных машин на участке, оснащенных приемниками лазерной плоскости (рис. 2).

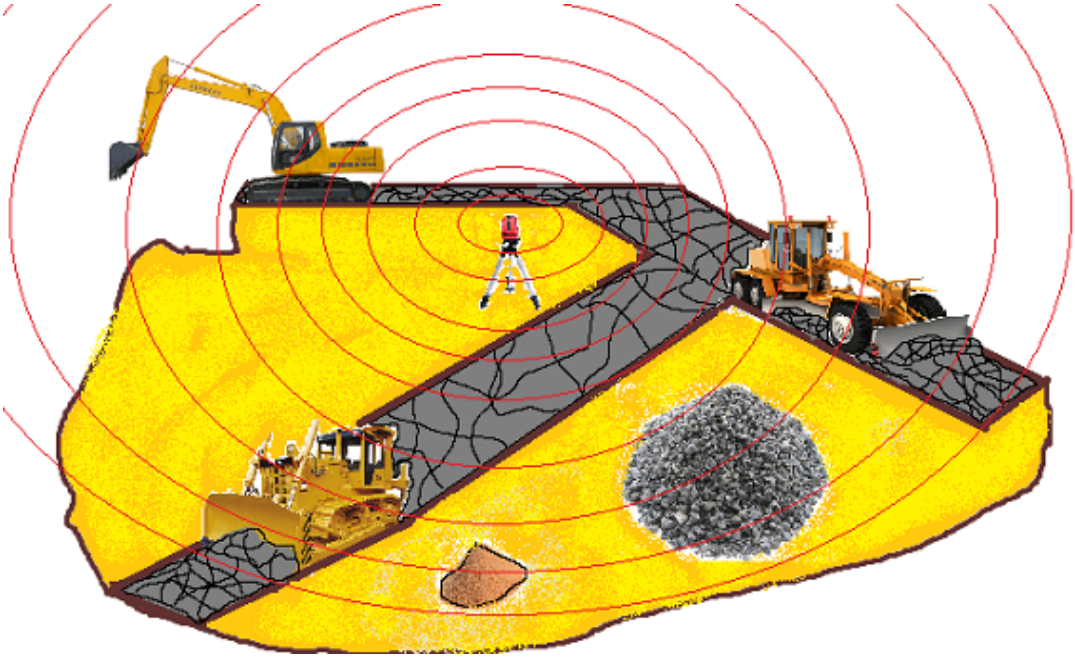


Рис. 2. Контроль положения РО нескольких дорожно-строительных машин на участке

Значительным недостатком подобных систем является невозможность их использования в условиях не прямой видимости. Если фоточувствительный элемент теряет положение лазерного луча, то система находится в состоянии неопределенности. Эта особенность затрудняет использование данной системы в местах с густой растительностью, городах. Также усложняет использование в заселенных участках местности еще то, что мощность лазера препятствует его использованию без снаряжения для защиты органов зрения, потому что даже кратковременное попадание лазерного нивелира в глаза кратковременно ослепляет, что препятствует нормальной работоспособности.

Наиболее дорогостоящим и сложным является GPS-система нивелирования. Она способна отслеживать положение движущейся точки методом триангуляции относительно нескольких спутников и стационарной высотной GPS точки-репера (рис. 3).

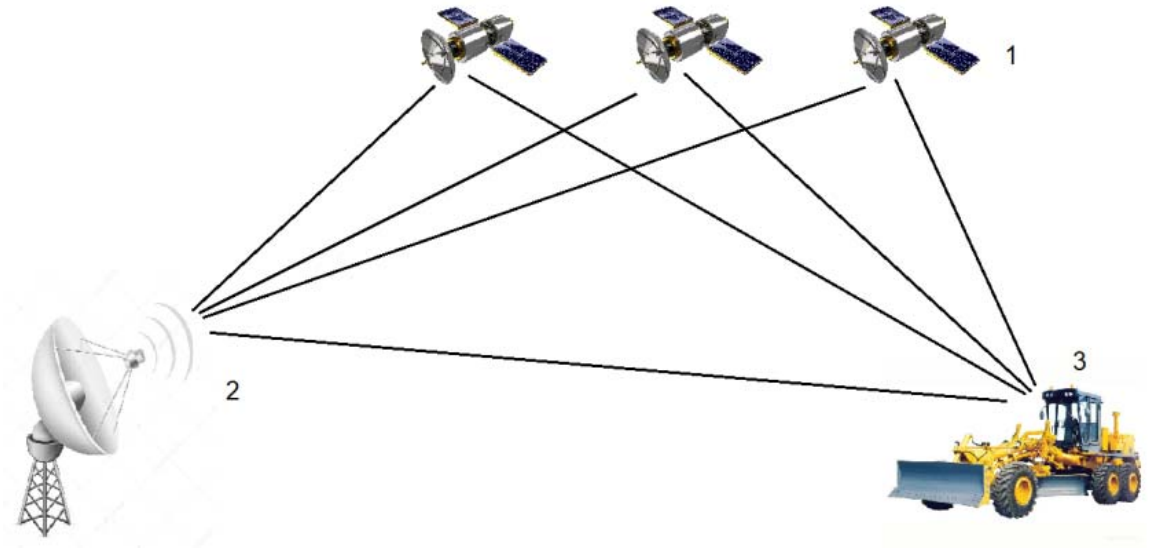


Рис. 3. Расчет положения РО дорожно-строительной техники методом триангуляции

Эти системы обладают рядом достоинств: высокая точность, способность одновременно контролировать большое количество строительных машин на участках большей площади, устойчивость сигнала к помехам от перекрытия окружающей техникой, деревьями или небольшими строениями. Система нивелирования на основе GPS позволяет потоковое строительство широких участков нескольких трасс и сооружений одновременно.

При всей перспективности GPS-системы нивелирования имеют несколько недостатков: для их использования требуется прохождение дополнительных обучающих курсов, длящихся около года, использование системы возможно только в тех местах, где есть GPS связь, так как если система теряет связь со спутниками или базовой точкой, система уйдет в состояние неопределенности.

Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой необходимого математического [1 – 6] и алгоритмического [7 – 10] обеспечения систем нивелирования.

Данная статья опубликована в рамках гранта № 13127GU / 2018 от 23.05.2018 (*код 0039888*), *заявка № 40034 конкурса У.М.Н.И.К. 17-12* (*б*), *Тамбовская область – 2017.* «*Разработка системы нивелирования для строительной техники*».

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «*Цифровое машиностроение*».

Список использованных источников

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Разработка** адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров // М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Автоматизированная** информационная система обучения персонала промышленных предприятий на основе виртуальных тренажерных комплексов / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов, А. А. Руднев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 86 – 94.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Разработка** программного и методического обеспечения виртуального тренажерного комплекса / Д. Л. Дедов, М. Н. Краснянский, А. А. Руднев, М. В. Ионов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2. – С. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Т. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – Т. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – Т. 2.1. – P. 413 – 420.

References

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Razrabotka** adaptivnyh trenazhernyh system professional'nogo naznacheniya dlya modelirovaniya processa rasprostraneniya pozharov // M. N. Krasnyanskij, D. L. Dedov, A. D. Obuhov, A. E. Arhipov // Voprosy sovremennoj nauki I praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2017. – № 3(65). – S. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – T. 327, № 2. – P. 022075.

4. **Avtomatizirovannaya** informacionnaya sistema obucheniya personala promyshlennyh predpriyatij na osnove virtual'nyh trenazhernyh kompleksov / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov, A. A. Rudnev // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2013. – № 11. – S. 86 – 94.

5. **Krasnyanskij, M. N.** Obuchenie operatorov neftekhimicheskih proizvodstv s primeneniem komp'yuternyh / M. N. Krasnyanskij, S. V. Karpushkin, D. L. Dedov // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. – 2011. – № 11. – S. 50 – 56.

6. **Razrabotka** programmnogo I metodicheskogo obespecheniya virtual'nogo trenazhernogo kompleksa / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskij, A. A. Rudnev, M. V. Ionov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. – 2013. – № 2. – S. 60 – 65.

7. **Development** and validation of a new construction of imitator of mine insulating self-rescuer / S. V. Karpov, A. O. Glebov, D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, S. Y. Alexeev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings. – 2017. – P. 231 – 239.

8. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – T. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

9. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – T. 16, № 7. – P. 332.

10. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina, V. I. Skvortsov, V. A. Khvorov // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – T. 2.1. – P. 413 – 420.

УДК 550.8.028

Галлямов А.
Ошский технологический университет
(E-mail: chief.nauk@yandex.ru)

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВЗВЕСИ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Gallyamov A.
Osh University of Technology
(E-mail: chief.nauk@yandex.ru)

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MEASURING SYSTEMS FOR THE CONCENTRATION OF DUST-AIRDISPERSED MIXTURESIN MINING

Аннотация. В статье автор обращает внимание на повышение эффективности измерительных систем концентрации пылегазоввзвеси при добыче полезных ископаемых. Широкое применение различных систем обусловило проведение исследований по разработке обобщенных показателей эффективности, которые можно использовать на практике для сравнения различных вариантов систем.

Ключевые слова: измерительные системы, пылегазосмеси, добыча полезных ископаемых, показатели эффективности.

Abstract. In the article, the author draws attention to improving the efficiency of measuring systems for the concentration of dust-air-dispersedmixture in the extraction of minerals. The widespread use of various systems has led to research on the development of generalized performance indicators that can be used in practice to compare different system options.

Keywords: measuring systems, dust/air dispersed mixtures, mining, efficiency indicators.

При разработке и эксплуатации измерительных систем концентрации пылегазовзвеси в шахтах возникает задача оценки целесообразности использования различных вариантов систем и выбора наиболее эффективного [10]. Эффективность системы определяется ее возможностью получения количества информации с минимальными затратами времени. Поэтому одним из показателей ее эффективности является быстродействие.

Широкое применение различных систем обусловило проведение исследований по разработке обобщенных показателей эффективности, которые можно использовать на практике для сравнения различных вариантов систем.

Однако разработка обобщенного показателя эффективности достаточно сложная задача, так как к нему предъявляются такие жесткие требования, как:

– он должен быть функционально связанным с характеристиками измерительной системы;

– характеризовать информационно-измерительную систему при выполнении поставленных функций и задач;

– иметь математическое обоснование и физическую сущность.

Анализ этих требований показал, что они могут быть достаточно противоречивыми. Поэтому чем больше обобщенный показатель эффективности отражает свойства системы, тем труднее его выбрать. Известные методы разработки обобщенного показателя базируются на следующих положениях [4; 11]:

– эффективность системы определяют путем сравнения ее с любой другой системой (аналогом или прототипом);

– обобщенный показатель принимают как сумму частных показателей с некоторыми взвешенными коэффициентами;

– при выборе обобщенного показателя находят взаимосвязь между набором технических характеристик системы и ее стоимости.

При разработке компьютеризированной измерительной системы концентрации пылегазовзвеси в рудничной атмосфере шахт возникает необходимость оценки целесообразности использования того или иного варианта системы.

Количество полученной информации равно энтропии, значение которой установлено при проведении измерений [1]. В идеальном случае, когда во время измерения полностью снимается неопределенность относительно количества молекул метана или частиц пыли, максимальное значение полученной информации численно равно начальной энтропии рассматриваемой пылегазовой смеси.

Для сравнения способности различных измерительных систем получать сведения о содержании измерительного компонента в анализируемой газовой смеси можно с использованием двоичного логарифма количества определенных концентраций [8; 12]. Согласно критерию Найквиста и Харли, это количество уровней сигналов не может увеличиваться бесконечно. Оно ограничено абсолютной погрешностью измерителя, значение которого приведено в верхнем пределе измерений. Это объясняется невозможностью уверенно зарегистрировать изменение концентрации пылегазового компонента в анализируемой газовой смеси меньше, чем удвоенная абсолютная погрешность ($2\times\Delta_C$) измерителя.

Весь диапазон измерений можно заменить последовательностью определенных значений концентраций пылегазового компонента смеси. При этом соседние значения отличаются между собой на удвоенное значение абсолютной погрешности измерения. Если концентрация пылегазового компонента меняется в пределах от 0 до C_{max}, то можно получить $C_{max}\ (2\times\Delta_C)^{-1}$ дискретных уровней концентрации. Если значения концентрации в пределах диапазона измерений имеют одинаковую вероятность появления, тогда количество информации J, которую получают во время одного измерения, с абсолютной погрешностью Δ_C.

Пропускную способность измерительной системы концентрации метана и пыли в рудничной атмосфере можно определить как скорость получения измерительной информации – максимально возможное количество информации, которая получена за единицу времени. Потраченный на проведение одного измерения промежуток времени можно обозначить через Δ_t при $C_{max} \geq \Delta_C$.

Результаты расчетов пропускной способности информационной системы концентрации метана, которые осуществлены при изменении абсолютной погрешности: Δ_{CH4} – от 0,01 до 0,20 об.% (Максимальная концентрация = 4 об.%). И быстродействие измерителя Δt – от 0,1 до 10 с.

Время срабатывания измерителей концентрации метана, предназначенные для использования в качестве средства газового контроля и отключения электроэнергии, в соответствии с требованиями составляет не более 0,8 с при абсолютной погрешности измерения не более Δ_{CH4} = ± 0,20 об. % в диапазоне от 0 до 4 об.% [6].

При этом величина пропускной способности измерителей концентрации метана должна составлять 4,15 бит/с [2].

В имеющихся измерениях концентрации метана, которые используются сегодня в системе аэрогазовой защиты, быстродействие составляет порядка 15 с. При этом величина информационной пропускной способности промышленных образцов измерителей концентрации метана составляет 0,22 бит/с. На основе проведенного анализа полученных данных можно сделать вывод, что существующие измерители в 19 раз имеют меньшее значение информационной пропускной способности, чем регламентные требования к ним [9].

На основе проведенного анализа пропускной способности измерителей концентрации метана можно сделать вывод, что наиболее существенное влияние на информационную пропускную способность имеет быстродействие измерителя (Δt). Поэтому при реализации измерительного канала концентрации метана, который основан на оптико-абсорбционном методе контроля, необходимо выключить систему пробоподготовки газовой смеси и обеспечить естественную циркуляцию рудничной атмосферы через измерительную камеру. При этом ожидаемое значение быстродействия измерителя, как показали проведенные предварительные теоретические и экспериментальные исследования, составлять не более 0,15 с при величине абсолютной погрешности измерения не более ± 0,10 об.%. Значение пропускной способности разрабатываемого измерительного канала концентрации метана в рудничной атмосфере шахт должно составлять не менее 28,81 бит/с.

Значение полученного показателя информационной пропускной способности разрабатываемого измерителя концентрации метана в 130 раз превышает существующие параметры, и в 7 раз лучше, чем регламентированные требования к стационарным метанометрам, которые используются как быстродействующие. Поэтому для построения измерительного канала концентрации пылегазовзвеси в рудничной атмосфере угольных шахт необходимо использовать оптико-абсорбционный метод контроля с открытым оптическим каналом.

Аналогичный анализ проведен для разрабатываемого измерителя концентрации пыли. Так, величина пропускной способности аспирационного измерителя типа составляет 0,016 бит/с при Δ_C = ± 200 мг/м^3 C_{max} = 3000 мг / м^3 и Δt = 180 с. Результаты проведенных предварительных исследований показали, что ожидаемое значение быстродействия измерителя концентрации пыли будет составлять не более 0,8 с при Δ_C = ± 50 мг/м^3 и максимальной концентрации = 3000 мг/м^3.

С учетом этого значения пропускной способности разрабатываемого измерителя концентрации пылегазовзвеси составляет не менее 6,134 бит/с, что в 380 раз больше, чем у сертифицированного аспирационного измерителя.

Полученные результаты исследований полностью оправдывают разработку компьютеризированной информационно-измерительной системы концентрации пылегазовзвеси для условий рудничной атмосферы горных выработок угольных шахт.

На основе анализа работ [5, 7] предложено для оценки эффективности анализа пылегазовзвеси использовать среднее арифметическое значение пропускной способности различных групп измерителей. Таким образом, при реализации системы с использованием групп измерителей, которые распределены в регламентированных точках горных выработок, ее эффективность оценивается выше.

Физическая сущность средней геометрической оценки пропускной способности системы является приростом этого показателя при изменении пропускных способностей каждого измерительного канала системы отдельно. Также расчеты позволят оценить прирост этого показателя при введении в структуру измерительного канала, который отсутствует или контроле на качественном уровне в базовом варианте системы. Оценка повышения эффективности измерительной системы осуществляется на основе информационной пропускной способности *n* распределенных групп в разных точках горных выработок угольных шахт. Каждая из *n* групп может содержать в своем составе от 1 до *m* измерительных каналов параметров рудничной атмосферы.

Поэтому с учетом расчетов эффективность исследуемой системы предложено определять на основе среднего арифметического *n* групп средних геометрических значений информационных пропускных способностей *m* измерителей параметров рудничной атмосферы угольных шахт по каждой группе отдельно.

При этом установлено [3], что появление этих событий случайно распределено в интервале ± 3,00s, который соответствует вероятности 0,997 обнаружения взрывоопасных ситуаций в условиях рудничной атмосферы горных выработок угольных шахт.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что пропускную способность системы *C* можно увеличить на 16,5 бит/с при разработке новых типов оптоэлектронных измерителей концентрации пылегазовзвеси для рудничной атмосферы. Это позволит увеличить вероятность обнаружения взрывоопасных ситуаций с 0,93 до 0,997 и обеспечить повышение уровня промышленной безопасности.

Список использованных источников

1. **Особенности** опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка-Гартмана / Л. В. Антошкин, В. В. Лавринов, Л. Н. Лавринова и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 11. – С. 1042 – 1047.

2. **Завьялов, И. Н.** Лабораторное моделирование взвесенесущих гравитационных потоков при активном взмучивании донных осадков / И. Н. Завьялов, В. В. Жмур // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 344.

3. **Иголкина, Г. В.** Изучение намагниченности горных пород в естественном залегании по данным измерений в сверхглубоких и глубоких скважинах / Г. В. Иголкина // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 244 – 250.

4. **Коломиец, С. С.** Нетрадиционные способы бурения / С. С. Коломиец, В. Г. Краснов, П. М. Косьянов // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса : матер. V региональной науч.-практ. Конф. обучающихся ВО, аспирантов и ученых. – 2015. – С. 67 – 76.

5. **Крайнов, А. Ю.** Численное исследование сгорания полидисперсной газовзвеси угольной пыли в сферическом объеме / А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, Д. Ю. Палеев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 531 – 539.

6. **Современные** технологии для проведения производственного контроля, повыщающие уровень промышленной безопасности на объектах нефтегазовой отрасли / Р. А. Кускильдин, Н. Х. Абдрахманов, З.А. Закирова и др. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 2(108). – С. 111 – 120.

7. **Комплексные** исследования угольных пластов в глубоких скважинах / А. В. Патутин, В. В. Тимонин, А. С. Кондратенко, Л. А. Рыбалкин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 23 – 26.

8. **Пат.** на изобретение RUS 2189039 Способ определения октанового числа автомобильных бензинов / Пащенко В. М., Чуклов В. С., Ванцов В. И., Колосов А. А. – 28.11.2000.

9. **Санникова, А. П.** Изучение связи блочности массива и кусковатости горной массы по фотоснимкам при помощи методов компьютерной обработки / А. П. Санникова // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 301 – 303.

10. **Силаев, И. В.** Испаритель для резистивного испарения в вакууме / И. В.Силаев, Т. И. Радченко // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 9. – С. 80.

11. **Устынюк, Ю. А.** Таутомерия гидрофосфорильных соединений и их особенности как лигандов в металлокомплексном катализе. Квантовохимическое моделирование методом функционала плотности / Ю. А. Устынюк, Ю. В. Бабин // Российский химический журнал. – 2007. – Т. 51, № 5. – С. 130 – 138.

12. **Чапаев, Д. Б.** Изменение толщины стенки трубопровода теплосети при эксплуатации / Д. Б. Чапаев, И. В. Кошкина // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : матер. Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2003. – С. 139–140.

References

1. **Osobennosti** operezhayushchey korrektsii turbulentnykh iskazheniy po izmereniyam datchika Sheka-Gartmana/ Antoshkin L. V., Lavrinov V. V., Lavrinova L. N., Lukin V. P., Tuyev M. V. // Optika atmosfery i okeana. – 2010. – T. 23. № 11. – S. 1042 – 1047.

2. **Laboratornoye** modelirovaniye vzvesenesushchikh gravitatsionnykh potokov pri aktivnom vzmuchivanii donnykh osadkov / Zav'yalov I. N., Zhmur V. V. // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana. – 2014. – T. 50, № 3. – S. 344.

3. **Izucheniye** namagnichennosti gornykh porod v yestestvennom zaleganii po dannym izmereniy v sverkhglubokikh i glubokikh skvazhinakh / Igolkina G. V. // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – T. 10, № 2. – S. 244 – 250.

4. **Netraditsionnyye** sposoby bureniya / Kolomiyets S. S., Krasnov V. G., Kos'yanov P. M. // V sbornike: Opyt, aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa materialy V regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya VO, aspirantov i uchenykh. – 2015. – S. 67 – 76.

5. **Chislennoye** issledovaniye sgoraniya polidispersnoy gazovzvesi ugol'noy pyli v sfericheskom ob"yeme / Kraynov A. Yu., Moiseyeva K. M., Paleyev D. Yu. // Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye. – 2016. – T. 8, № 3. – S. 531 – 539.

6. **Sovremennyye** tekhnologii dlya provedeniya proizvodstvennogo kontrolya, povyshchayushchiye uroven' promyshlennoy bezopasnosti na ob"yektakh neftegazovoy otrasli / Kuskil'din R. A., Abdrakhmanov N. Kh., Zakirova Z. A., Yalalova E. F., Abdrakhmanova K. N., Vorokhobko V. V. // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. – 2017. – № 2(108). – S. 111 – 120.

7. **Kompleksnyye** issledovaniya ugol'nykh plastov v glubokikh skvazhinakh / Patutin A. V., Timonin V. V., Kondratenko A. S., Rybalkin L. A. // Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk. – 2014. – T. 1, № 2. – S. 23 – 26.

8. **Sposob** opredeleniya oktanovogo chisla avtomobil'nykh benzinov / Pashchenko V. M., Chuklov V. S., Vantsov V. I., Kolosov A. A. // patent na izobreteniye RUS 2189039. – 28.11.2000

9. **Izucheniye** svyazi blochnosti massiva i kuskovatosti gornoy massy po fotosnimkam pri pomoshchi metodov komp'yuternoy obrabotki / Sannikova A. P. // Zapiski Gornogo instituta. – 2011. – T. 190. – S. 301 – 303.

10. **Isparitel'** dlya rezistivnogo ispareniya v vakuume / Silayev I. V., Radchenko T. I. // Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. – 2015. – № 9. – S. 80.

11. **Tautomeriya** gidrofosforil'nykh soyedineniy i ikh osobennosti kak ligandov v metallokompleksnom katalize. kvantovokhimicheskoye modelirovaniye metodom funktsionala plotnosti / Ustynyuk Yu. A., Babin Yu. V. // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. – 2007. – T. 51. № 5. – S. 130 – 138.

12. **Izmeneniye** tolshchiny stenki truboprovoda teploseti pri ekspluatatsii / Chapayev D. B., Koshkina I. V. // Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. – 2003. – S. 139–140.

УДК 519.711

Седых И. А.
Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк
(Тел. (4742) 328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru)

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКИХ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Sedykh I. A.
Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk
(Tel. (4742) 328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru)

DEVELOPMENT OF FUZZY NEIGHBORHOOD MODELS FOR CEMENT PRODUCTION

Аннотация. В работе приведено определение нечеткой динамической окрестностной модели с нечеткой структурой, состоящей из узлов и нечетких связей между ними. Производство цемента рассмотрено как сложная производственная система. Показан граф структуры окрестностной модели цементного производства. Построены нечеткая и четкая динамические окрестностные модели для прогнозирования выпуска клинкера и цемента. Для окрестностных моделей решена задача достижимости фактических значений выпуска продукции. Приведена сравнительная характеристика моделей с производственными данными с помощью средних относительных ошибок по объему производства клинкера и цемента. Проведенный сравнительный анализ модельных данных с реальными доказывает адекватность разработанных моделей. Нечеткая окрестностная модель дает меньшие относительные ошибки объемов выпуска продукции цементного производства по сравнению с четкой моделью.

Ключевые слова: нечеткие динамические окрестностные модели с нечеткой структурой, производство цемента, сложная производственная система.

Abstract. The paper presents the definition of a fuzzy dynamic neighborhood model with a fuzzy structure consisting of nodes and fuzzy connections between them. Cement production is considered as a complex production system. A graph of the structure of the neighborhood model of cement production is shown. A fuzzy and clear dynamic neighborhood model has been built to predict the release of clinker and cement. For neighborhood models, the problem of accessibility of actual values of output is solved. A comparative description of the models with production data using the average relative errors in the production of clinker and cement is given. The comparative analysis of model data with real proves the adequacy of the developed models. The fuzzy neighborhood model gives smaller relative errors in the output of cement production compared to a clear model.

Keywords: fuzzy dynamic neighborhood models with fuzzy structure, cement production, complex production system.

Введение. Производство цемента [1, 2] – сложная производственная система, подсистемами которой являются: добыча и первичная обработка известняка, глины; помол сырья; обжиг; помол клинкера. Построение математической модели, позволяющей адекватно прогнозировать производство клинкера и цемента, является актуальной задачей.

В работе рассмотрим нечеткие динамические окрестностные модели с нечеткой структурой, позволяющие моделировать сложные пространственно-распределенные процессы, объекты и системы. Проведем сравнение результатов моделирования с данными, полученными на основе четкой окрестностной модели [3 – 9].

1. Нечеткая динамическая окрестностная модель с нечеткой структурой. Нечеткая динамическая окрестностная модель «вход–состояние» с нечеткой структурой является набором

$$\tilde{NS} = \left(\tilde{N},\ \tilde{X},\ \tilde{V},\ \tilde{Z},\ \tilde{G},\ \tilde{t}_0,\ \tilde{X}[\tilde{t}_0],\ \tilde{t}\right),$$

где:

1) $\tilde{N} = \left(\tilde{A},\ \tilde{O}\right)$ – нечеткая структура, $A = \{a_1,\ a_2,\ ...,\ a_n\}$ – совокупность узлов, $\tilde{O} = (\tilde{O}_x, \tilde{O}_v)$ – связи узлов по состояниям $\tilde{O}_x$ и входам $\tilde{O}_v$, являющиеся нечеткими, и заданные функциями принадлежности $\mu_x : \tilde{A} \times \tilde{A} \to R_{[0,1]}$ и $\mu_v : \tilde{A} \times \tilde{A} \to R_{[0,1]}$ соответственно;

2) $\tilde{X} = (\tilde{X}[1],\ ...,\ \tilde{X}[n])^T$ – состояния в текущий нечеткий момент времени $\tilde{t}$, являющиеся нечеткими и заданные функциями принадлежности $\eta_x : \tilde{X} \to R^n_{[0,1]}$;

3) $\tilde{V} = (\tilde{V}[1],\ ...,\ \tilde{V}[n])^T$ – входы, являющиеся нечеткими и заданные функциями принадлежности $\eta_v : \tilde{V} \to R^n_{[0,1]}$;

4) $\tilde{Z}$ – временные задержи в узлах, являющиеся нечеткими и заданные функциями принадлежности $\psi_z : A \times A \to R_{[0,1]}$;

5) $\tilde{G} = \left(\tilde{G}_1 \quad ... \quad \tilde{G}_n\right)^T$ – нечеткая вектор-функция пересчета состояний окрестностной модели. Для узла $a_i \in A$ функции $\tilde{G}_i$ в общем виде можно записать:

$$\tilde{X}\left[\tilde{t} + \Delta\tilde{t}, i\right] = \tilde{G}_i\left(\tilde{X}_i[\tilde{t}],\ \tilde{V}_i[\tilde{t}],\ \mu_x[i],\ \mu_v[i]\right);$$

6) $\tilde{t}_0$ – начальный нечеткий момент времени;

7) $\tilde{X}\left[\tilde{t}_0\right]$ – нечеткое начальное состояние модели;

8) $\tilde{t}$ – текущее нечеткое время. Модель функционирует в нечетком времени $\tilde{t}$ с интервалом $\Delta\tilde{t}$.

2. Окрестностное моделирование цементного производства. Рассмотрим представление цементного производства с помощью нечеткой динамической окрестностной модели с нечеткой структурой. Граф структуры окрестностной модели приведен на рис. 1.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: a_1 – склад сырья; a_2 – a_5, a_{10}–a_{11} – сырьевые мельницы; a_6 – силос сырьевой муки; a_7–a_8, a_{13} – печи; a_9 – склад клинкера; a_{12} – силос сырьевой муки; a_{14} – a_{20} – цементные мельницы; a_{21} – силос цемента.

Производительность агрегатов цементного производства является нечеткой величиной и колеблется от 1 до 10%, поэтому объем клинкера и цемента в рассматриваемой нечеткой модели являются нечеткими треугольными числами.

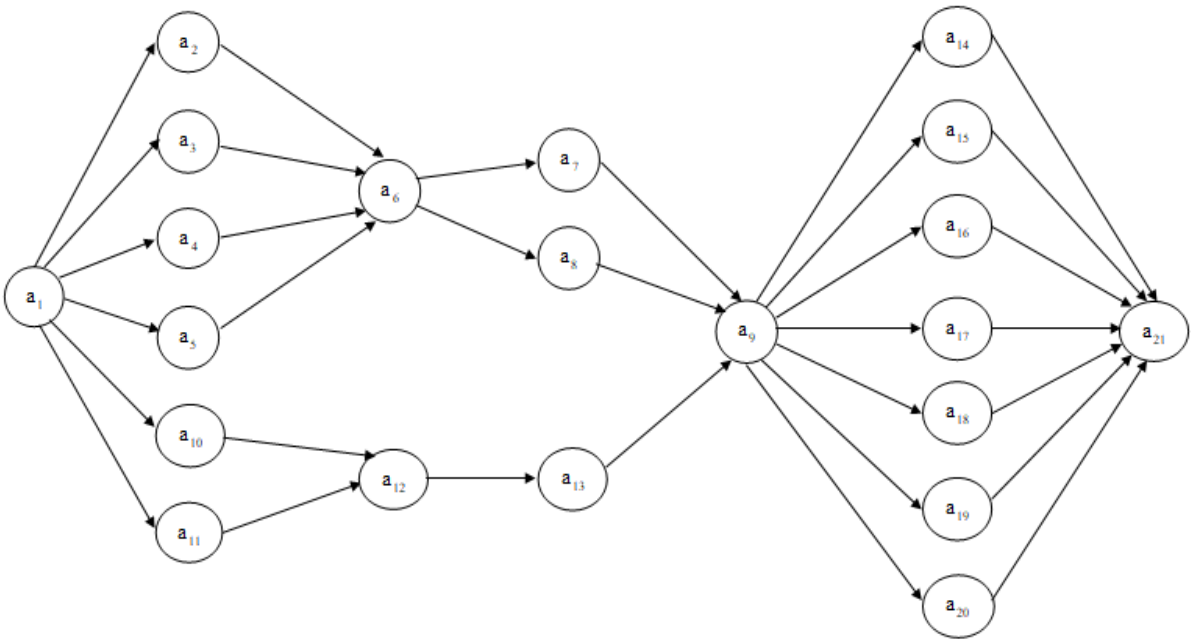


Рис. 1. Граф структуры окрестностной модели производства цемента

Кроме того, при транспортировке материала от одного агрегата к другому происходят незначительные потери до 0,1%, причем количество потерь – нечеткая величина с неизвестным законом распределения, поэтому связи между узлами системы также являются нечеткими числами.

Для сравнения была построена также четкая динамическая окрестностная модель цементного производства.

В работе для четкой и нечеткой окрестностных моделей решается задача достижимости фактических значений объема выпуска продукции с использованием критерия

$$K\left(P_{\text{кл}},\, P_{\text{ц}}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left(\left(P_{\text{кл}}^{i*}-P_{\text{кл}}^{i}\right)^2+\left(P_{\text{ц}}^{i*}-P_{\text{ц}}^{i}\right)^2\right)\to \min,$$

где n – объем выборки; $P_{\text{кл}}^{i}$ – величина выпуска клинкера, полученная по модели для i-й строки выборки, т; $P_{\text{кл}}^{i*}$ – i-е значение фактического выпуска клинкера, т; $P_{\text{ц}}^{i}$ – величина выпуска цемента, полученная по модели для i-й строки выборки, т; $P_{\text{ц}}^{i*}$ – i-е значение фактического выпуска цемента, т.

Так как результаты расчетов по нечеткой модели, т.е. объемы выпуска клинкера и цемента являются нечеткими треугольными числами, то для сравнения с четкой моделью была проведена их деффаззификация по формуле

$$P=\frac{\sum_{i=1}^{m}P(x_i)\,\mu_i}{\sum_{i=1}^{m}\mu_i},$$

где x_i $(i=1,\,...,\,m)$ – точки разбиения отрезка значений нечеткой величины; μ_i – значения функции принадлежности в этих точках.

Сравнительная характеристика моделей с помощью средних относительных ошибок по объему производства клинкера и цемента приведена в табл. 1. Проведенный сравнительный анализ модельных данных с реальными доказывает адекватность полученных моделей.

1. Сравнение четкой и нечеткой окрестностных моделей

Модель	Средняя относительная ошибка по клинкеру, %	Средняя относительная ошибка по цементу, %
Четкая	0,089	0,171
Нечеткая	0,032	0,104

Таким образом, по табл. 1 видно, что нечеткая динамическая окрестностная модель с нечеткой структурой дает меньшие относительные ошибки по сравнению с четкой моделью как для объема выпуска клинкера, так и для цемента.

Заключение. Таким образом, в работе дано определение нечеткой динамической окрестностной модели. Приведено описание производства цемента как сложной производственной системы. Построены четкая и нечеткая динамические окрестностные модели, позволяющие прогнозировать производство клинкера и цемента, а также проведено их сравнение с производственными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (*проект №16-07-00-854 а*).

Список использованных источников

1. **Окрестностное** моделирование сетей Петри / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, И. А. Седых, В. Ю. Филоненко. – Липецк : ЛЭГИ, 2010. – 124 с.

2. **Седых, И. А.** Представление цементного производства иерархическими раскрашенными временны́ми сетями Петри на основе окрестностных моделей / И. А. Седых, Е. С. Аникеев // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2017. – № 1(31). – С. 19 – 24.

3. **Блюмин, С. Л.** Сети Петри с переменной недетерминированностью как окрестностные системы / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, И. А. Седых // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 3.2(33). – С. 228 – 233.

4. **Седых, И. А.** Иерархические раскрашенные временны́е сети Петри на основе окрестностных моделей / И. А. Седых, Е. С. Аникеев // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2(52). – С. 83 – 89.

5. **Седых, И. А.** Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели / И. А. Седых // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : АЭТЕРНА, 2016. – С. 12 – 19.

6. **Седых, И. А.** Динамические окрестностные сети / И. А. Седых // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 3(81). – С. 124 – 130.

7. **Shmyrin, A. M.** Neural Networks Neighborhood Models / A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – № 12(6). – P. 5039 – 5046.

8. **Седых, И. А.** Прогнозирование уровня подземных вод месторождения цементного сырья на основе динамических окрестностных моделей / И. А. Седых // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 326 – 332.

9. **Окрестностное** моделирование процесса очистки сточных вод / А.М. Шмырин, И. А. Седых, А. М. Сметанникова, Е. Ю. Никифорова // Вестник Тамбовского Университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22, вып. 3. – С. 596 – 604.

References

1. **Bljumin, S. L.** Okrestnostnoe modelirovanie setej Petri // S. L. Bljumin, A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh, V. Yu. Filonenko. – Lipeck : LJeGI, 2010. – 124 s.

2. **Sedykh, I. A.** Predstavlenie cementnogo proizvodstva ierarhicheskimi raskrashennymi vremennymi setjami Petri na osnove okrestnostnyh modelej / I. A. Sedykh, E. S. Anikeev // Vestnik Lipeckogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2017. – № 1(31). – S. 19 – 24.

3. **Bljumin, S. L.** Seti Petri s peremennoj nedeterminirovannost'ju kak okrestnostnye sistemy / S. L. Bljumin, A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologi. – 2008. – № 3.2(33). – S. 228 – 233.

4. **Sedykh, I. A.** Ierarhicheskie raskrashennye vremennye seti Petri na osnove okrestnostnyh modelej / I. A. Sedykh, E. S. Anikeev // Avtomatizaciya processov upravleniya. – 2018. – № 2(52). – S. 83 – 89.

5. **Sedykh, I. A.** Parametric identification of a linear dynamic neighborhood model / I. A. Sedykh // Collected papers of the International Scientific and Practical Conference “Innovative Science: Past, Present, Future”. – Ufa : AJeTERNA, 2016. – S. 12 – 19.

6. **Sedykh, I. A.** Dinamicheskie okrestnostnye seti / I. A. Sedykh // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – T. 22, № 3(81). – S. 124 – 130.

7. **Shmyrin, A. M.** Neural Networks Neighborhood Models / A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – № 12(6). – P. 5039 – 5046.

8. **Sedykh, I. A.** Prognozirovanie urovnya podzemnyh vod mestorozhdeniya cementnogo syr'ya na osnove dinamicheskih okrestnostnyh modelej / I. A. Sedykh // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – T.18, № 3. – S. 326 – 332.

9. **Shmyrin, A. M.** Okrestnostnoe modelirovanie processa ochistki stochnyh vod / A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh, A. M. Smetannikova, E. Yu. Nikiforova // Vestnik Tambovskogo Universiteta. Serija: Estestvennye i tehnicheskie nauki. – 2017. – T. 22, vyp. 3. – S. 596 – 604.

УДК 621.865.8

Овечкин Н. В.[1], Курнасова Я. Л.[2],
Артамонов Р. П.[3], Серебрянкин В. А.[4]
МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, г. Москва
[1](E-mail: njk.ov@yandex.ru),
[2](E-mail: kyn.mira@yandex.ru),
[3](E-mail: artamonow.roman@mail.ru),
[4](E-mail: hedoner@mail.ru)

МЕХАНИЗМ ЗАХВАТА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Ovechkin N. V.[1], Kurnasova Ya. L.[2],
Artamonov R. P.[3], Serebryankin V. A.[4]
Russian Tecnological University MIREA, Russia, Moscow
[1](E-mail: njk.ov@yandex.ru),
[2](E-mail: kyn.mira@yandex.ru),
[3](E-mail: artamonow.roman@mail.ru),
[4](E-mail: hedoner@mail.ru)

THE CAPTURE MECHANISM OF INDUSTRIAL ROBOTS FOR SPECIAL OPERATIONS

Аннотация. Статья посвящена промышленной робототехнике, в частности проектированию конструкции захватного устройства для специальных операций. Рассмотрена твердотельная модель предлагаемого механизма захвата промышленного робота. Оптимизировано пространственное расположение его рабочих элементов. Особенностью системы фиксации положения рабочих органов механизма захвата является применение соленоида, к сердечнику которого прикреплена штанга с шлицами, и направляющей оси с соответствующей шлицевой ответной частью, согласуемых за счет сигнала тензометрических датчиков, закрепленных непосредственно в точках предполагаемого соприкосновения с объектом захвата.

Ключевые слова: механизм захвата, промышленный робот, схват, модель схвата, пневмопривод, процесс транспортирования.

Abstract. The article is devoted to industrial robotics, in particular the design of the structure of the capture device for special operations. The solid-state model of the offered mechanism of capture of the industrial robot is considered. The spatial arrangement of his working elements is optimized. Feature of system of fixing of position of workers of bodies of the mechanism of capture is use of the solenoid,to the core of which a rod with splines is attached, and the directing axis with the corresponding spline reciprocal part, matched by a signal from the tensometric sensors attached directly in points of intended contact with subject to capture.

Keywords: capture mechanism, industrial robot, gripper, gripper model, pneumatic actuator, transportation process.

Привычные подходы к управлению производством, разработке продукта, проектированию различных устройств сейчас все больше теряют свою актуальность, становясь неэффективными. На первый план выходят новые индустрии, новые области знания,

связанные с развитием цифровых технологий, что предопределяет появление нового типа производства, соответствующего концепции «Industrie 4.0» [1].

Новые тенденции по организации на промышленном предприятии цифрового производства способствовали появлению отечественных новых методологий и методик организации всех рабочих процессов, как производственных, так и технологических [2 – 5], с подробной их детализацией, что позволяет в итоге обеспечить высочайшее качество продукции. Кроме того, цифровые технологии существенно меняют и сам подход к проектированию автоматизированных систем управления [6, 7], технологического оборудования, промышленных роботов, их механизмов и узлов различного назначения [8, 9].

Однако возникает вопрос, что делать с имеющимся достаточно дорогостоящим оборудованием, имеющим приемлемую гибкость для реализации текущих задач, но не отвечающим концепции цифрового производства. Ведь с такой проблемой сейчас сталкивается каждый российский промышленник, не желающий потерять конкурентоспособность своей компании в условиях резкого сжатия спроса и снижения цен на экспортную продукцию. Одно из решений – модернизация этого оборудования с внедрением элементов цифрового производства. В данной статье рассматривается модернизированный механизм захвата, предназначенный для промышленного робота фирмы ABB, помимо конструкции, имеющий достаточную степень интеграции с системой управления робота.

Одной из проблем промышленного робота при захвате упакованного в коробку изделия является малая гибкость при изменении скорости конвейерной линии. Известны работы [9 – 11], в которых приводятся теоретические решения задачи захвата объекта в условиях его статической неустойчивости. Однако для рассматриваемой модели промышленного робота ABB такое решение нецелесообразно из-за жесткой архитектуры построения его системы управления. В данном случае предлагается механизм захвата и элементы его интеграции с системой управления робота.

На рисунке 1 представлена твердотельная модель предлагаемого механизма захвата робота, содержащая следующие основные элементы:

1 – пневмоцилиндр;

2 – крепежный фланец;

3 – планки зажима;

4 – тензометрический датчик;

5 – направляющая ось с шлицами;

6 – штанга зацепления с шлицами;

7 – соленоид.

Захват изделия осуществляется по следующему принципу.

Планки зажима *3* сводятся штоком пневмоцилиндра *1* до момента, когда тензометрический датчик *4* сообщает системе изменение значения до установленного для данного вида изделия. При поступлении такого сигнала в систему управления роботом, привод механизма захвата (выполненного на базе соленоида) втягивает шток пневмоцилиндра *1*, и штанга *6* входит в зацепление с направляющей *5* при помощи шлицов. Далее, планки зажима с надежно зажатым изделием остаются неподвижными, а шток пневмоцилиндра *1* втягивается до конца.

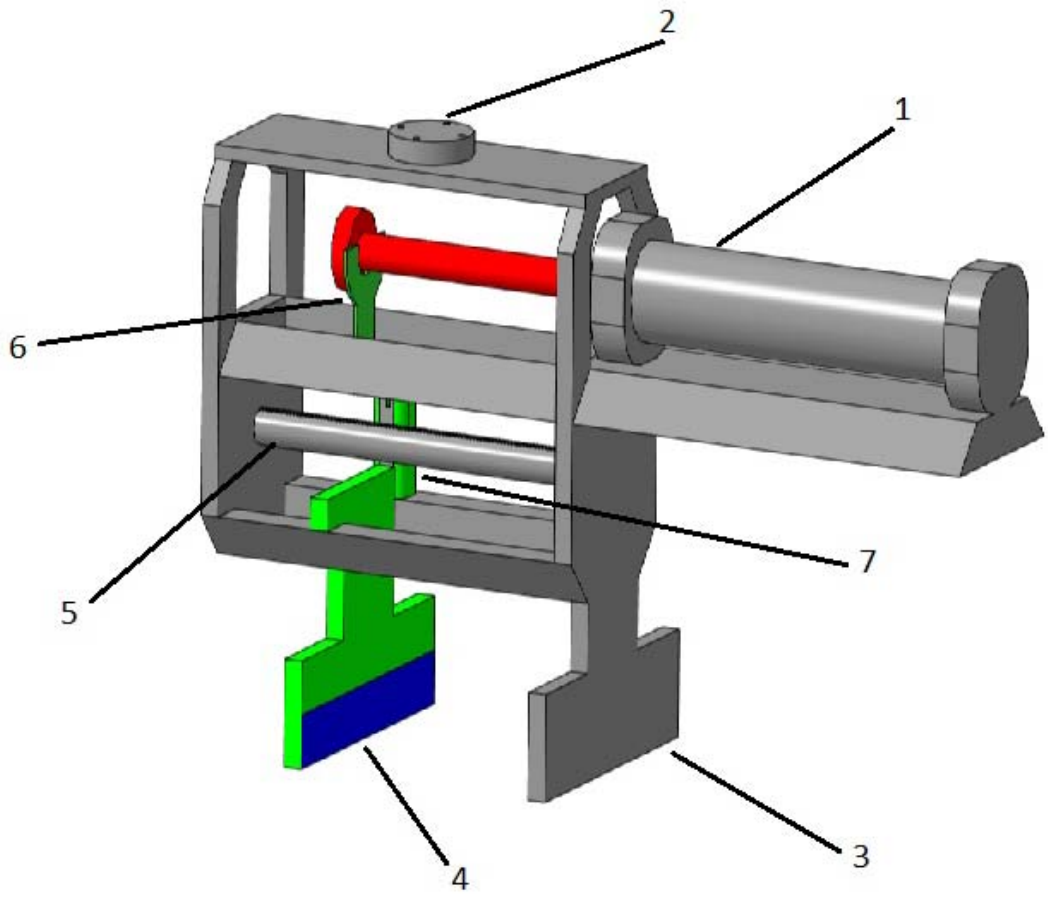


Рис. 1. Твердотельная модельмеханизма захвата промышленного робота

Для осуществления процесса разжима, крепящаяся на штоке соленоида штанга *6* поднимается, и подвижная планка зажима отводится до предельного положения с помощью штока пневмоцилиндра *1* (крайнее положение фиксируется контактным датчиком). При достижении данного предельного положения (допустимое конструкцией) шток соленоида *6* втягивается, чтобы пропустить шток пневмоцилиндра *1*, в завершении процесса разжима шток соленоида *6* возвращается в исходное состояние.

Контроль усилия зажима изделия и положения рабочих элементов механизма захвата, а также управление его приводами осуществляется через специально разработанную плату, интегрированную в систему управления роботом. При этом используются свободные входы и выходы блока управления роботом.

В заключении можно отметить, что оптимизация пространственного расположения рабочих элементов механизма захвата, а также легко интегрируемая в систему управления роботом плата сопряжения, делает это решение достаточно привлекательным для серийной реализации.

Список использованных источников

1. **Development** of digital machine-building production in the Industry 4.0 concept / V. A. Kholopov , E. N. Kashirskaya, A. P. Kushnir et al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Т. 47, № 4. – P. 380 – 385.

2. **Methodology** for assessing the implementation of the production process / E. N. Kashirskaya, E. V. Kurnasov, V. A. Kholopov, A. G. Shmeleva // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 232 – 235.

3. **Организация** цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий / А. В. Гурьянов, Д. А. Заколдаев, А. В. Шукалов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 268 – 277.

4. **Курнасов, Е. В.** Оценка эффективности автоматизированного технологического процесса с учетом его декомпозиции и синтеза подпроцессов / Е. В. Курнасов // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 4. – С. 31 – 35.

5. **Simulation** model for monitoring the execution of technological processes / E. N. Kashirskaya, V. A. Kholopov, A. G. Shmeleva, E. V. Kurnasov // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 307 – 310.

6. **Development** of digital production engineering monitoring system based on equipment state index / V. Holopov, A. Kushnir, E. Kurnasov et al. // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus. – 2017. – P. 863 – 868.

7. **Kurnasov, E. V.** Control of the selective hydrogenation of acetylene compounds / E. V. Kurnasov, A. B. Malyshkin // Russian Engineering Research. – 2017. – T. 37, № 5. – P. 393 – 396.

8. **Остяков, Ю. А.** Проектирование конкурентоспособных узлов и механизмов / Ю. А. Остяков, И. В. Шевченко // Вестник МАТИ : науч. тр. – 2013. – № 20(92). – С. 127 – 133.

9. **Чижиков, В. И.** Захват пальцами протеза предмета с нечеткой геометрической характеристикой в условиях его статической неустойчивости / В. И. Чижиков, Е. В. Курнасов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 3-1(8). – С. 269 – 282.

10. **Чижиков, В. И.** Синтез системы автоматического управления стабилизацией усилия захвата предмета с нечеткой геометрической характеристикой / В. И. Чижиков, Е. В. Курнасов// Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 2. – С. 3 – 10.

11. **Чижиков, В. И.** Комплексный подход к разработке нейросетевого функционального идентификатора системы управления захватом предмета с нечеткой геометрией поверхности / В. И. Чижиков, Е. В. Курнасов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 4-2(9). – С. 275 – 300.

References

1. **Development** of digital machine-building production in the Industry 4.0 concept / V. A. Kholopov , E. N. Kashirskaya, A. P. Kushnir et al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – T. 47, № 4. – P. 380 – 385.

2. **Methodology** for assessing the implementation of the production process / E. N. Kashirskaya, E. V. Kurnasov, V. A. Kholopov, A. G. Shmeleva // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 232 – 235.

3. **Gur'yanov, A. V.**, Zakoldaev D. A., Shukalov A. V. i dr. Organizatsiya tsifrovykh proizvodstv Industrii 4.0 na osnove kiberfizicheskikh sistem i ontologiy // Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. – 2018. – V. 18, № 2. – S. 268 – 277.

4. **Kurnasov, E. V.** Otsenka effektivnosti avtomatizirovannogo tekhnologicheskogo protsessa s uchetom ego dekompozitsii i sinteza podprotsessov // Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii. – 2016. – № 4. – S. 31 – 35.

5. **Simulation** model for monitoring the execution of technological processes / E. N. Kashirskaya, V. A. Kholopov, A. G. Shmeleva, E. V. Kurnasov // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 307 – 310.

6. **Development** of digital production engineering monitoring system based on equipment state index / V. Holopov, A. Kushnir, E. Kurnasov et al. // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – P. 863 – 868.

7. **Kurnasov, E. V.** Control of the selective hydrogenation of acetylene compounds / E. V. Kurnasov, A. B. Malyshkin // Russian Engineering Research. – 2017. – T. 37, № 5. – P. 393 – 396.

8. **Ostyakov, Yu. A.**, Shevchenko I.V. Proektirovanie konkurentosposobnykh uzlov i mekhanizmov // Nauchnye trudy (Vestnik MATI). – 2013. – № 20(92). – S. 127 – 133.

9. **Chizhikov, V. I.**, Kurnasov E. V. Zakhvat pal'tsami proteza predmeta s nechetkoy geometricheskoy kharakteristikoy v usloviyakh ego staticheskoy neustoychivosti // Vestnik MGTU MIRJeA. – 2015. – № 3-1(8). – S. 269 – 282.

10. **Chizhikov, V. I.**, Kurnasov E. V. Sintez sistemy avtomaticheskogo upravleniya stabilizatsiey usiliya zakhvata predmeta s nechetkoy geometricheskoy kharakteristikoy // Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii. – 2016. – № 2. – S. 3 – 10.

11. **ChizhikovV. I.**, Kurnasov E. V. Kompleksnyj podhod k razrabotke nejrosetevogo funkcional'nogo identifikatora sistemy upravlenija zahvatom predmeta s nechjotkoj geometriej poverhnosti // Vestnik MGTU MIRJeA. – 2015. – № 4-2(9). – S. 275 – 300.

УДК 624.012.45

Кадиев Р. А.
Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан
(E-mail: zhas.rahimow@yandex.ru)

СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Kadiev R. A.
Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan
(E-mail: zhas.rahimow@yandex.ru)

MODERN METHODOLOGICAL TOOLS TO FORECAST THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Аннотация. В данной статье рассмотрен современный методический инструментарий прогнозирования долговечности железобетонных конструкций, проведен сравнительный анализ, выделены основные показатели долговечности, сделаны выводы.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, строения, прогнозирование, бетон, железобетонный элемент.

Abstract. In this article, a modern methodological toolkit to forecast the durability of reinforced concrete structures is reviewed; a comparative analysis is conducted; the main indicators of durability are highlighted; the conclusions are drawn.

Keywords: reinforced concrete structures, buildings, forecasting, concrete, reinforced concrete element.

Одним из важнейших элементов транспортной системы государства являются мосты. По опыту развитых стран Европы известно, что до 50% расходов на мостовую отрасль приходится на содержание сооружений, поэтому естественно возникает вопрос о необходимости определения долговечности мостов.

Причины снижения ожидаемого ресурса есть на всех стадиях жизненного цикла сооружений. Низкое техническое состояние и малая долговечность железобетонных мостов объясняются, в первую очередь, низким качеством строительства и отсутствием надлежащей системы эксплуатации. Однако сегодня все чаще признается [2, 6], что снижение среднего срока службы до 45 – 50 лет закладывается еще на стадии изыскания и проектирования сооружения, так как в проектном решении никак не отображается, в каких условиях и с какой скоростью будет протекать деградация железобетона.

На этапе проектирования мы не имеем никаких рычагов контроля и прогноза долговечности, расчетные неровности по первому и второму предельным состояниям не связаны с переменной времени [1, 7]. Нормативные документы из расчета железобетонных элементов мостов не имеют аппарата управления долговечностью, не содержат регламентаций по количественной оценке влияния на долговечность элемента физиче-

ских и механических характеристик материалов, количественной оценки влияния окружающей среды. В результате выясняется, что декларируемый нормами проектирования мостов срок службы железобетонных пролетных строений 80 – 100 лет [11] является нереальным.

Сегодня почти нет теоретических зависимостей, которые позволяют вычислить долговечность элемента на основе физических и механических характеристик материала и уровня нагрузки. Однако существуют определения долговечности через надежность как функцию времени [3, 9].

В наиболее общей форме современная формулировка проблемы приведена в документе Объединенного комитета по безопасности сооружений (Joint Committee on Structural Safety) как вероятность достижения предельного состояния за время t. Для этого вводится функция предельного состояния, зависящая от времени:

$$g\,(X, t) = R\,(X, t) - Q\,(X, t), \tag{1}$$

где $R\,(X, t)$ – обобщенное сопротивление элемента; $Q\,(X, t)$ – обобщенный нагрузочный эффект; X – вектор базовых переменных; t – переменная времени.

Сама функция надежности, как вероятность достижения предельного состояния за время t, имеет вид

$$P\,(t) = \text{Prob}\,[\min g\,(X\,(\tau), \tau) < 0 \quad \text{для} \quad 0 < \tau < t] \tag{2}$$

или в терминах функции предельного состояния

$$P\,(t) = \text{Prob}\,[R\,(X, t) - Q\,(X, t) < 0]. \tag{3}$$

Таким образом, зависимостями (2), (3) долговечность формулируется как понятие, функционально связанное с надежностью. Максимальным значением t удовлетворяющим зависимостям (2), (3), и является долговечность T.

Модифицированное графическое представление процесса деградации железобетона Tuutti, предложенное в 1982 г., представляет собой линейную функцию, описывающую признаки деградации с течением времени в зависимости от состояния защитного слоя бетона. Общепринятым является разделение процесса деградации железобетона на две фазы: пассивация (снижение pH) бетона и активная коррозия арматуры.

Постулируется, что можно прогнозировать ресурс элемента суммой прогнозов каждого из четырех этапов:

$$T = t_0^{\text{р}} + t_1^{\text{р}} + t_2^{\text{р}} + t_3^{\text{р}}. \tag{4}$$

Интегрально деградацию железобетона принято разделять на две фазы: насыщение защитного слоя карбонатами и хлоридами и активная коррозия арматуры [5; 8]. Модель, представленная Tuutti, часто используется в научном мире для представления процесса деградации.

В модели Tuutti уровень коррозионного повреждения железобетона может быть представлен как функция, зависящая времени. Здесь жизненный цикл железобетонного элемента под воздействием коррозии идеализирован как двухфазный процесс: фаза

накопления хлоридов, карбонизация защитного слоя (деградация бетона защитного слоя элемента) и фаза распространения коррозионных повреждений арматуры, в которой из-за опасной концентрации хлоридов на поверхности арматуры и низкий уровень pH после карбонизации и выщелачивания проходит необратимое коррозионное разрушение арматуры, прямым образом уменьшает прочностные характеристики элемента.

Процесс депасивации проходит в течение определенного периода времени, обозначенного t_P, который продолжается, начиная с момента строительства и до начала активной коррозии арматуры. Фаза распространения коррозионных повреждений арматуры, сказывается t_{CORR}, начинается с момента окончания, где пассивации бетона t_P, сопровождается трещинообразованиями, отслоением защитного слоя и продолжается до отказа элемента t_{CR}. Модели оценки продолжительности каждого из слагаемых разрабатываются отдельно.

Поэтому время службы элемента до отказа t_{CR} определяется как сумма времени, где пассивации защитного слоя t_P и времени распространения коррозионных повреждений арматуры t_{CORR}:

$$t_{CR} = t_P + t_{CORR}. \quad (5)$$

В других моделях утверждается, что процесс деградации железобетонного элемента при его взаимодействии с хлоридной средой следует рассматривать в виде суммы продолжительности всех этапов.

Также в работах [4; 10] приведены последствия повреждения агрессивной хлоридно-активной средой железобетонного элемента: уменьшение сплошности, снижение адгезии и расслоения; уменьшение площади поперечного сечения арматуры; изменение механических свойств (пластичности) арматурной стали; нарушение сцепления арматуры с бетоном; растрескивание бетона защитного слоя от растущего давления, вызванного продуктами коррозии арматуры, а значит нарушения в совместной работе арматуры и бетона прямо означают снижение несущей способности и ресурса железобетонного элемента.

Список использованных источников

1. **Кришан, А. Л.** Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром : дис. … д-ра техн. наук / А. Л. Кришан. – Магнитогорск, 2011. – 380 с.

2. **Исследование** деформационных характеристик бетонных образцов лазерно-интерференционными методами / А. Г. Кесарийский, В. И. Кондращенко, Д. А. Гребенников и др. // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 4. – С. 154 – 159.

3. **Кудяков, А. И.** Смеси сухие растворные цементные с микрогранулированной воздухововлекающей добавкой / А. И. Кудяков, С. А. Белых, А. М. Даминова // Строительные материалы. – 2010. – № 1. – С. 52 – 53.

4. **Лагунова, Ю. А.** Разработка научно-технических основ повышения эффективности разрушения горных пород «в слое» : дис. … д-ра техн. наук / Ю. А. Лагунова. – Екатеринбург, 2009. – 289 с.

5. **Платонова, С. В.** Щелевидные фундаменты для жилищного строительства / С. В. Платонова ; под ред. Т. И. Барановой // Эффективные строительные конструкции:

теория и практика. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства ; Общество «Знание» России ; Приволжский дом знаний. – 2009. – С. 209 – 212.

6. **Старожилова, О. В.** Исследование напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов конструкций / О. В. Старожилова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17, № 4. – С. 38 – 43.

7. **Табаков, П. А.** Новая методика определения допускаемого износа деталей при эксплуатации / П. А. Табаков, А. А. Соломашкин, В. М. Михлин // Международный научный журнал. – 2011. – № 1. – С. 56 – 60.

8. **Пат.** на изобретение RUS 2266877. Строительная смесь и способ ее приготовления / Федорчук Ю. М., Зыков В. М., Зыкова Н. С., Цыганкова Т. С. – 28.06.2004.

9. **Магнитоуправляемые** наноструктурированные материалы / Г. П. Фетисов, К. А. Кыдралиева, Г. И. Джардималиева и др. // Технология металлов. – 2010. – № 8. – С. 21 – 24.

10. **Хостикоев, М. З.** Основы создания адаптивных металлообрабатывающих инструментов / М. З. Хостикоев // Механизация и автоматизация производства. – 1978. – № 11. – С. 23 – 26.

11. **Перспективы** применения техногенного сырья и модифицирующих добавок природного происхождения при строительстве карьерных дорог / А. А. Христофорова, М. Д. Соколова, С. Э. Филиппов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 11. – С. 409 – 415.

References

1. **Krishan, A. L.** Prochnost' trubobetonnykh kolonn s predvaritel'no obzhatym yadrom // Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. – Magnitogorsk, 2011. – 380 s.

2. **Issledovaniye** deformatsionnykh kharakteristik betonnykh obraztsov lazerno-interferentsionnymi metodami / Kesariyskiy A. G., Kondrashchenko V. I., Grebennikov D. A., Guzenko S. V., Chan Tkhi Tkhu Kha // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2009. – № 4. – S. 154 – 159.

3. **Smesi s**ukhiye rastvornyye tsementnyye s mikrogranulirovannoy vozdukhovovlekayushchey dobavkoy / Kudyakov A. I., Belykh S. A., Daminova A. M. // Stroitel'nyye materialy. – 2010. – № 1. – S. 52 – 53.

4. **Lagunova, Yu. A.** Razrabotka nauchno-tekhnicheskikh osnov povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod “v sloye” // Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. – Yekaterinburg, 2009. – 289 s.

5. **Shchelevidnyye** fundamenty dlya zhilishchnogo stroitel'stva / Platonova S. V. // Effektivnyye stroitel'nyye konstruktsii: teoriya i praktika Penzenskiy gosudarstvennyy universitet arkhitektury i stroitel'stva, O-vo “Znaniye” Rossii, Privolzhskiy dom znaniy ; pod redaktsiyey: T. I. Baranovoy. – 2009. – S. 209 – 212.

6. **Issledovaniye** napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkostennykh elementov konstruktsiy / Starozhilova O. V. // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – V. 17, № 4. – S. 38 – 43.

7. **Novaya** metodika opredeleniya dopuskayemogo iznosa detaley pri ekspluatatsii / Tabakov P. A., Solomashkin A. A., Mikhlin V. M. // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. – 2011. – № 1. – S. 56 – 60.

8. **Fedorchuk, Yu. M.**, Zykov V. M., Zykova N. S., Tsygankova T. S. Stroitel'naya smes' i sposob yeye prigotovleniya // Patent na izobreteniye RUS 2266877. – 28.06.2004.

9. **Magnetically** controlled nanostructured materials / Fetisov G. P., Kydraliyeva K. A., Dzhardimaliyeva G. I., Pomogailo S. I., Golubeva N. D., Pomogailo A. D. // Metal Technology. – 2010. – № 8. – S. 21 – 24.

10. **The basics** of creating adaptive metalworking tools / Khostikoev M. Z. // Mechanization and automation of production. – 1978. – № 11. – S. 23 – 26.

11. **Khristoforova, A. A.**, Sokolova M. D., Filippov S. E., Zarovnyaev B. N., Gogolev I. N. Prospects for the use of technogenic raw materials and modifying additives of natural origin in the construction of career roads // Gornyi informative-analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2012. – № 11. – S. 409 – 415.

УДК 631.3.021

Ведищев С. М., Прохоров А. В., Хольшев Н. В., Выгузов М. Е.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)635794, e-mail: serg666_65@ mail.ru)

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДОЗЫ В БАРАБАННОМ ДОЗАТОРЕ С ПОДВИЖНЫМИ ЛОПАТКАМИ В ЯЧЕЙКАХ

Vedishchev S. M., Prokhorov A. V., Golyshev N. V., Vyguzov M. Ye.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)635794, e-mail: serg666_65@ mail.ru)

THE MODEL OF DOSE FORMATION IN THE DRUM BATCHER WITH THE MOVING BLADES IN THE CELLS

Аннотация. В статье предложена конструктивно-технологическая схема барабанного дозатора с изменяемым объемом ячеек. Рассмотрена математическая модель формирования дозы материала в ячейке барабанного дозатора в зоне загрузочного окна. В результате анализа математической модели определены граничные условия работоспособности, а также выявлены факторы, влияющие на конструктивные параметры дозатора и процесс дозирования материала.

Ключевые слова: барабанный дозатор, модель формирования доза, поверхность кулачка, ячейка, подвижная лопатка.

Abstract. The article considers a design and technological scheme of a drum batcher with a variable volume of cells. The mathematical model of the material dose formation in the drum batcher's cell in the area of loading gate is considered. As a result of the analysis of the mathematical models the boundary conditions of operational integrity, as well as the factors affecting design parameters of the batcher and the material dosing process are determined.

Keywords: drum batcher, dose formation model, cam track, cell, moving blades.

Введение. В сельском хозяйстве применяется большое количество разнообразных дозаторов. Объемное дозирование материалов находит наибольшее применение из-за более простой конструкции дозирующего элемента машины и более надежной работы. Барабанный дозатор с установленными лопатками в ячейках выдает дозируемый материал в порционном и непрерывном режимах с возможностью плавно и оперативно изменять дозу. Моделирование процесса формирования дозы материала является одной из важных задач при разработке и проектировании машин для приготовления и выдачи корма.

Конструкция предлагаемого дозатора представлена на рис. 1. При вращении ротора барабанного дозатора с подвижными лопатками в ячейках против часовой стрелки подвижные лопатки *15* совершают возвратно-вращательное движение (рис. 1). При подходе ячеек к загрузочному окну ролики *2* накатываются на копиры *10* и поворачивают собачки *17* относительно осей *4* по часовой стрелке, секторные храповики *5* расфиксируются, ролики *2* с секторными храповиками, подходя под копиры *6*, и под их действием устремляются к оси вращения барабана [4, 5, 7]. Одновременно свободные концы подвижных лопаток *15* также перемещаются к оси барабана, в результате чего образуется максимальный объем ячеек.

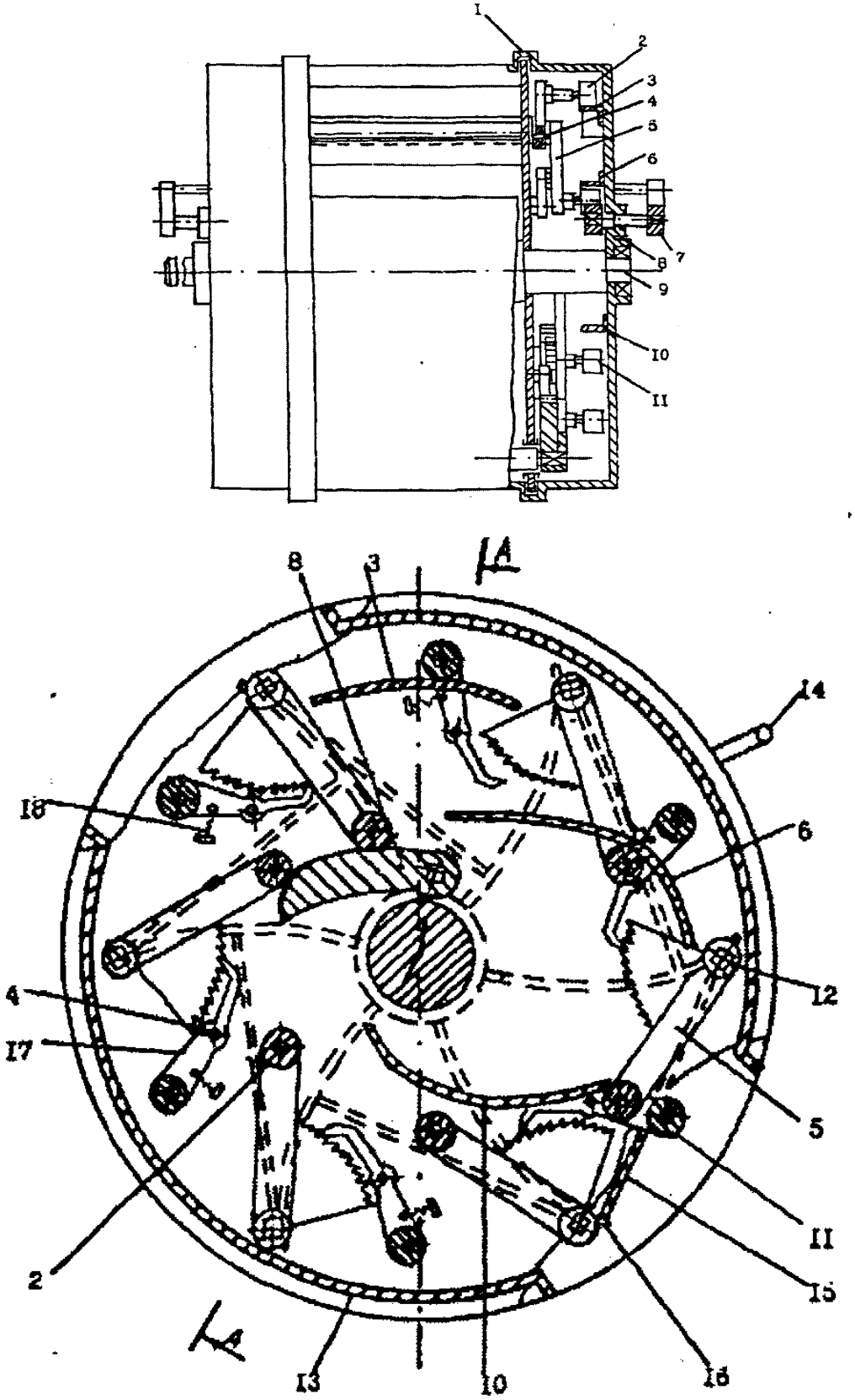


Рис. 1. Схема барабанного дозатора с подвижными лопатками в ячейках:
1 – торцевая стенка; *2*, *11* – ролики; *3*, *6*, *10* – копиры; *4*, *12* – ось; *5* – ручка; *7* – втулка; *8* – кулачек; *9* – вал; *13* – корпус; *14* – рамка; *15* – подвижная лопатка; *16* – лопаст; *17* – собачка; *18* – пружина

При перемещении лопаток *15* к оси барабана ячейки заполняются материалом. При дальнейшем перемещении ячейки в зоне загрузочного окна ролики *2* накатываются на рабочую поверхность кулачков *8*, которые поворачиваются вместе с осью *7* при повороте рамки *14* на заданный угол. В результате этого подвижная лопатка *15* перемещается к загрузочному окну барабана, формируя заданный объем ячейки. Под действием пружин *18* собачки *17* фиксируют рычаги с секторными храповиками *5*, предотвращая обратное движение лопаток *15* к центру барабана и не мешая им двигаться к загрузочному окну. Благодаря этому исключается досыпание материала в ячейки при сходе роликов с рабочей поверхности кулачков *8*.

Выгружается материал из ячеек лопатками *15* при подходе их к выгрузному окну в результате накатывания роликов *11* на копир *10*.

Theoretical research. При выдаче в непрерывном режиме подачу барабанного дозатора рассчитывают по формуле [1]

$$Q = V_{я} \cdot z \cdot n \cdot \rho \cdot \varphi_{зап}, \tag{1}$$

где n – частота вращения барабана дозатора, с$^{-1}$; $V_{яi}$ – объем ячейки при выдаче i-й дозы, м^3; z – количество ячеек; ρ – насыпная плотность материала, кг/м^3; $\varphi_{зап}$ – коэффициент заполнения ячеек.

Радиус барабана дозатора определяется, исходя из заданной подачи или максимального значения дозы в одной ячейке [2, 3, 5, 6]:

$$R = \sqrt{\frac{q_{\max}}{0{,}35 L \rho \varphi_{я}}}, \tag{2}$$

где $q_{\max}$ – максимальная величина материала в одной ячейке, кг; $\varphi_{я}$ – коэффициент заполнения ячейки ($\varphi_{я}$ = 0,85…0,95); L – рабочая длина дозирующей ячейки, м.

Чтобы определить пределы изменения объема ячеек в зависимости от угла поворота кулачка, рассмотрим схему (рис. 2). В месте установки кулачка внутренний копир имеет форму круга с радиусом r_1. Кулачок выполнен из пластины с радиусами скругления r_2 и r_3 (рис. 3), расстояние между центрами скругления $O_1O_2 = l$. Радиус изгиба лопасти равен радиусу корпуса дозатора R (рис. 2). Толщиной лопаток и лопастей при расчете пренебрегаем ввиду их малых размеров. Наиболее удаленной точкой кулачка от центра вращения O при его повороте на некоторый угол будет точка пересечения прямой, проходящей через центр O и O_2 и рабочей поверхностью копира. Центр вращения ролика O_3 находится на расстоянии k от шарнира.

Площадь сечения дозирующей ячейки условно разобьем на два участка – сегмент AmB и сектор ABC. Их площади обозначим через S_1 и S_2. Полный объем дозирующей ячейки [3]:

$$V = L(S_1 + S_2). \tag{3}$$

Рассмотрим схему (рис. 2) в тот момент, когда кулачок занимает крайнее нижнее положение с начальными углами α_0 и β_0. При изменении объема ячейки, площадь S_1

остается постоянной, а так как треугольник AOB равносторонний ($AB = OB = OA$ из конструкции дозатора), то $\angle AOB = \pi/3$. Тогда площадь:

$$S_1 = \frac{R^2}{2}\left(\frac{\pi}{3} - \sin\frac{\pi}{6}\right), \tag{4}$$

$$S_2 = \frac{R^2}{2}\left(\frac{\pi}{3} - \varepsilon - \beta_0\right). \tag{5}$$

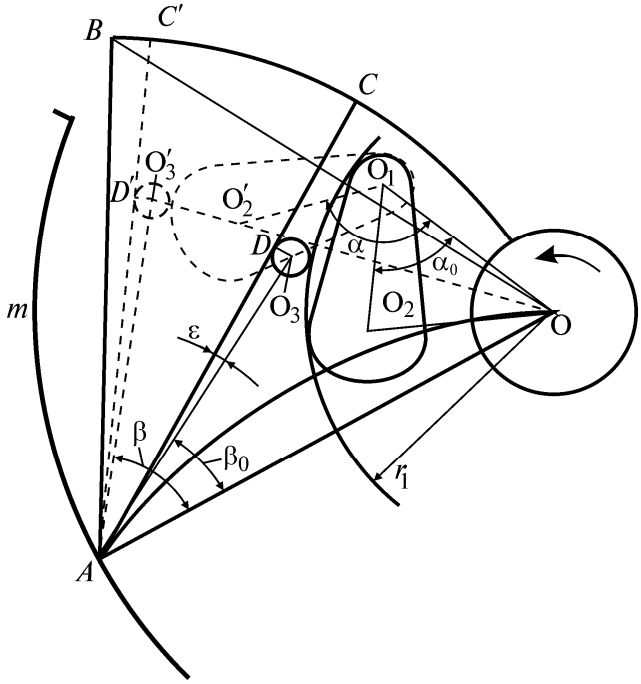


Рис. 2. Расчетная схема кулачкового механизма дозатора

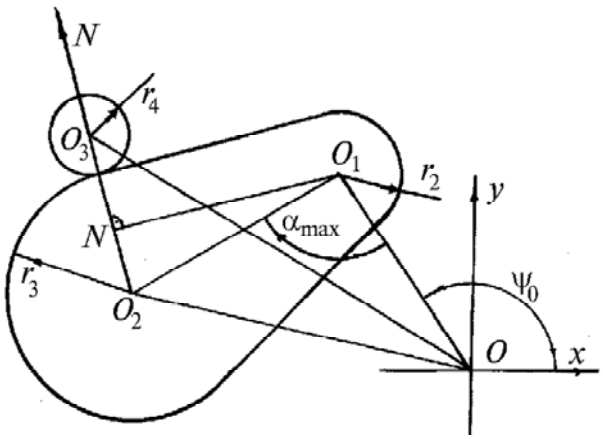


Рис. 3. Схема для определения *l*

Угол ε находим из треугольника ΔADO_3. Так как $AD \perp DO_3$, то $\varepsilon = \arcsin\frac{r_4}{k}$, а β_0 из ΔAO_3O, используя теорему косинусов

$$\beta_0 = \arccos\frac{R^2 + k^2 - (O_3O)^2}{2Rk},$$

где $O_3O = r_4 + r_1$.

Тогда

$$\beta_0 = \arccos\frac{R^2 + k^2 - (r_4 + r_1)^2}{2Rk},$$
$$\alpha_0 = \arccos\frac{(r_1 - r_2)^2 + l^2 - (r_1 - r_3)^2}{2Rk}. \quad (6)$$

Подставим в уравнение (5) найденные значения ε и β_0:

$$S_2 = \frac{R}{2}\left(\frac{\pi}{3} - \arcsin\frac{r_4}{k} - \arccos\frac{R^2 + k^2 - (r_4 + r_1)^2}{2Rk}\right). \quad (7)$$

Подставим в (3) значения из (4) и (7) и получим максимальный объем ячейки:

$$V_{\max} = \frac{LR^2}{2}\left[\left(\frac{\pi}{3} - \sin\frac{\pi}{6}\right) + \left(\frac{\pi}{3} - \arcsin\frac{r_4}{k} - \arccos\frac{R^2 + k^2 - (r_4 + r_1)^2}{2Rk}\right)\right]. \quad (8)$$

При повороте кулачка относительно точки O_1 (см. рис. 2) – штриховые линии) на некоторый угол α прямая O_1O_2, займет положение O_1O_2', а центр ролика – O_3'. Линия лопатки переместится к хорде AB и займет положение AC'. В результате угол β_0 увеличится и будет равен β, площадь сектора S_2 также изменится.

Рассмотрев тригонометрические зависимости, угол β можно выразить так:

$$\beta = \arccos\left[\frac{R^2 + k^2 - \left(r_3 + r_4 + \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + l^2 - 2(r_1 - r_2)l\cos\alpha}\right)}{(2Rk)}\right]. \quad (9)$$

В момент, когда кулачок занимает крайнее верхнее положение, объем ячейки будет минимальным. С учетом зависимости (5) выражение (8) примет вид

$$V = \frac{LR^2}{2}1{,}227 - \arcsin\frac{r_4}{k} - \frac{\arccos\left(R^2 + k^2 - (r_3 + r_4)^2 + \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + l^2 - 2(r_1 - r_2)l\cos\alpha}\right)^2}{(2Rk)^2}. \quad (10)$$

Аналитическое уравнение, связывающее угол давления и основные параметры качающегося роликового толкателя и кулачка имеет вид [2]

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{k(1 + \beta')}{R\sin\beta} - \mathrm{ctg}\beta, \quad (11)$$

где γ – угол давления (угол между нормальным давлением N и полезным компонентом ее составляющей Q, направленным по скорости движения лопатки, т.е. та часть силы N, которая используется для совершения полезной работы при движении лопатки) (рис. 4), град; k – расстояние от точки A_i до O_3, т.е. $k = A_iO_3$; β' – угловое ускорение движения лопатки; R – радиус барабана дозатора ($R = A_iO$); β – текущее значение угла наклона лопатки к центральной линии ($\beta = \angle O_3A_iO$).

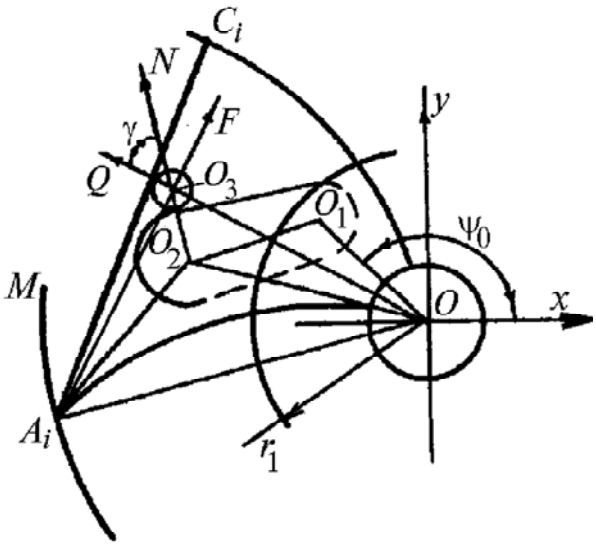


Рис. 4. Схема для определения l и $\gamma_{доп}$

Из выражения (10) видно, что угол γ будет увеличиваться с увеличением угла β (при k = const и R = const). Следовательно, максимальное значение угла γ будет наблюдаться в положении ячейки, показанном на схеме (рис. 4) при отклонении кулачка на максимальный угол α_{max}. При синтезе кулачковых механизмов по допустимому углу давления, который зависит от материала кулачка и ролика, должно соблюдаться неравенство $\gamma \le \gamma_{max}$. Из схемы (рис. 4) видно, что

$$\angle A_iO_3O_2 = \frac{\pi}{2} - \gamma .$$

Используя теорему косинусов, из $\Delta A_iO_3O_2$ находим:

$$A_iO_2 = \sqrt{k^2 + (r_3 + r_4)^2 - 2k(r_3 + r_4)\sin\gamma}. \qquad (12)$$

Для определения OO_2 рассмотрим новое положение ячейки, при котором его объем становится максимальным, но при том же угле α_{max} (рис. 3).

Из схемы (рис. 5) видно, что $OO_2 = OO_3' - O_2O_3'$. Значение OO_3' находим из $\Delta A_iOO_3'$: $OO_3' = \sqrt{k^2 + R^2 - 2kR\cos\beta_{max}}$, так как $\beta_{max} = \frac{\pi}{3} - \varepsilon$, а $O_2O_3' = r_3 + r_4$, то

$$OO_2 = \sqrt{k^2 + R^2 - 2Rk\cos\left(\frac{\pi}{3} - \varepsilon\right)} - (r_3 + r_4), \qquad (13)$$

OO_3' находим из $\Delta A_i OO_3'$ (см. рис. 5):

$$OO_3' = \sqrt{k^2 + R^2 - 2Rk\cos\angle O_3' A_i O}\,, \tag{14}$$

где $\angle O_3' A_i O = \angle O_3' A_i O_2 + \angle O_2 A_i O$.

Из $\Delta O_3' A_i O_2$ определяем $\angle O_3' A_i O_2$ по теореме синусов:

$$\frac{A_i O_2}{\sin\angle A_i O_3' O_2} = \frac{O_2 O_3'}{\sin\angle O_3' A_i O_2}\,,$$

отсюда

$$\angle O_3' A_i O_2 = \arcsin\frac{(r_3 + r_4)\cos\gamma}{A_i O_2}. \tag{15}$$

Угол $\angle O_2 A_i O$ определим из $\Delta O_2 A_i O$ (см. рис. 5):

$$\angle O_2 A_i O = \arccos\frac{A_i O_2^{\,2} + R^2 - OO_2^{\,2}}{2R \cdot A_i O_2}. \tag{16}$$

Таким образом

$$\angle O_3' A_i O = \arcsin\frac{(r_3 + r_4)\cos\gamma}{A_i O_2} + \arccos\frac{A_i O_2^{\,2} + R^2 - OO_2^{\,2}}{2R \cdot A_i O_2}\,, \tag{17}$$

где $A_i O_2$ – определяется из выражения (12), OO_2 – определяется по формуле (13).

С другой стороны, из $\Delta OO_2 O_3$:

$$OO_3 = \sqrt{(r_3 + r_4)^2 + OO_2^{\,2} - 2(r_3 + r_4)\cdot OO_2 \cdot \cos\angle O_3 O_2 O}\,. \tag{18}$$

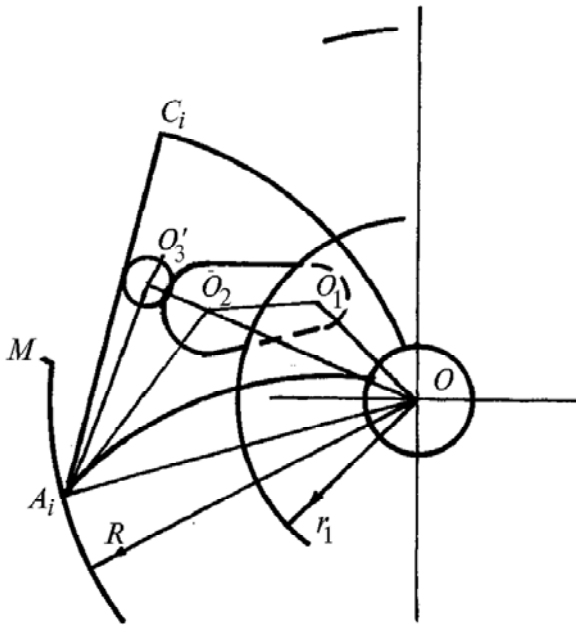


Рис. 5. Схема для определения OO_2

Из схемы (рис. 5) видно, что

$$\angle O_3O_2O = \angle NO_2O_1 + \angle O_1O_2O. \tag{19}$$

Из ΔNO_2O_1 находим $\angle NO_2O_1$:

$$\angle NO_2O_1 = \arccos\frac{O_2N}{O_2O_1} = \arccos\frac{r_3 - r_2}{l},$$

а $\angle O_1O_2O$ определим из ΔO_1O_2O:

$$\angle O_1O_2O = \arccos\frac{l^2 + OO_2{}^2 - (r_1 - r_2)^2}{2l \cdot OO_2}, \tag{20}$$

где $r_1 = OO_1 + r_2$ – расстояние от оси вращения барабана точки O до оси крепления кулачка, точки O_1; $O_1O_2 = l$.

Из треугольника $\Delta A_iOO_3'$ (рис. 4) находим OO_2:

$$OO_2 = \sqrt{R^2 + k^2 + 2Rk\cos\beta_{\max}} - (r_3 + r_4),$$

где $\beta_{\max}$ – наименьший угол отклонения лопатки к линии A_iO. Известно, что $\beta_{\max} \geq \pi/3 - \varepsilon$.

Подставляя последнее выражение в уравнение (19), получим

$$\angle O_3O_2O = \arccos\frac{r_3 - r_2}{l} + \arccos\frac{l^2 + OO_2{}^2 - (r_1 - r_2)^2}{2l \cdot OO_2}. \tag{21}$$

Приравняв выражения (17) и (21), найдем

$$\cos\angle O_3O_2O = \frac{(r_3 + r_4)^2 + OO_2{}^2 + 2kR\cos\angle O_2A_iO - k^2 - R^2}{2(r_3 + r_4) \cdot OO_2}.$$

Обозначив правую часть последнего уравнения через B, $\angle O_3O_2O = \arccos B$. Учитывая выражение (21),

$$\arccos\frac{r_3 - r_2}{l} + \arccos\frac{l^2 + OO_2{}^2 - (r_1 - r_2)^2}{2l \cdot OO_2} = \arccos B.$$

После преобразования и решения данного уравнения получим

$$l = \sqrt{-\frac{N}{2} + \sqrt{\frac{N^2}{4} - M}}, \tag{22}$$

где $N = 2n + B^2d^2 + d^2 - 2Bmd$; $M = 2Bmdn - n^2 - md^2$; $n = OO_2 - (r_1 - r_2)^2$; $m = r_3 - r_2$; $d = 2OO_2$.

Results and discussion. Анализируя теоретические зависимости представленные выше, можно сделать следующие выводы:

– уравнение (10) справедливо только при $\alpha \geq \alpha_0$, так как при $\alpha < \alpha_0$ прекращается воздействие кулачков на ролики, и они перекатываются по внутреннему копиру с постоянной кривизной поверхности, т.е. угол β не изменяется;

– чтобы подвижные лопатки не изгибались по лопасти при загрузке материала, должно соблюдаться условие $\beta_0 + \varepsilon > \pi/6$;

– основными параметрами (см. уравнение 10), определяющими объем дозирующих ячеек, служат радиусы корпуса R и внутреннего копира r_1, длина кулачка l, расстояние от центра шарнира до центра вращения ролика k, угол α (от радиусов R и r_1 зависит максимальный объем ячеек, от l до k – предел регулирования объема);

– оперативно регулировать дозу при дискретном дозировании материала можно за счет изменения угла поворота кулчака α;

– радиусы скруглений кулачка r_2 и r_3 (см. рис. 3) выбираются из конструктивных соображений с проверкой по статическому условию сохранности профиля кулачка или по условию его долговечности;

– расстояние между центрами скруглений ($O_1O_2 = L$, см. рис. 3) выбираются из следующих условий: по допустимому углу давления в кинематической паре (ролик–кулачок); по возможности формирования минимальной дозы.

Список используемых источников

1. **Ведищев, С. М.** Дозатор кормов [Текст] / С. М. Ведищев, В. Т. Щедрин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 4. – С. 489 – 493.

2. **Ведищев, С. М.** Мобильный кормораздатчик (статья на французском языке) Distributeur de fourrages mobile [Текст] / С. М. Ведищев, В. Т. Щедрин, А. В. Бояршинов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 4. – С. 659 – 667.

3. **Ведищев, С. М.** Совершенствование рабочего процесса и обоснование параметров бункерного раздатчика кормов для свиней : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / С. М. Ведищев. – Саратов, 1996. – 173 с.

4. **Щедрин, В. Т.** Барабанный дозатор [Текст] / В. Т. Щедрин, С. М. Ведищев // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – № 1. – С. 13 – 15.

5. **Щедрин, В. Т.** Барабанный дозатор для порционной выдачи кормов [Текст] / В. Т. Щедрин, С. М. Ведищев // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2001. – Т. 1, № 4. – С. 61 – 65.

6. **Щедрин, В. Т.** Кормораздатчик [Текст] / В. Т. Щедрин, С. М. Ведищев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1995. – № 5,6. – С. 15 – 17.

7. **Щедрин, В. Т.** Кормораздатчик для свиней [Текст] / В. Т. Щедрин, С. М. Ведищев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1993. – № 3. – С. 6–7.

8. **Юдин, В. А.** Теория механизмов и машин : учебное пособие для втузов / В. А. Юдин, Л. В. Петрокас. – М. : Высшая школа, 1977. – 527 с.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

СТРУКТУРА ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЕЙ РЕЗЬБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ШАГОВОГО ГИДРОПРИВОДА

Vanin V. A., Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

THE STRUCTURE OF FORMING CHAINS OF A THREAD-MILLING MACHINEBASED ONA STEPPER HYDRAULIC DRIVE

Аннотация. Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) кинематических цепей резьбофрезерного станка в виде унифицированных гидравлических связей на основе шагового гидропривода в целях повышения точности, снижения металлоемкости.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The possibility of building internal (forming) kinematic chains of a thread milling machine in the form of unified hydraulic connections based on a stepper hydraulic drive in order to improve accuracy and reduce metal consumption is considered.

Keywords: optimum building, metal-cutting machine, hydraulic stepper drive, hydraulic generator pulses.

Резьбофрезерные станки применяются для изготовления резьбы резанием с помощью многолезвийного режущего инструмента, совершающего главное вращательное движение. Заготовка совершает вращательное и поступательное движение подачи, между которыми осуществляется жесткая кинематическая связь.

Резьбофрезерование можно осуществлять двумя способами:

1. Фрезерование кольцевой (гребенчатой фрезой с затылованным зубом, ширина которой несколько больше длинны нарезаемой части резьбы). Этот метод эффективен при нарезании резьбы на деталях, которые имеют лыски или прорези, при обработке тонкостенных деталей, деталей с центрируемыми резьбами. Оси заготовки и инструмента параллельны и поворота на угол подъема винтовой линии резьбы не производится; при этом заготовка или инструмент совершает осевое перемещение соответственно шагу нарезаемой резьбы.

Осевая подача заготовки осуществляется кулачком настройки шага, значение которого при полном обороте соответствует подъему резьбы заготовки. Это перемещение связано с вращением заготовки, но необходима кинематическая связь для настройки типа резьбы к шпинделю изделия. Для каждого значения величины шага резьбы требуется сменный кулачок для настройки.

2. Фрезерование длинных резьб дисковым профильным инструментом (дисковой профильной фрезой с затылованным зубом); ось фрезы устанавливается по отношению к оси заготовки под углом подъема винтовой линии. Движение резания складывается из осевого движения инструмента и вращательного движения инструмента.

Построение внутренних (формообразующих) кинематических цепей на основе синхронной гидравлической связи в виде шагового гидропривода делает возможным не конструировать индивидуально кинематические цепи станков, каждый раз заново для каждого типа и модели станка, а компоновать их из функционально и конструктивно завершенных агрегатов (модулей), взятых в такой комбинации, при которой обеспечиваются необходимые формообразующие движения, выходная точность станка, рациональная компоновка кинематики станка, что позволяет значительно упростить кинематическую структуру станка за счет максимального исключения из состава цепей до возможного минимума всех промежуточных звеньев цепей и прямого соединения исполнительного силового шагового двигателя непосредственно с заготовкой и инструментом, связанных внутренней цепью без применения промежуточных коробок подач, редукционных передач; отделить управляющую часть системы от силовой, чтобы получить гидравлические управляющие устройства, которые формируют управляющие сигналы без влияния изменения нагрузки на реагирующую часть, создать гидравлическую агрегатную унифицированную систему, из элементов которой возможно скомпоновать внутренние (формообразующие) кинематические цепи станков различного технологического назначения.

Ниже приведена структурная схема резьбофрезерного станка, формообразующие цепи которого выполнены в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода.

На рисунке 1 представлена структурная схема резьбофрезерного станка с гидравлическими связями в цепях продольной и поперечной подачи инструмента с управлением от блока торцовых гидрораспределителей [1 – 3] для нарезания коротких резьб гребенчатыми фрезами.

Станок включает в себя инструмент (гребенчатая фреза) *11*, который совершает главное вращательное движение от электродвигателя *Д1* через звено настройки i_v и заготовку *10*, осуществляющую вращательное (движение круговой подачи) от электродвигателя *Д2* через звено настройки i_s.

Движение продольной подачи – перемещение фрезы в продольном направлении – осуществляется от шагового гидродвигателя *17*, кинематически связанного с барабаном *16* продольной подачи, со сменными кулачками.

Поперечное перемещение инструмента *11* в радиальном направлении для получения полной глубины фрезерования осуществляется шаговым гидродвигателем *13*, кинематически связанным с барабаном радиальной (поперечной) подачи *14*.

Управление шаговым гидродвигателем *17* и *12* продольного и поперечного перемещения фрезерной бабки *13* с инструментом *11* осуществляется от блоков *9* и *18* гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости, выполненных на основе двухкромочного золотника.

Настройка цепей продольного и поперечного перемещения фрезерной бабки *13* на требуемое передаточное отношение производится генератором гидравлических импульсов *3*, представляющих собой набор кодирующих дисков, закрепленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора *2*.

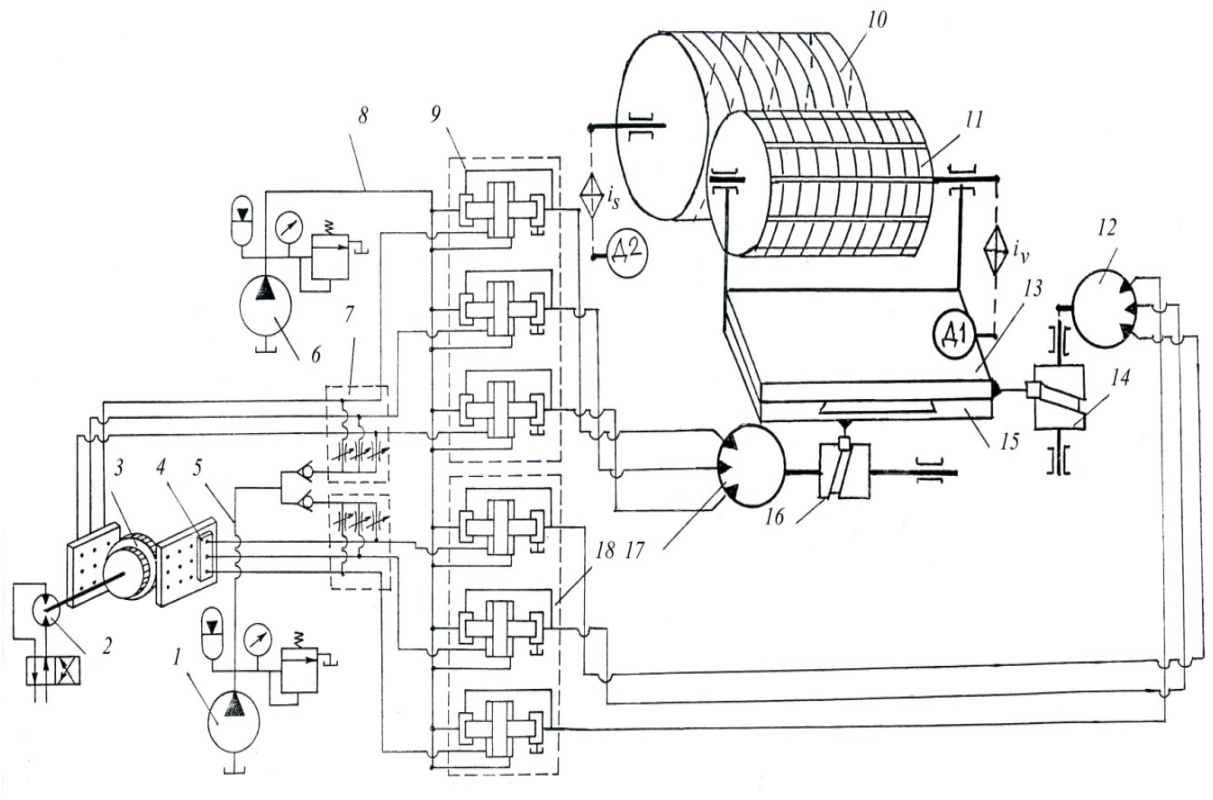


Рис. 1. Структурная схема резьбонарезного станка с гидравлическими формообразующими связями для фрезерования коротких резьб

Генератор гидравлических импульсов обеспечивает постоянное для данной настройки отношение частот гидравлических импульсов давление, а следовательно, частот вращения выходных валов шаговых гидродвигателей *17* и *12* приводов продольного и поперечного перемещения фрезерной бабки *13* с инструментом *11*. Передаточное отношение между исполнительными движениями гидравлической связи от шаговых гидродвигателей *17* и *12* будет определяться количеством гидравлических импульсов, поданных к ним за один оборот блока кодирующих дисков генератора гидравлических импульсов. Изменение передаточного отношения производится перемещением ползушек *4* на корпусе генератора гидравлических импульсов относительно периферии кодирующего диска с разным числом выступов, при этом осуществляется коммутация потоков рабочей жидкости по силовым каналам, в зависимости от того, какая цепь управляющих каналов перекрыта в данный момент выступом вращающегося диска генератора гидравлических импульсов.

Рабочая жидкость для получения управляющих импульсов давления для гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости поступает от насосной установки *1* через блок постоянных дросселей *7*.

Рабочая жидкость от силовой насосной станции 6 поступает на вход блоков дискретных гидрораспределителей *9* и *18*, а затем, в зависимости от положения гидрораспределителей, по одному из силовых каналов передается в рабочие камеры шаговых гидродвигателей *17* и *13* приводов продольной и поперечной подачи фрезерной бабки.

Применения агрегатно-модульного принципа построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков позволяет [4 – 10]:

– существенно сократить время и трудоемкость проектирования и изготовления кинематических цепей;

– значительно повысить надежность работы модульной внутренней связи;

– расширять производственные возможности модульной системы путем ее постоянного наращивания на ранее разработанной элементной базе;

– улучшить условия эксплуатации и ремонтопригодности создаваемых модульных систем гидравлических связей путем уменьшения разнообразия цепей и их элементов;

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список используемых источников

1. **Резьбофрезерные** станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. В. Солдатов, Д. А. Харин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 303 – 314.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Металлорежущие** станки с гидравлическими связями на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, М. З. До, М. М. Дамап // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 167 – 176.

4. **Применение** шагового гидропривода для построения формообразующих цепей металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. С. Аверин, Н. А. Храмова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 1(50). – С. 250 – 259.

5. **Ванин, В. А.** Применение гидравлического шагового для построения внутренних цепей металлорежущих станков / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 5. – С. 19 – 25.

6. **Ванин, В. А.** Агрегатно-модульное построение внутренних (формообразующих) кинематических цепей металлорежущих станков на основе шагового привода / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // СТИН. – 2010. – № 9. – С. 2 – 6.

7. **Ванин, В. А.** Агрегатно-модульное построение внутренних (формообразующих) кинематических цепей металлорежущих станков на основе шагового привода / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // СТИН. – 2010. – № 10. – С. 2 – 5.

8. **Vanin, V. A.** Modular design based on hydraulic step drives for internal kinematic chains in metal-cutting machines / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – № 30(12). – P. 1248 – 1251.

9. **Vanin, V. A.** Application of hydraulic step drives in metal-cutting machine tools / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – № 30(5). – P. 446 – 450.

10. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. – 4 – 6 December 2017. – Tomsk, Russian Federation /I OP Conference Series: Materials Science and Engineering (327). – 2018.

References

1. **Thread** milling machines with hydraulic internal (formative) links based on stepper hydraulic drive / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. V. Soldatov, D. A. Kharin // Vestnik TSTU. – 2016. – V. 22, № 2. – P. 303 – 314.

2. **Vanin, V. A.**, Kolodin A. N. Machines with hydraulic internal (formative) links based on stepper hydraulic drive for machining helical surfaces. Directory. Engineering Journal with Attachments. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.** Metal-cutting machines with hydraulic connections based on stepper hydraulic drive in internal (shaping) chains / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, M. Z. To, M. M. Damp // Vestnik TSTU. – 2013. – V. 19, № 1. – P. 167 – 176.

4. **Vanin, V.A.** The use of stepping hydraulic drive for building shaping chains of machine tools with complex shaping movements / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. S. Averin, N. A. Khramova // Questions of modern science and practice. University. IN AND. Vernadsky. – 2014. – № 1(50). – P. 250 – 259.

5. **Vanin, V. A.** The use of hydraulic stepper to build internal chains of machine tools / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Bulletin of mechanical engineering. – 2010. – № 5. – P. 19 – 25.

6. **Vanin, V. A.** Aggregate-modular construction of internal (shaping) kinematic chains of machine tools based on stepper drive / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // STIN. – 2010. – № 9. – P. 2 – 6.

7. **Vanin, V. A.** Aggregate-modular construction of internal (shaping) kinematic chains of machine tools based on stepper drive / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // STIN. – 2010. – № 10. – P. 2 – 5.

8. **Vanin, V. A.** Modular design based on hydraulic step drives for internal kinematic chains in metal-cutting machines / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – № 30(12). – P. 1248 – 1251.

9. **Vanin, V.A.** Application of hydraulic step drives in metal-cutting machine tools / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – № 30(5). – P. 446 – 450.

10. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. – 4 – 6 December 2017. – Tomsk, Russian Federation / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (327). – 2018.

УДК 621.914.7: 621.833

Колодин А. Н., Родина А. А., Олейникова Ю. С.,
Аршинникова Т. А., Белякова К. А.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

ПОСТРОЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ШАГОВОГО ГИДРОПРИВОДА

Kolodin A. N., Rodina A. A., Olejnikova Yu. S.,
Arshinnikova T. A., Belyakova K. A.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

THE CONSTRUCTION OF THE FORMING CHAINSOF A TURNING MACHINEBASED ON A STEPPER HYDRAULIC DRIVE

Аннотация. Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) кинематических цепей в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода в станках токарной группы.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The possibility of construction of internal (forming) kinematic chains in the form of hydraulic connections on the basis of stepper hydraulic drive in a turing machine is considered.

Keywords: optimaldesign, metal-cutting machine, hydraulic stepper motor, hydraulic generator pulses.

Тенденцией перспективного развития металлорежущих станков является, дальнейшее повышение точности обрабатываемых изделий путем снижения суммарной кинематической погрешности согласованного перемещения инструмента и заготовки, уменьшения влияния на точность обработки различных возмущающих воздействий, снижение металлоемкости и существенное увеличение производительности станков при интенсификации режимов обработки.

Кинематическая структура металлорежущего станка составляется из ряда кинематических групп – формообразования, деления, врезания, управления и вспомогательных движений. Основой структуры станка является группы формообразования. Кинематическая структура металлорежущего станка зависит от геометрической формы, размеров обрабатываемой поверхности и метода обработки, который оказывает влияние на кинематическую структуру станка в зависимости от количества и характера исполнительных формообразующих движений инструмента и заготовки.

Для получения в станке определенного исполнительного движения необходимо создать кинематическую связь между исполнительными звеньями станка – заготовкой и инструментом и кинематическую связь этих звеньев с источником движения. Эти связи в большинстве случаев осуществляется с помощью механических звеньев как в цепях главного движения и подач, так и во внутренних (формообразующих) цепях

станков, при этом каждая из цепей строится как индивидуализированная конструкция для каждого типа станка, но разного габарита и различной точности [1].

Механические кинематические цепи отличаются непостоянной жесткостью, обусловленной протяженностью цепи жесткостью стыков в кинематических парах, числом таких кинематических пар.

Значительная протяженность кинематических цепей, особенно при сложном пространственном расположении рабочих органов при большом количестве промежуточных подвижных звеньев и при значительном расстоянии между подвижными рабочими органами (узлом заготовки и узлом инструмента), жесткие кинематические связи становятся сложными, что приводит к усложнению конструкции станка и снижению точности функционально связанных перемещений, большого количества элементов, составляющих цепи (валы, зубчатые передачи подшипники и т.п.).

Использование механических кинематических связей во внутренних (формообразующих) цепях металлорежущих станков не удовлетворяет возрастающим требованиям повышения точности, жесткости, снижения металлоемкости, а особенно построению таких цепей по агрегатно-модульному принципу в станках различного технологического назначения и разного типоразмера. Это особенно проявляется в металлорежущих станках, имеющих сложные разветвленные многозвенные механические переналаживаемые цепи значительной протяженности, в которых необходимо обеспечить жесткую функциональную связь для создания взаимосвязанных формообразующих движений заготовки и инструмента, таких как зубо- и резьбообрабатывающие станки

При сложном пространственном расположении исполнительных органов станка – узел заготовки и узел инструмента – кинематические цепи, составленные из механических звеньев, становятся протяженными, многозвенными, громоздкими, что приводит к усложнению цепи и станка, а также к снижению точности функционально связанных линейных или угловых перемещений.

Для обеспечения высокой точности функционально связанных перемещений все элементы кинематических цепей (зубчатые колеса, ходовые винты, червячные колеса и др.) должны быть выполнены с высокой точностью. Конструкция опор должна исключить биение валов и ходовых винтов в радиальном и осевом направлении.

Конечные звенья кинематической цепи во всех случаях монтируются на опорах качения высокой точности. При проектировании и построении кинематических цепей осуществляющих точные функционально связанные перемещения, необходимо предусмотреть меры для устранения зазоров между элементами кинематической цепи, особенно в конечных звеньях (в винтовых парах и в червячных передачах).

В основе построения гидравлических кинематических формообразующих цепей, станков лежит гидромеханическая синхронная передача «гидравлический вал» [2, 3].

На рисунке 1 представлена структурная схема токарно-затыловочного станка с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями для затылования конических групповых (гребенчатых) фрез [4, 5] с системой управления от блоков гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости.

Станок включает в себя заготовку *14*, совершающую вращательное движение от электродвигателя *Д*, через звено настройки i_v, инструмент *12*, связанный и взаимодействующий с заготовкой по цепи деления (затылования).

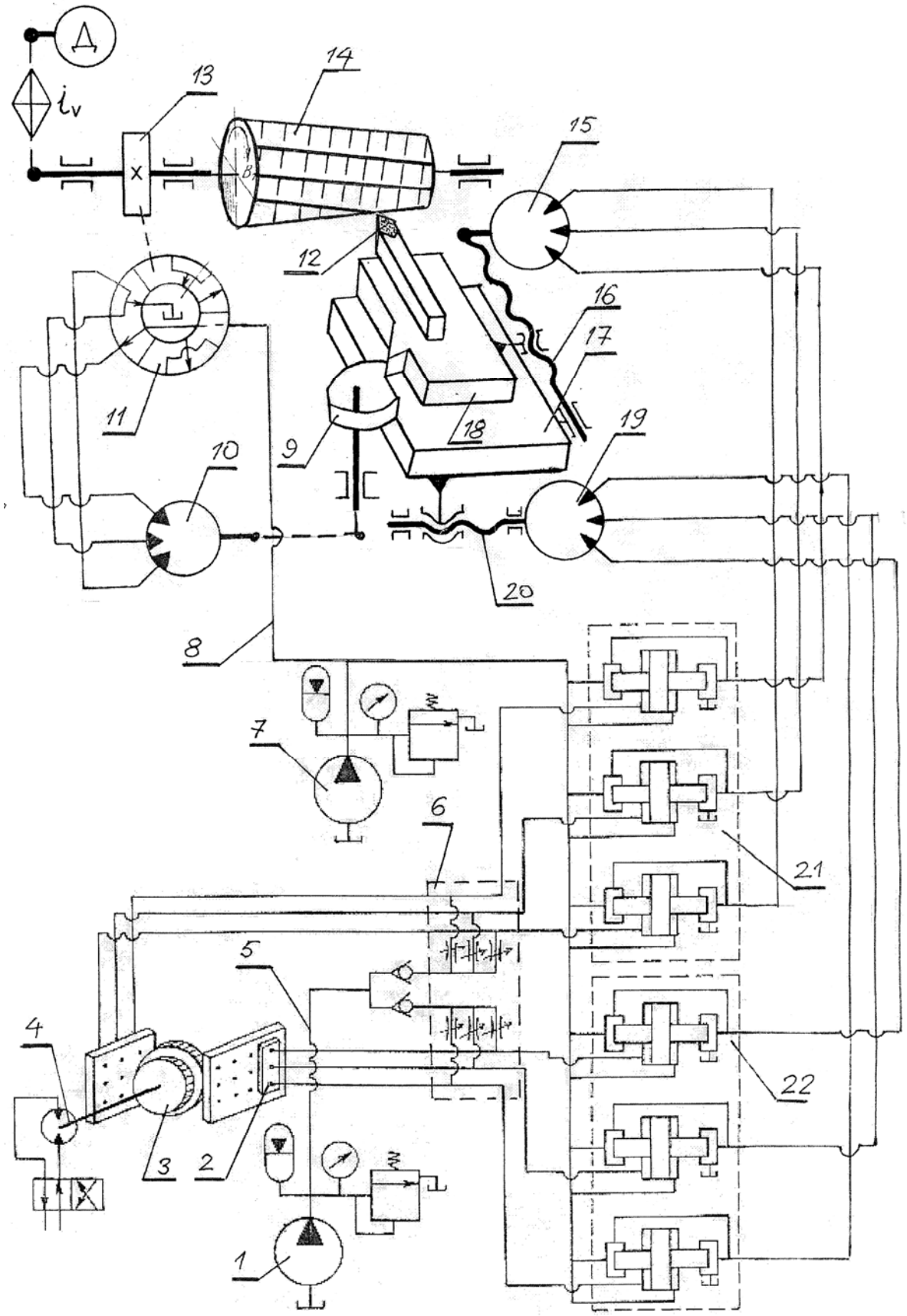


Рис. 1. Структурная схема токарно-затыловочного станка с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями для затылования конических групповых (гребенчатых) фрез

Движение деления (затылования), связывающее между собой вращение заготовки *14* и вращение кулачка затылования *9*, от которого получает возвратно-поступательное движение верхняя каретка *18* с инструментом *12*, осуществляется от шагового гидродвигателя *10*, и управляемого генератором гидравлических импульсов *11*, золотниковая втулка с расчетным числом рабочих щелей которого получает вращение от зубчатого колеса *13*, жестко закрепленного на шпинделе изделия *14*.

Продольное перемещение продольного суппорта *17* с инструментом осуществляется от шагового гидродвигателя *19*, кинематически связанного с продольным суппортом *17* посредством ходового винта *20* продольной подачи.

Поперечное перемещение верхней каретки *18* суппорта с инструментом *12*, связанное с продольным перемещением продольного суппорта *17* определенной зависимостью, необходимое для воспроизведения наклонной образующей, осуществляется от шагового гидродвигателя *15*.

Управление шаговым гидродвигателем *17* и *18* привода продольного перемещения инструмента *12* и поперечного перемещения верхней каретки *18* с инструментом *12* осуществляется от блоков торцовых гидрораспределителей *21* и *22*, которые состоят из трех одинаковых (по числу силовых каналов шаговых гидродвигателей) гидравлических распределителей с торцовым распределением рабочей жидкости, выполненных на базе двухкромочного золотника.

Настройка цепи обката (деления) на требуемое передаточное отношение производится, генератора гидравлических импульсов *3*, который представляет собой устройство, выполненное в виде набора кодирующих дисков, закрепленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора *4*.

Количество таких кодирующих дисков в генераторе определяет общее число передаточных отношений гидравлической связи.

Генератор гидравлических импульсов формирует гидравлические импульсы давления и распределяет их по рабочим камерам шаговых гидродвигателей путем периодического в определенной последовательности открытия и закрытия рабочих щелей. Наружная поверхность каждого из кодирующих дисков выполнена таким образом, что его выступы либо перекрывают сопло, либо оставляют его открытым, при этом один выступ диска может перекрывать только лишь одну щель, т.е. скважность между выступом и впадиной кодирующего диска выполняется в соотношении

$$\frac{1}{n-1},$$

где n – число щелей, соответствует числу каналов шагового гидродвигателя. Рабочие щели в корпусе генератора гидравлических импульсов располагаются с шагом

$$t_{щ} = t_{в}\left(m \pm \frac{1}{n}\right),$$

где $t_{в}$ – шаг выступов кодирующего диска, равный $t_{и} = \frac{360°}{z}$, здесь z – число выступов кодирующего диска; m – целое число, выбирается из условия удобного расположения и

подсоединения рабочих щелей к гидролиниям. При таком расположении щелей относительно выступов вращающегося кодирующего диска через две оставшиеся незакрытыми щели рабочая жидкость поступает на слив, а одна щель всегда перекрывается выступом диска. Поверхность кодирующего диска и рабочая щель (сопло) образует управляемый дроссель, а пространство между соплом и постоянным дросселем образует междроссельную камеру, давление в которой зависит от величины зазора между соплом и поверхностью выступов кодирующего диска.

В момент, когда выступ вращающегося диска генератора гидравлических импульсов находится напротив рабочей щели и перекрывает ее, происходит скачкообразное повышение управляющего давления в междроссельной камере, в результате чего происходит переключение гидрораспределителя. При отсутствии управляющего сигнала (импульса давления) распределитель находится в левом положении под действием давления питания. Рабочая жидкость для получения управляющих импульсов для гидрораспределителей с торцовым распределителем рабочей жидкости поступает от насосной установки *1* через блок управляемых дросселей *6*. Генератор гидравлических импульсов обеспечивает постоянное для данной настройки отношение частот гидравлических импульсов давления, а, следовательно, частот вращения выходных валов гидравлических шаговых двигателей заготовки и инструмента.

Коммутация потоков рабочей жидкости по силовым каналам и рабочим камерам шаговых гидродвигателей зависит от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент выступом вращающегося кодирующего диска генератора гидравлических импульсов.

Передаточное отношение между исполнительными органами гидравлической связи – шаговыми гидродвигателями *15* и *19* приводов продольного перемещения инструмента *12* и поперечного перемещения верхней каретки суппорта *18* зависит от соотношения частот гидравлических импульсов, формируемых генератором гидравлических импульсов и распределяемых по рабочим камерам исполнительных шаговых гидродвигателей, определяется количеством гидравлических импульсов, подаваемых за один оборот блока кодирующих дисков генератора гидравлических импульсов.

Изменение передаточного отношения цепи обката (деления) производится перемещением ползушек *2* на корпусе генератора гидравлических импульсов относительно периферии кодирующего диска с различным числом выступов, осуществляя при этом коммутацию потоков рабочей жидкости по силовым каналам, в зависимости от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент времени выступом вращающегося диска генератора импульсов.

Давление питания на вход каждого из гидрораспределителей подается через регулируемый дроссель блока дросселей *6* от насосной установки *1*, а затем, в зависимости от положения торцовых гидрораспределителей по одному из каналов поступает в рабочие камеры шаговых гидродвигателей *15* и *19* приводов продольного перемещения продольного суппорта *17* и поперечного перемещения верхней каретки суппорта *18*.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Гидравлические связи на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 10. – С. 28 – 36.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков с гидравлическими формообразующими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина // СТИН. – 2014. – № 5. – С. 2 – 8.

4. **Колодин, А. Н.** Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями : монография / А. Н. Колодин, В. А. Ванин, А. А. Родина. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 с.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

References

1. **Vanin, V. A.** Hydraulic connection on the basis of the hydraulic stepper in the internal (formative) chains of metal cutting machines with complex movements of formation / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2014. – № 10. – P. 28 – 36.

2. **Vanin, V. A.** Machines with a hydraulic internal (formative) relationships based on the walking hydraulic drive for processing spiral surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with hydraulic forming ties / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // STIN. – 2014. – № 5. – P. 2 – 8.

4. **Kolodin, A. N.** Relieving the forming machines with hydraulic connections : Monograph. / A. N. Kolodin, V. A.Vanin, A. A. Rodina. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 p.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

УДК 66.048.3.069.833

Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А.,
Анцыперов С. А., Черикова К. В.
Волгоградский технический университет, Россия, г. Волгоград
(Тел. 89177234615, e-mail: natasha292009@yandex.ru)

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ НА УРАВНЕНИЯ РАБОЧИХ ЛИНИЙ В ПРОЦЕССАХ РЕКТИФИКАЦИИ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ

Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A.,
Antsyperov S. A., Cherikova K. V.
Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd
(Tel. 8917723461, e-mail:natasha29200@yandex.ru)

INFLUENCE OF LONGITUDINAL DIFFUSION ON THE EQUATIONS OF WORKING LINES IN THE PROCESSES OF BINARY MIXTURE RETECTION

Аннотация. Аналитически, на основании дифференциальных уравнений материального баланса выведены уравнения рабочих линий и массопередачи в ректификационной колонне для бинарных смесей с учетом продольной диффузии. Показано, что в ее отсутствии, когда структура потоков по обеим фазам соответствует идеальному вытеснению, т.е. число Пекле продольной диффузии $Pe \to \infty$, а сам коэффициент продольной диффузии $De \to 0$, полученные уравнения рабочих линий и массопередачи переходят в известные уравнения для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны. Приведены сравнительные примеры расчета для типовых структур потока идеального вытеснения и по выведенным уравнениям, учитывающим продольную диффузию для бинарной смеси «метиловый спирт–этиловый спирт».

Ключевые слова: продольная диффузия, число Пекле, идеальное вытеснение, ректификация, рабочая линия, массопередача, укрепляющая и исчерпывающая части колонны.

Abstract. Analytically, on the basis of the differential equations of material balance, the equations of working lines and mass transfer in a rectifying column for binary mixtures with allowance for longitudinal diffusion are derived. It is shown that in its absence, when the flow structure for both phases corresponds to an ideal displacement, that is, the Peclet number of longitudinal diffusion, and the longitudinal diffusion coefficient itself, the resulting equations of working lines and mass transfer become known equations for the reinforcing and exhaustive parts of the column. Comparative examples of calculations for typical structures of the ideal displacement flow and for derived equations that take into account longitudinal diffusion for the binary mixture “ethyl alcohol-ethyl alcohol” are given.

Keywords: longitudinal diffusion, Pecle number, ideal displacement, rectification, working line, mass transfer, strengthening and exhaustive parts of the column.

Известные методы расчета тарельчатых ректификационных колонн основаны на модели идеального вытеснения по паровой фазе и идеального смешения по кипящему раствору, а насадочных – на идеальном вытеснении по обеим фазам [1 – 3]. В ряде работ по абсорбции, экстракции, адсорбции и ионообмену проводится учет продольного перемешивания, который базируется на диффузионной модели структуры потока по сплошной фазе [4 – 7].

Целью статьи является вывод уравнений рабочих линий и массопередачи для бинарной смеси в укрепляющей и исчерпывающей частях ректификационной колонны с учетом продольной диффузии по жидкой фазе, а также сравнение результатов расчетов технологических и геометрических параметров насадочной ректификационной колонны для бинарной смеси «метанол–этанол» по этим формулам, учитывающим продольное перемешивание, с типовым расчетом, соответствующим идеальному вытеснению.

Выделяем снизу колонны на расстоянии Z сечение I–I от входа исходной смеси в колонну (рис. 1). Согласно схеме, представленной на рисунке, материальный баланс по распределяемому компоненту для сечений 0–I с учетом скорости продольной диффузии будет иметь вид

$$\frac{(G_F+G_\Phi)}{3600M_{ж}}x_н+\frac{(G_ф+G_d)y}{3600M_g}+S\frac{\rho_ж}{M_ж}V_{Dн}=\frac{(G_F+G_ф)x}{3600M_{ж}}+\frac{(G_ф+G_d)y_F}{3600M_g}+\frac{S\rho_{ж}}{M_{ж}}\upsilon_D.$$

Скорость продольной диффузии по жидкой фазе можно записать в виде модифицированного закона Фика [1 – 4]:

$$V_D=-D_l\cdot\frac{dx}{dz}, \tag{1}$$

где D_l – коэффициент продольной диффузии по паровой фазе, м^2/с.

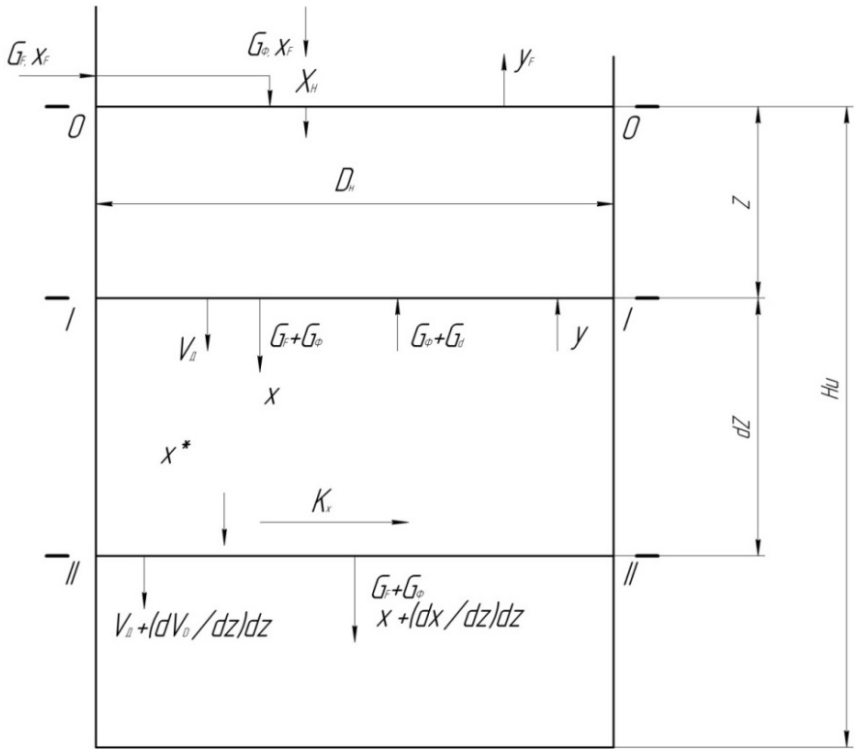


Рис. 1. Схема материальных потоков и их концентраций в исчерпывающей части ректификационной колонны с учетом продольной диффузии сечения 0–I высотой *Z* для вывода уравнения материального баланса (*a*) по обеим фазам; сечения I–II высотой *dz* для вывода уравнения материального баланса по жидкой фазе с учетом массопередачи

Тогда:

$$y = y_F + \frac{M_g}{M_{ж}} \frac{(G_F + G_Ф)}{(G_Ф + G_d)}(x - x_н) + \left[\frac{3600 M_g}{(G_Ф + G_d)}\right] D_e S \left[\left(\frac{dx}{dz}\right)_н - \left(\frac{dx}{dz}\right)\right] \frac{\rho_{ж}}{M_{ж}}.$$

С учетом того, что $\frac{G_F + G_Ф}{M_{ж}}$ – мольный расход жидкости в час, то их отношение с учетом деления каждого слагаемого на мольный расход дистиллята принимает вид

$$\frac{F + R}{R + 1}.$$

Из известного граничного условия на входе для диффузионной модели следует (сечение 0–0, рис. 1) [8, 9]:

$$h = 0, \quad x_F = x_н - \frac{1}{Pe} g_н, \tag{2}$$

т.е. последнее уравнение можно упростить до вида

$$y_k = y_F + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x_k - x_F) + \frac{g_k}{Pe}. \tag{3}$$

Так как условие материального баланса в нижней части колонны

$$(R + 1) \cdot (y_F - y_K) = (F + R) \cdot (x_k - x_F), \tag{4}$$

то получаем дополнительное граничное условие

$$h = 1, \; g_k = 0. \tag{5}$$

Окончательно с учетом сделанных выводов уравнение (1) можно записать в виде

$$y = y_F + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x - x_F) + \frac{g}{Pe}$$

или с учетом уравнения (4)

$$y = x_k + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x - x_k) + \frac{g}{Pe}. \tag{6}$$

Полученная формула (6) является уравнением рабочей линии исчерпывающей части ректификационной колонны с учетом продольной диффузии по жидкой фазе. Она (в отличие от уравнения рабочей линии при $Pe \to \infty$ или $D_e \to 0$, т.е. при типовом расчете, когда структура потока обеих фаз соответствует идеальному вытеснению) не является прямой, а зависит от градиента безразмерной концентрации g по жидкой фазе.

Выведем дифференциальное уравнение материального баланса по жидкой фазе для исчерпывающей части колонны с учетом ее продольного перемешивания и массопередачи в паровую фазу. Для этого выделим на высоте z в сечениях I–II элемент высоты dz (рис. 1):

$$\frac{(G_F+G_Ф)}{3600M_{ж}}x+\frac{S\rho_{ж}}{M_{ж}}V_D=\frac{(G_F+G_Ф)}{3600M_{ж}}\left(x+\frac{dx}{dz}dz\right)+s\frac{\rho_{ж}}{M_{ж}}\left(V_D+\frac{dV_D}{dz}dz\right)+k_x\sigma Sdz\left(x-x^*\right).$$

После алгебраических преобразований получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2x}{dh}=Pe\frac{dx}{dh}+k_V\tau Pe\left(\frac{M_{ж}}{\rho_{ж}}\right)\left(x-x^*\right). \tag{7}$$

Аналогично можно рассмотреть сечение 0–I и I–II (рис. 1) для укрепляющей части колонны и получить уравнение рабочей линии с учетом продольной диффузии, которое имеет вид

$$y=\frac{x_Ф+R_x}{R+1}-\frac{1}{Pe}g\left(\frac{R}{R+1}\right) \tag{8}$$

с граничным условием на выходе (3) и известным граничным условием на входе в насадку флегмы:

$$\left.\begin{aligned} &h=0, \qquad x_d=x_н-\frac{1}{Pe}\cdot g_н;\\ &h=1, \qquad x=x_F, g_F=0 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

и массопередачи по жидкой фазе, имеющего вид, тождественный уравнению (7), но с коэффициентами массопередачи k_x, числом Pe и отношением ($M_ж/\rho_ж$), соответствующими укрепляющей части колонны.

Алгоритм расчета по формулам (3), (5), (8) и (9) представлен в статье [7].

Был проведен сравнительный расчет насадочной ректификационной колонны по предлагаемому алгоритму, учитывающему продольную диффузию в жидкой фазе, и типовому, предполагающий, что обе фазы движутся в режиме идеального вытеснения.

Предварительно известная табличная зависимость для равновесной концентрации бинарной смеси «метиловый спирт–этиловый спирт» обработана методом наименьших квадратов, в виде уравнения [9, 10]

$$y^*=\frac{1}{1+k\left(\frac{1}{x}-1\right)^n}, \tag{10}$$

которое линеаризуется в координатах: $\ln\left(\frac{1}{y^*}-1\right)=\ln k+n\ln\left(\frac{1}{x}-1\right)$, что позволяет найти коэффициент k и n МНК.

Равновесная и рабочие линии обеих частей колонны представлены на рис. 2. Здесь наглядно видно влияние продольной диффузии на рабочие линии. Во-первых, это скачок концентраций жидкой фазы на входе на насадку: в укрепляющей части с x_d = 0,965 до $x_ф$ = 0,951 и в исчерпывающей части с x_F = 0,403 до $x_н$ = 0,394; во-вторых, рабочие линии уже не прямые [см. уравнения (6) и (8)] при $Pe\to\infty$, а имеют выпуклый вид, т.е. как и скачки концентраций легколетучего на входе уменьшают локальную движущую силу массопередачи.

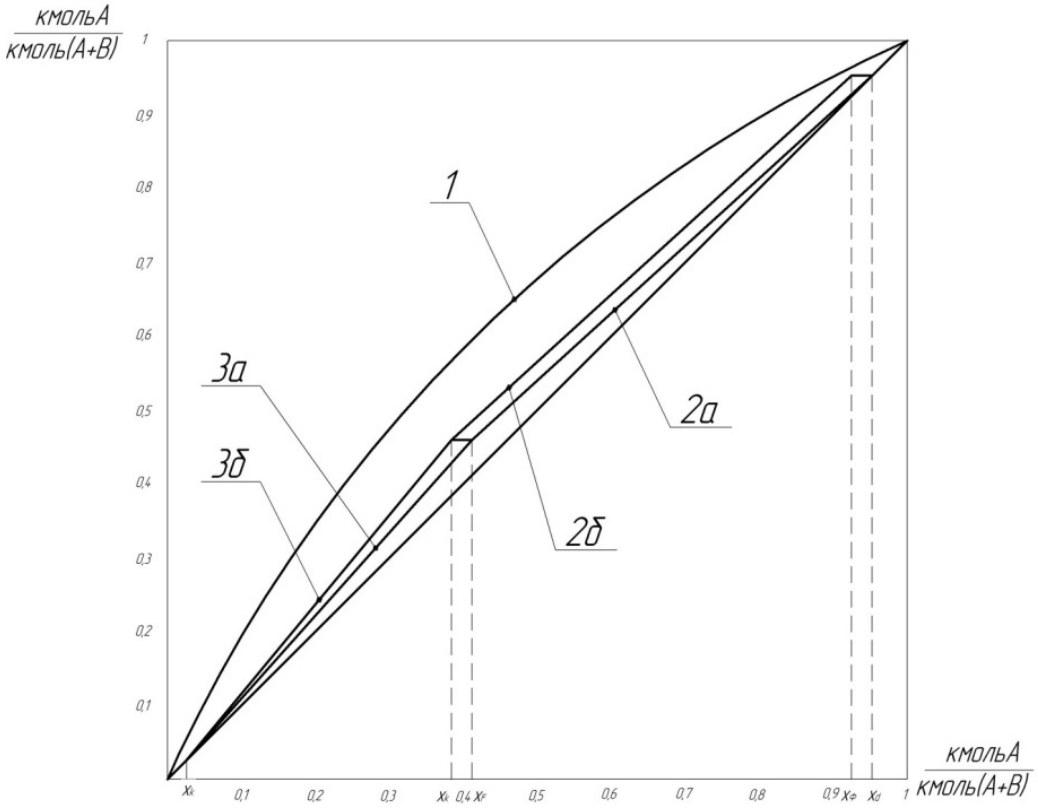


Рис. 2. Равновесная (*1*) и рабочие линии укрепляющей (*2*) и исчерпывающей (*3*) частей ректификационной колонны для бинарной смеси «метиловый спирт–этиловый спирт» при флегмовом числе *R* = 6,365:
а – типовой расчет, соответствующий идеальному вытеснению;
б – расчет с учетом продольного перешивания *Pe* = 50

Это вызывает увеличение поверхности массопередачи высоты обеих частей колонны, что приводит к увеличению объема насадки в колонне с 138 м^3 до 189,5 м^3, т.е. в 1,37 раза. Еще необходимо отметить неодинаковое влияние продольной диффузии на увеличение поверхности и высоты насадки при одинаковых числах пекле (*Pe* = 50) в обеих частях колонны. В верхней части они возрастают на 31%, в нижней на 43%. Уже при *Pe* = 10 скачок концентрации на входе приводит к пересечению начала рабочей линии *2б* равновесной линии *1*, т.е. x_0 становится меньше $x^* = x^*(y_d)$ и $x_н < x^*(y_F)$, что потребует увеличения рабочего флегмового числа, чтобы рабочие линии *2* и *3* приблизились к диагонали. На рисунке 3 представлены графики зависимости высоты насадки легколетучего от числа Пекле продольной диффузии. Как видно из этих графиков, для укрепляющей части уже при *Pe* ≤ 150, а для исчерпывающей части колонны при *Pe* < 110, разница в расчетах высота насадки по предлагаемому алгоритму с учетом продольной диффузии в жидкой фазе по сравнению с типовым алгоритмом расчетов становится больше 10%, и расчет надо вести, учитывая продольную диффузию.

Таким образом, учет продольного перемешивания в жидкой фазе насадочной ректификационной колонны может приводить к значительному уменьшению локальных и средних движущих сил, что потребует увеличения высоты насадки в обеих частях ректификационных колонн и даже увеличения флегмового числа, а значит диаметра и объема колонны.

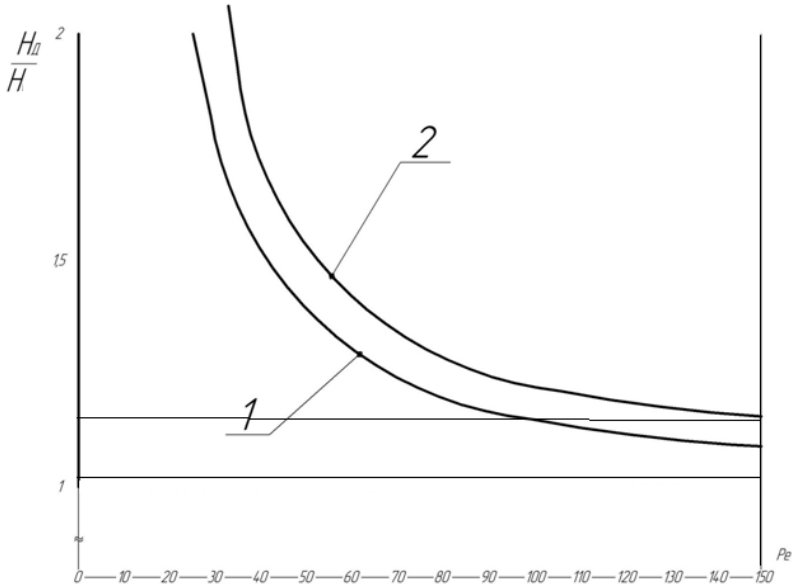


Рис. 3. Зависимости относительного увеличения высоты насадки в укрепляющей (*1*) и исчерпывающей (*2*) частях ректификационной колонны от числа Пекле предельной диффузии

Список использованных источников

1. **Багатуров, С. А.** Основы теории и расчета перегонки и ректификации / С. А. Багатуров. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия,1974.
2. **Павлов, К. Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987.
3. **Плановский, А. Н.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учебник для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1987.
4. **Рамм, В. М.** Абсорбция газов / В. М. Рамм. – 2-е изд., переработ. и доп. – М. : Химия, 1976.
5. **Тимонин, А. С.** Основы расчета и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – 2-е изд.– Калуга : Изда-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2.
6. **Дытнерский, Ю. И.** Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский. – 4-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008.
7. **Голованчиков, А. Б.** Алгоритм расчета насадочной ректификационной колонны с учетом продольного перемешивания по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, В. Н. Карев // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – № 3(182). – С. 14 – 17.
8. **Кафаров, В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии : учебник / В. В. Кафаров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1985.
9. **Левеншпиль, О.** Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969. – 624 с.

References

1. **Bagaturov, S. A.** Fundamentals of the theory and calculation of distillation and rectification; edited by S. A. Bagaturov. – Izd. 3-e, pererab. – M. : Chemistry, 1974.

2. **Pavlov, K. F.**, Romankov P. G., Noskov A. A. Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology. Textbook for high schools / Ed. member corr. PG Romankova of the USSR Academy of Sciences. – 10 th ed., Pererab. and additional. – L. : Chemistry, 1987.

3. **Planovsky, A. N.**, Nikolaev P. I. Processes and apparatus of chemical and petrochemical technology. Textbook for high schools. – 3rd ed., Pererab. and additional. – M. : Chemistry, 1987.

4. **Ramm, V. M** Absorption of gases. Ed. 2 nd, processing. and additional. – M. : Chemistry, 1976.

5. **Timonin, A. S.** Basics of calculation and design of chemical-technological and environmental protection equipment: Handbook, T. 2. 2nd ed. – Kaluga : N. Bochkareva Publishing House, 2002.

6. **Dytnersky, Yu. I.** The main processes and apparatus of chemical technology [Text] : manual for design / ed. I. I. Dytnersky. – 4 th ed., Sr. – M. : Alliance, 2008.

7. **Golovanchikov, A. B.** Algorithm for calculating the packed distillation column with allowance for longitudinal mixing in the liquid phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, V. N. Karev // Izvestiya VolgGTU. – Volgograd, 2016. – № 3(182). – P. 14 – 17.

8. **Kafarov, V. V.** Methods of cybernetics in chemistry and chemical technology : a textbook / V. V. Kafarov. – 4 th ed., Pererab. and additional. – M. : Chemistry, 1985.

9. **Levenshpil O.** Engineering design of chemical processes – M. : Chemistry, 1969. – 624 p.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

СИНХРОННЫЕ СВЯЗИ В СТАНКАХ НА ОСНОВЕ ШАГОВОГО ГИДРОПРИВОДА

Vanin V. A., Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

SYNCHRONOUS CONNECTIONS IN MACHINES BASED ON STEPPER HYDRAULIC DRIVE

Аннотация. Одним из основных направлений развития и совершенствования машиностроительного производства при постоянном увеличении выпуска продукции является развитие концепции агрегатирования и агрегатно-модульного принципа.

Не менее актуальной стоит задача построения оптимальной кинематической структуры станка, которая обеспечивает дальнейшее повышение точности обрабатываемых изделий путем снижения суммарной кинематической погрешности согласованного перемещения инструмента и изделия.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. One of the main directions of development and improvement of engineering production with a constant increase in output is the development of the concept of aggregation and aggregate-modular principle.

No less urgent is the task of building an optimal kinematic structure of the machine, which provides further improvements in the accuracy of the processed products by reducing the total kinematic error of the coordinated movement of the tool and product.

Keywords: optimaldesign, metal-cutting machine, hydraulic stepper drive, hydraulic generator pulses.

Внутренние (формообразующие) цепи металлорежущих станков, выполненные в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода, построенные с использованием модульного принципа отличаются следующими особенностями:

1. Конструктивная однородность кинематических связей между конечными звеньями цепей для станков как различного назначения, так и для станков одного технологического назначения, но разных типоразмеров.

2. Агрегатно-модульный принцип построения внутренних кинематических цепей дает возможность создать агрегатную гидравлическую унифицированную систему, при использовании которой возможно исключить конструктивное и размерное многообразие кинематических цепей, предназначенных для выполнения однотипных функций и осуществить проектирование и построение кинематических цепей станков различных модификаций на основе типизации решений на единой базе унифицированных модулей (блоков), при этом допускается возможность многократного применения модулей

в различных комбинациях и сочетаниях в новых компоновках внутренних (формообразующих) цепей станков.

Реализация блочно-модульного принципа построения внутренних цепей станков на основе шагового гидропривода дает возможность не конструировать внутренние кинематические цепи станков различного назначения и разных типоразмеров станков одного назначения каждый раз заново, а компоновать их функционально и конструктивно завершенными блоками (модулями), взятыми в таком сочетании, что обеспечиваются необходимые формообразующие движения, рациональная компоновка цепей и станка.

Применения агрегатно-модульного принципа построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков позволяет:

– существенно сократить время и трудоемкость проектирования и изготовления кинематических цепей, так как имеется возможность использования готовых агрегатов и модулей;

– значительно повысить надежность работы модульной внутренней связи благодаря предварительной обработке конструкции модулей и наиболее полного их соответствия выполняемой технологической задаче (точности, цепи, количества формообразующих движений и др.);

– расширять производственные возможности модульной системы путем ее постоянного наращивания на ранее разработанной элементной базе;

– улучшить условия эксплуатации и ремонтопригодности создаваемых модульных систем гидравлических связей путем уменьшения разнообразия цепей и их элементов.

Используя возможности шагового гидропривода (1), осуществляется частотное регулирование скорости силового исполнительного шагового гидродвигателя и высокие компоновочные качества гидравлического шагового привода (2) представляется возможным применить гидравлические связи для построения на основе агрегатно-модульного принципа внутренних цепей металлорежущих станков, где требуется обеспечить точную функциональную связь между заготовкой и инструментом.

К таким цепям относятся цепи обката, деления, дифференциальные цепи зубо- и резьбообрабатывающие станки различного технологического назначения и с разными схемами формообразования. Это позволяет не конструировать внутренние кинематические цепи станков различного технологического назначения с большим различием характеристик каждый раз заново, а компоновать их из небольшого, экономически обоснованного количества типоразмеров одинаковых типов (или стандартных) общих блоков (модулей), имеющих функциональную и конструктивную завершенность, с использованием ограниченного числа деталей индивидуального проектирования и изготовления.

Ниже рассмотрены структурные схемы станков различного технологического назначения, формообразующие кинематические цепи которых построены по модульному принципу с использованием гидравлических связей на основе гидравлического привода с различными схемами коммутации потоков рабочей жидкости.

На рисунке 1 представлена структурная схема резьбонарезного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания цилиндрических червяков обкатным резцом (долбяком) [5].

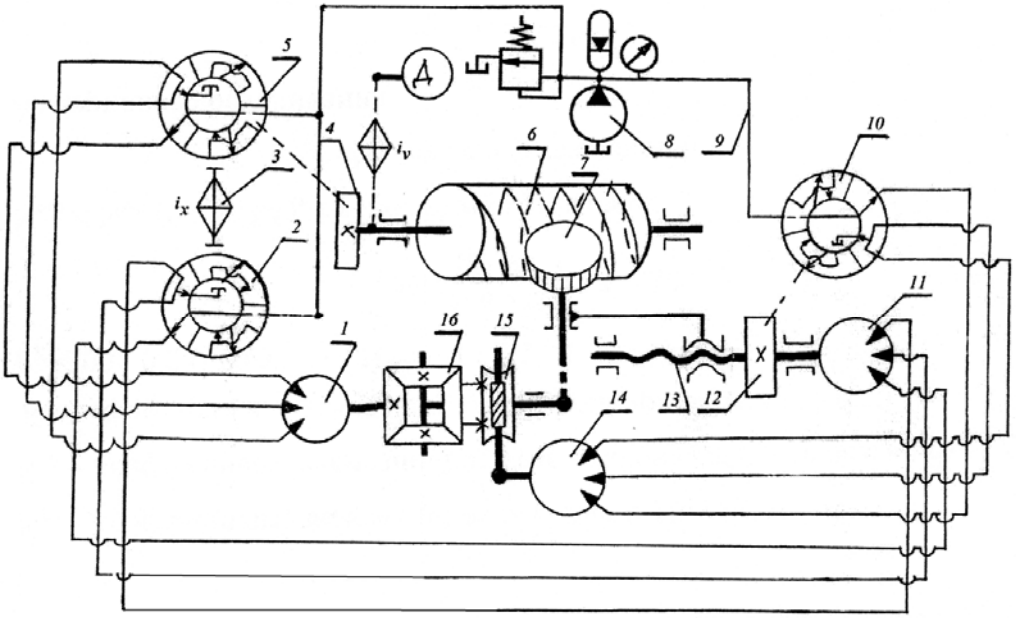


Рис. 1. Структурная схема резьбонарезного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания цилиндрических червяков обкатным резцом (долбяком)

Станок включает в себя заготовку *6*, совершающую вращательное движение от электродвигателя *Д* через звено настройки i_v, связанное с вращением режущего инструмента (обратного резца) *7* с гидравлической цепью обката.

Суппорт с инструментом участвуют в сложном движении формообразования (совместным вращением долбяка и его продольным перемещением, в результате которого центроида долбяка перекатывается без скольжения по попрямолинейной центроиде заготовки червяка). Поскольку суппорт является общим звеном, то в цепи необходимо осуществить дифференциальное движение, которое выполняется суммирующим механизмом в виде дифференциала с коническими колесами.

Резьбонарезной станок для нарезания цилиндрических червяков обкатным резцом включает в себя кинематическую цепь вращения заготовки, кинематическую цепь обкатного резца, связывающую между собой вращение заготовки и вращение инструмента, кинематическую цепь продольного перемещения инструмента, связывающую между собой вращение заготовки и продольное перемещение обкатного резца, цепь дифференциала, связывающую между собой вращение резца и его продольные перемещения на величину хода винтовой линии нарезаемого червяка.

Вращение инструментом *7* осуществляется от шагового гидродвигателя *1*, кинематически связанного с продольным суппортом и управляемого генератором гидравлических импульсов *5*, золотниковая втулка которого получает вращение от приводного зубчатого колеса *4*, закрепленного на шпинделе заготовки.

Продольное перемещение суппорта с инструментом *7* осуществляется шаговым гидродвигателем *11*, кинематически связанным посредством ходового винта *13* продольной подачи с суппортом и управляемого генератором гидравлических импульсов *2*. Получаем вращение от генератора гидравлических импульсов *5*, управляемого шаговым гидродвигателем вращения инструмента, через несиловую гитару сменных зубчатых колес *3*.

Так как суппорт с инструментом участвует в сложном движении формообразования – совместном вращении обкатного резца и его продольном перемещении, в результате которого обеспечивается перекатывание центроиды долбяка без скольжения по прямолинейной центроиде заготовки, а суппорт является общим исполнительным звеном, то в цепи инструменту необходимо осуществить дифференциальное движение.

Дифференциальное движение осуществляется шаговым гидродвигателем *14*, кинематически связанным посредством червячной передачи *15* с суммирующим механизмом *16*, в виде дифференциала с коническими колесами и управляемого генератором гидравлических импульсов *10*, золотниковая втулка которого получает вращение от приводного зубчатого колеса *12*, закрепленного на ходовом винте *13* продольной подачи суппорта. Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подводится от насосной установки *8* по трубопроводу *9*.

На рисунке 2 представлена структурная схема станка с внутренними гидравлическими связями для обработки многогранных заготовок [6].

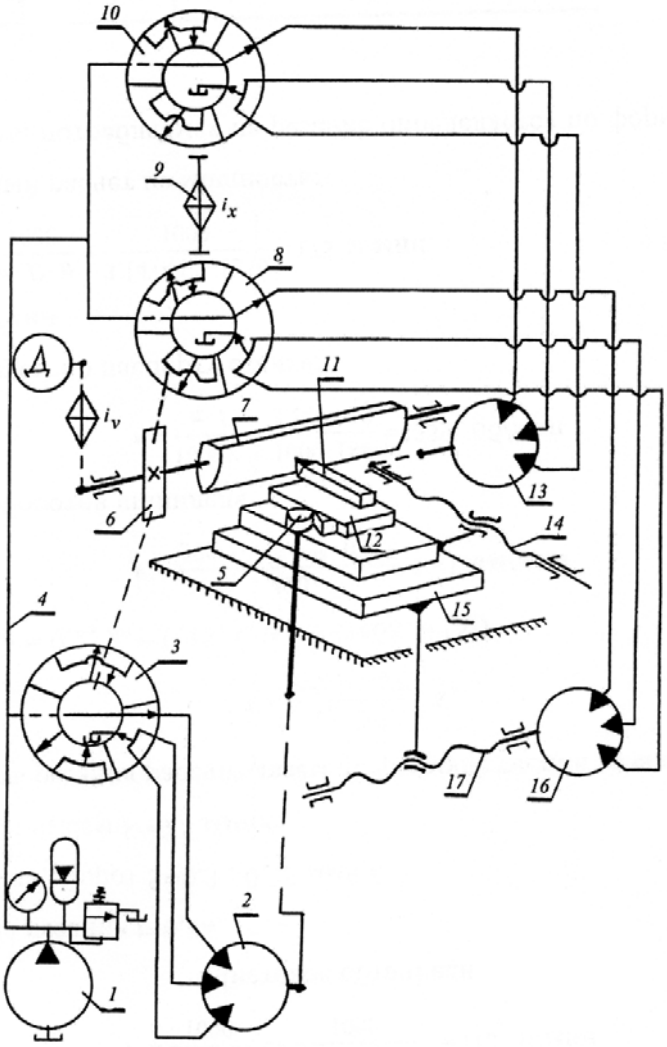


Рис. 2. Структурная схема станка с внутренними гидравлическими связями для обработки многогранных заготовок

Станок включает в себя узел заготовки, которая совершает равномерное вращение от электродвигателя *Д* через звено настройки i_v.

Для получения требуемой формы слитка по сечению необходимо создать внутреннюю связь между шпинделем заготовки и поворотным суппортом инструмента. Вращательное движение заготовки *7* равномерное, а поворот резцедержателя с инструментом *11* – неравномерный; поэтому отношение обеспечивается сменными кулачками *5*.

Для осуществления процесса обработки граней конусных заготовок вращение кулачку *5*, от которого производится поворот резцедержателя с инструментом, передается от гидравлического шагового двигателя *2*, который управляется генератором гидравлических импульсов *3*, золотниковая втулка с рабочими щелями которого получает вращение от зубчатого колеса *6*, закрепленного на шпинделе *7*.

Для получения требуемой конусности по длине заготовки необходимо осуществить определенную связь между продольным перемещением продольного суппорта и поперечным перемещением поперечных салазок с поворотным резцедержателем.

Продольное перемещение продольного суппорта *15* осуществляется от шагового гидродвигателя *16*, кинематически связанного с продольным суппортом посредством ходового винта *17* продольной подачи и управляемого генератором гидравлических импульсов *8*, золотниковая втулка с рабочими цепями которого получает вращение от зубчатого колеса *6*, жестко закрепленного на шпинделе заготовки. Поперечное перемещение поперечных салазок с инструментом, связанное с продольным перемещением продольного суппорта, осуществляется от шагового гидродвигателя *13*, кинематически связанного с поперечными салазками посредством ходового винта *14* поперечной подачи, и управляемого от генератора гидравлических импульсов *10*, золотниковая втулка с рабочими цепями которого получает вращение от генератора гидравлических импульсов *8* цепи продольного перемещения суппорта посредством гитары сменных колес *9*. Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов поступает от насосной станции *1* по трубопроводу *4*.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Технология машиностроения. – 2015. – № 5(155). – С. 18 – 26.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Шаговый гидропривод в формообразующих цепях резьбонарезных станков : монография / В. А. Ванин, А. Н. Колодин. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2016. – 117 с.

4. **Obukhov, A. D.**, Dedov D. L., Kolodin A. N. Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series : Materials Science and Engineering (327). – 2018.

References

1. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with complex shaping movements with internal hydraulic connections / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Mechanical Engineering Technology. – 2015. – № 5(155). – P. 18 – 26.

2. **Vanin, V. A.** Machines with hydraulic internal (formative) links based on stepper hydraulic drive for machining of helical surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Reference. Engineering journal with applications. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.**, Kolodin A. N. Stepping hydraulic drive in the forming chains of thread-cutting machines. Monograph. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. 2016. – 117 p.

4. **Obukhov, A. D.**, Dedov D. L., Kolodin A. N. Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series : Materials Science and Engineering (327). – 2018.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

ОПТИМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННИХ ЦЕПЕЙ ТОКАРНО-ЗАТЫЛОВОЧНЫХ СТАНКОВ

Vanin V. A., Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

OPTIMAL CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE OF THE INTERNAL CHAINS OF BACKING-OFF LATHES

Аннотация. Проектирование и построение рациональной структуры внутренних (формообразующих) цепей, обеспечивающих жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом в металлорежущих станках различного технологического назначения со сложными движениями формообразования для получения высокой точности функционально связанных перемещений, представляет собой сложную задачу при создании новой конструкции станка или модернизации существующей модели, оптимальной по точности, металлоемкости и другим показателям.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. Design and construction of a rational structure of internal (forming) chains, providing a rigid kinematic connection between the work piece and the tool in the machine tools of various technological purpose with complex forming movements to obtain a high precision of functionally related movements is a challenging task when creating a new design of the machine or uograding the existing model, which has optimal accuracy, metal consumption and other indicators.

Keywords: optimal design, metal-cutting machine, hydraulic stepper drive, hydraulic generator pulses.

Использование механических связей для построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков не удовлетворяет возрастающим требованиям повышения точности, жесткости, снижению металлоемкости. Все известные традиционные методы построения внутренних цепей на основе механических связей для повышения их точности, которая сводится к увеличению жесткости станков, повышению качества сборки и доводки узлов, выбору рациональной конструкции базовых деталей, достигли определенного уровня влияния на точность станков и практически не имеют резервов повышения точности. Дальнейшие работы в этом направлении приводят к существенному увеличению стоимости станка.

Одним из возможных практически реализуемых способов повышения точности и снижению металлоемкости цепей может быть применение взамен механических связей гидравлических связей на основе гидравлического шагового привода, что приводит

к сокращению протяженности цепей благодаря исключению из состава цепей до возможного минимума промежуточных механических звеньев (зубчатые и иные передачи, валы, муфты и т.п.), и как результат, снижение металлоемкости кинематической цепи и станка в целом [1].

Гидравлические связи для построения внутренних (формообразующих) цепей выполняются на основе шагового гидравлического привода, осуществляются по разомкнутой схеме без применения датчиков обратной связи.

Гидравлический шаговый привод составляет новый класс объемных гидроприводов, функциональные особенности которых состоят в том, что они способны устойчиво отрабатывать релейные и импульсные сигналы с высокой точностью и большим усилием при значительной нагрузке.

Структурно шаговый гидропривод представляет собой гидромеханическую систему, состоящую из трех функционально и конструктивно завершенных агрегатов (модулей): источника рабочей жидкости (насосная установка), управляющего (коммутирующего) устройства – генератора гидравлических импульсов и исполнительного силового шагового гидродвигателя.

В качестве силового органа в шаговом гидроприводе используется специальный шаговый гидродвигатель, выходное звено которого отрабатывает дискретные управляющие сигналы с высокой точностью и большим усилием по мощности.

Автономные функционально и конструктивно завершенные агрегаты (модули) шагового гидропривода имеют типовые присоединительные размеры и стыковочные устройства, что обеспечивает возможность соединения с конечными звеньями кинематических цепей.

Используя особенности частотного регулирования скорости исполнительных силовых шаговых гидродвигателей и высокие компоновочные качества шагового гидропривода, представляется возможным применить гидравлические связи для построения внутренних (формообразующих) цепей токарных станков со сложными движениями формообразования. К таким внутренним (формообразующим) цепям относятся цепи затылования в токарно-затыловочных станках [1 – 3].

Ниже приведены структурные схемы токарных станков, в формообразующих цепях которых применяется шаговый гидравлический привод.

На рисунке 1 представлена структурная схема токарно-затыловочного станка с внутренней гидравлической связью для затылования дисковых фрез [4].

Гидравлическая цепь затылования (деления) включает в себя инструмент *8*, заготовку *7*, которая совершает вращательное движение от электродвигателя *Д* через звено настройки i_z.

Движение затылования (деления), связывающее между собой вращение заготовки и возвратно-поступательное движение верхней каретки *9* суппорта *10*, осуществляется от шагового гидродвигателя *2*, кинематически связанного с кулачком затылования *3* и управляемого генератором гидравлических импульсов *4*, золотниковая втулка с расчетным числом рабочих щелей, определяющим передаточное отношение цепи, получает вращение от зубчатого колеса *6*, закрепленного на шпинделе заготовки.

Рабочая жидкость к генератору гидравлических импульсов подводится от насосной установки *1* по трубопроводу *5*.

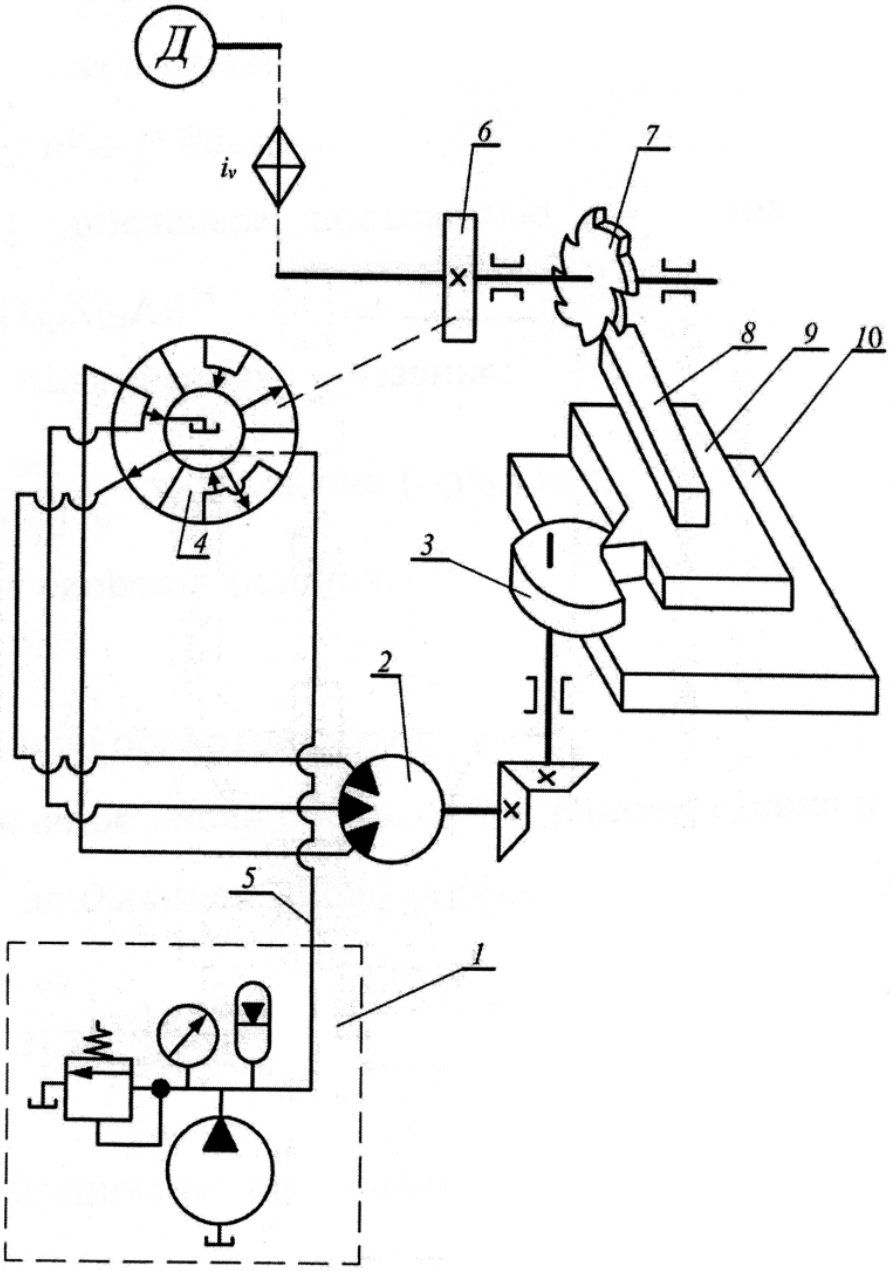


Рис. 1. Структурная схема токарно-затыловочного станка с внутренней гидравлической связью для затылования дисковых фрез

На рисунке 2 представлена структурная схема с гидравлическими связями для затылования спиральных сверл [4, 5].

Станок включает в себя инструмент *6*, который совершает вращательное движение от электродвигателя *Д* через звено настройки i_v.

Вращение шпинделя *5* с заготовкой (круговая подача) осуществляется от гидравлического шагового двигателя *3*, кинематически связанного со шпинделем посредством червячной подачи *4*. Управление шагового гидродвигателя *3* осуществляется генератором гидравлических импульсов *9*, золотниковая втулка с расчетным числом рабочих щелей которого получает вращение от приводного зубчатого колеса *8*, жестко закрепленного на шпинделе инструмента *6*.

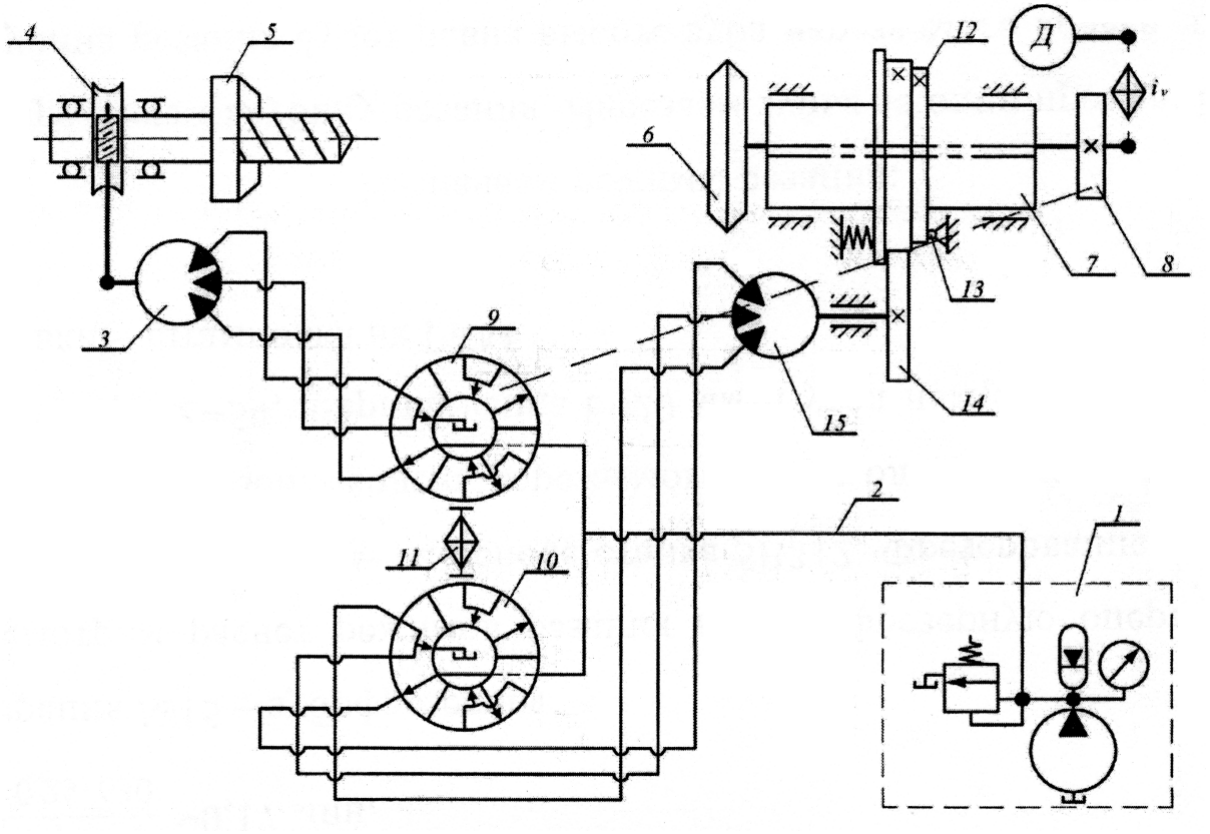


Рис. 2. Структурная схема с гидравлическими связями для затылования спиральных сверл

Планетарное движение инструмента *6* способствует более равномерному износу шлифовального круга, осуществляется за счет эксцентричного расположения оси шпинделя относительно оси гильзы *7*, приводимой во вращение шаговым гидродвигателем *15* посредством цилиндрической зубчатой передачи *14*. Управление шаговым гидродвигателем *15* осуществляется генератором гидравлических импульсов *10*, золотниковая втулка которого получает вращение от золотниковой втулки генератора гидравлических импульсов *9* через несиловую гитару сменных зубчатых колес *11*. Осевое перемещение инструмента получается торцовым кулачком *12*, закрепленным на гильзе *7*, и взаимодействующим с упором *13*.

Рабочая жидкость генератором гидравлических импульсов подается от насосной установки *1* по трубопроводу *2*.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Технология машиностроения. – 2015. – № 5(155). – С. 18 – 26.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

4. **Ванин, В. А.** Шаговый гидропривод в формообразующих цепях резьбонарезных станков : монография / В. А. Ванин, А. Н. Колодин. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2016. – 117 с.

5. **Obukhov A.D.**, Dedov D.L., Kolodin A. N. Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (327). – 2018

References

1. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with complex shaping movements with internal hydraulic connections / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Mechanical Engineering Technology. – 2015. – № 5(155). – P. 18 – 26.

2. **Vanin, V. A.** Machines with hydraulic internal (formative) links based on stepper hydraulic drive for machining of helical surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Reference. Engineering journal with applications. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.**, Kolodin A. N. Stepping hydraulic drive in the forming chains of thread-cutting machines. Monograph. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2016. – 117 p.

4. **Obukhov, A. D.**, Dedov D. L., Kolodin A. N. Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series : Materials Science and Engineering (327). – 2018.

УДК 004.94

Фомичев М. В.
МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, г. Москва
(Тел. 8-915-010-73-48, e-mail: fomax555@yandex.ru)

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Fomichev M. V.
MIREA – Russian Technological University, Russia, Moscow
(Tel. 8-915-010-73-48, e-mail: fomax555@yandex.ru)

METHODOLOGY TO ASSESS THE SIMULATION MODEL RELIABILITY

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема оценки достоверности имитационной модели. В ходе данной работы были предложены методы решения задач верификации, валидации модели, а также рассмотрены методы оценки адекватности имитационной модели. Актуальность данной работы обуславливается широким применением имитационных моделей. Относительная легкость и простота имитационного моделирования привлекает все больше исследователей. Однако зачастую бывает проблематично доказать достоверность разработанной модели, а также оценить, насколько разработанная модель подходит для решения поставленных задач. Предложенные в статье методы оценки позволяют не только оценить имитационную модель, но и формализовать данную оценку.

Ключевые слова: имитационное моделирование, адекватность модели, валидация и верификация модели.

Abstract. This article discusses the problem of assessing the reliability of a simulation model. The methods for problem solving, model validation were proposed, and methods for assessing the adequacy of a simulation model were considered. The relevance of this research is due to the wide use of simulation models. The number of researchers interested in the relative simplicity of simulation modeling is increasing. However, it is often problematic to prove the reliability of the developed model, as well as to assess whether the developed model is suitable for solving the given problems. The assessment methods proposed in the article allow not only to evaluate the simulation model, but also to formalize the assessment.

Keywords: simulation modeling, model adequacy, model validation and verification.

Введение. На сегодняшний день в практике имитационного моделирования сложились вполне устойчивые подходы и концепции. Однако до сих пор остаются проблемы, решение которых не может быть однозначно, по тем или иным причинам [1]. Одна из таких проблем – проблема оценки достоверности имитационной модели.

Исследованию различных аспектов проблемы оценки достоверности исторически уделялось много внимания, например, в области имитационного моделирования такие вопросы решали известные ученые и специалисты Р. Шеннон [2], Дж. Клейнен [3], В. В. Калашников [4] и др.

Также в конце прошлого века ряд специалистов выполнили цикл работ относительно проблематики оценки достоверности имитационных моделей. Наиболее известные из них – методологические схемы О. Балчи и Р. Сэджента [5, 6]. Согласно данным

методологиям оценка достоверности имитационных моделей производится путем многоэтапных доказательств правильности и корректности выходных параметров модели относительно исследуемой системы. Такой подход крайне востребован в специальной технике, например, при решении задачи захвата биомеханическим устройством предмета с нечеткой геометрической характеристикой в условиях его статической неустойчивости [7], а также при реализации различных высокотехнологичных производств [8, 9]. Вопросы практического использования этих методологий оценивания рассматриваются также в работах [10, 11].

В данной работе также рассматривается проблема оценки достоверности имитационной модели.

Для оценки достоверности имитационной модели, предлагается поэтапно решить следующие задачи:

1) оценка адекватности модели;
2) верификация модели;
3) валидация данных модели.

1. Оценка адекватности модели. При моделировании важно, насколько имитационная модель отражает реальную систему. В случае, если предлагаемая модель значительно отличается от существующей системы, то такая модель становится бесполезной.

На сегодняшний день существует множество подходов к оценке адекватности имитационной модели. Однако на практике чаще всего рекомендуется использовать следующий подход.

Модель считается адекватной, если ряд отклонений от истинных значений параметров системы обладает свойствами:

– независимость уровней;
– случайность отклонений;
– соответствия нормальному закону распределения;
– проверка гипотезы о близости средних значений каждой n-й компоненты откликов модели известным средним значениям n-й компоненты откликов реальной системы.

Проверку независимости можно осуществить, используя метод Дарбина–Уотсона, или используя автокорреляционную функцию.

Если средний уровень ряда отклонений близок к нулю, то коэффициенты автокорреляции при сдвиге на m шагов, где $e(t)$ – отклонение эксперимента t вычисляется по следующей формуле:

$$r(m) = \frac{\sum_{t=1}^{N-m} e(t) * e(t+m)}{\sum_{t=1}^{N} e(t)} . \qquad (1)$$

Вывод о независимости уровней можно сделать на основе первого коэффициента автокорреляции $r(1)$, если $r(1) > r_{\text{табл}}$, то в ряду отклонений присутствует значительная корреляция, следовательно, модель адекватна.

Для проверки случайности уровней ряда предлагается использовать критерий поворотных точек.

В соответствии с данным критерием каждый уровень ряда отклонений сравнивается с двумя соседними с ним. Если уровень больше или меньше соседних, то данная точка считается поворотной. Далее рассчитывается сумма поворотных точек. В случайном ряду чисел должно выполняться строгое неравенство

$$p > [(2N-1)/3 - 2\sqrt{16N - 29/90}]\,.$$

Квадратные скобки обозначают, что от суммы берется целая часть.

Для проверки соответствия нормальному закону распределения рассчитываются коэффициенты асимметрии – $A_с$ (мера «скошенности») и эксцесса $Э_к$ (мера «скученности»), где $e(t)$ – отклонение от реальной системы в эксперименте t по формулам:

$$A_c = \frac{\sum_{t=1}^{N} e(t)^3}{N * \sqrt[3]{\left(\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} e(t)^2\right)}}\,; \qquad (2)$$

$$Э_к = \frac{\sum_{t=1}^{N} e(t)^4}{N * \left(\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} e(t)^2\right)^2} - 3\,.$$

Если рассчитанные коэффициенты близки к нулю, то ряд отклонений распределен в соответствии с нормальным законом. Для оценки степени близости рассчитанных коэффициентов к нулю вычисляются дисперсии по следующим формулам:

$$S_a = 6(N-2)/(N+1)/(N+3);$$
$$S_э = 24N(N-2)(N-3)/(N+1)/(N+3)/(N+5)\,. \qquad (3)$$

Если рассчитанные значения данных коэффициентов не превосходят 1,5σ, то считается, что распределение ряда отклонений не противоречит нормальному закону. Если хотя бы один из них превышает 2σ, то распределение ряда не соответствует нормальному закону. В случае попадания в зону неопределенности ($1{,}5\sigma < S_a < 2\sigma$ или $1{,}5\sigma < S_э < 2\sigma$), используются другие критерии, например, *RS*-критерий.

Проверка гипотезы о близости средних значений каждый n-й компоненты откликов модели известным средним значениям n-й компоненты откликов реальной системы производится с помощью t-критерия Стьюдента, где Y_n – оценка математического ожидания отклика модели n-го эксперимента, а Y'_n – оценка математического ожидания отклика системы n-го эксперимента по формулам:

$$t_n = (Y_n - Y_n^{'})\sqrt{\frac{N_1 N_2}{D_{pn}(N_1+N_2)}}; \qquad (4)$$

$$D_{pn} = \frac{(N_1-1)D_n + (N_2-1)D_n^{'}}{N_1+N_2-2}\,.$$

Гипотеза отклоняется, если расчетное значение t_n больше табличного уровня t-критерия с $(N_1 + N_2 - 2)$ степенями свободы и выбранным уровнем значимости.

Процедура повторяется аналогичным образом для всех компонентов вектора отклика. Если хотя бы по одной компоненте адекватность отсутствует, то модель не адекватна. В случае обнаружения незначительных отклонений компонента, может производиться калибровка модели в целях обеспечения адекватности.

Также могут использоваться и экспертный метод оценки адекватности, так называемся тест Тьюринга (установление экспертами различий между поведением модели и реальной системы). В процессе проверки адекватности модели необходим постоянный контакт с заказчиком, а также экспертами в данной области.

2. Верификация имитационной модели. Верификация модели – это доказательство соответствия алгоритма ее функционирования замыслу и целям моделирования.

На этапе верификации имитационной модели проверяется корректность структуры разработанной модели, а также корректность реализованного алгоритма.

Комплексные процедуры верификации обычно включают как формальные, так и неформальные исследования разработанной имитационной модели. Неформальные процедуры могут состоять из следующей серии проверок:

– проверка преобразования данных от входа к выходу;

– трассировка модели на реальном потоке данных (при заданных неизменяемых (G) и изменяемых (X) внешних факторах) следующим образом: X изменяется по всему диапазону значений – контролируется выходной целевой параметр (Y), а также проверяется, что при граничных допустимых значениях модель не выдает явно не корректные значения.

3. Валидация данных имитационной модели. Валидация данных имитационной модели предполагает исследование следующих основных свойств имитационной модели:

– оценка точности результатов моделирования;

– оценка устойчивости и чувствительности имитационной модели.

Оценка точности результатов моделирования. В статистическом анализе большое количество характеристик точности. Однако чаще всего используются следующие параметры [12]:

– среднеквадратическое отклонение (СКО);

– максимальная абсолютная ошибка;

– максимальная относительная ошибка;

– относительная средняя ошибка.

Эти показатели дают представление об абсолютной величине ошибки модели и о доле ошибки в процентном отношении к среднему значению результативного признака.

Для оценки степени точности предлагается оценить доверительные интервалы.

При оценке $\overline{X}$ истинного среднего μ совокупности, определяется верхняя и нижняя границы доверительного интервала, так, чтобы вероятность попадания истинного среднего в интервал, заключенный между этими границами, равнялась некоторой заданной величине (α – доверительная вероятность) следующим образом:

$$P\{\mu - d < \overline{X} < \mu + d\} = 1 - \alpha ,$$

где $\overline{X}$ – выборочное среднее; 1 – α – вероятность того, что интервал μ ± d содержит $\overline{X}$.

Оценка устойчивости и чувствительности имитационной модели. Устойчивость и чувствительность имитационной модели имеют практически обратное значение. Под устойчивостью имитационной модели принято понимать нечувствительность модели к изменению условий моделирования. Для оценки чувствительности предлагается следующий метод оценки.

По каждому входному параметру X определяется интервал изменений ($\min X_q$, $\max X_q$). Остальные компоненты вектора входных параметров не изменяются и задаются равными среднему значению. Далее проводят несколько экспериментов и получают отклики модели ($\min Y$, $\max Y$ соответственно). Для оценки чувствительности имитационной модели можно использовать как абсолютные, так и относительные значения. Относительные значения входного параметра рассчитываются по следующей формуле:

$$\delta X_q^0 = \frac{\left(\max X_q - \min X_q\right)^2}{\left(\max X_q + \min X_q\right)} \cdot 100\%. \tag{5}$$

Относительные значения выходного параметра имитационной модели рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta Y_n^0 = \frac{\left|\max Y_n - \min Y_n\right|^2}{\left(\max Y_n + \min Y_n\right)} \cdot 100\%. \tag{6}$$

Выбирают $\delta Y_n^0 = \max\{\delta Y_n\}$. Чувствительность модели по q-компоненте вектора входных параметров X определяется парой значений $(\delta X_q^0, \delta Y_n^0)$. Эта пара чисел показывает, на сколько процентов может измениться отклик модели при увеличении q-й компоненты на δX_q^0 процентов. Если модель оказывается малочувствительной по какой-либо q-й компоненте вектора входного параметра, то на практике в план экспериментов не включаются эксперименты с изменением данного параметра X_q, чем достигается экономия ресурса времени моделирования.

Подведя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что оценка достоверности имитационной модели включает множество процедур, таких как валидация и верификация модели, а также оценка адекватности имитационной модели. Каждая из этих процедур подразумевает использование комплекса статистических методов.

Важным этапом оценки достоверности разработанной модели является оценка адекватности модели. Несмотря на большое количество методов оценки, не все из них можно считать универсальными. Приведенный в данной работе метод может быть применим к большинству имитационных моделей технических систем.

Другим важным этапом оценки достоверности имитационной модели является оценка чувствительности разработанной модели. Данная оценка позволяет внести изменения в разработанную модель, в случае необходимости, более детально рассмотреть необходимую часть модели, добавить необходимые входные параметры или факторы внешней среды. Однако оценка чувствительности также позволяет упростить или даже отбросить некоторые малозначимые факторы.

Все описанные с данной статье процедуры оценки достоверности имитационной модели в комплексе дают необходимую информационную базу обеспечения доверия к разработанной имитационной модели, а также позволяют формализовать оценку достоверности разработанной модели.

Список использованных источников

1. **Kashirskaya, E. N.**, Kholopov V. A., Shmeleva A. G., Kurnasov E. V. Simulation model for monitoring the execution of technological processes // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 307 – 310.

2. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978.

3. **Клейнен, Дж.** Статистические методы в имитационном моделировании / Дж. Клейнен. – М. : Статистика, 1978.

4. **Калашников, В. В.** Организация моделирования сложных систем / В. В. Калашников. – М. : Знание, 1982. – 62 с.

5. **Balci, O.** Credibility Assessment of Simulation Results // Proceedings of the Winter Simulation Conference. – 1986. – P. 39 – 44.

6. **Sargent, R. G.** Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – P. 106 – 114.

7. **Чижиков, В. И.** Комплексный подход к разработке нейросетевого функционального идентификатора системы управления захватом предмета с нечеткой геометрией поверхности / В. И. Чижиков, Е. В. Курнасов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 4-2(9). – С. 275 – 300.

8. **Holopov, V.**, Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – С. 863 – 868.

9. **Kurnasov, E. V.**, Malyshkin A. B. Control of the selective hydrogenation of acetylene compounds // Russian Engineering Research. – 2017. – Т. 37, № 5. – С. 393 – 396.

10. **Law, A. M.**, McComas M. G. How to build valid and credible simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – P. 22 – 29.

11. **Яцкив, И. В.** Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения / И. В. Яцкив // Материалы конференции ИММОД. – 2003. – С. 211 – 217.

12. **Лычкина, Н. Н.** Имитационное моделирование экономических процессов : учебное пособие / Н. Н. Лычкина. – М. : Академия АйТи, 2005.

References

1. **Kashirskaya, E. N.**, Kholopov V. A., Shmeleva A. G., Kurnasov E. V. Simulation model for monitoring the execution of technological processes // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. – 2017. – P. 307 – 310.

2. **Shennon, R.** Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka. – M. : Mir, 1978.

3. **Klejnen, D.** Statisticheskie metody v imitacionnom modelirovanii. – M. : Statistika, 1978.

4. **Kalashnikov, V. V.** Organizaciya modelirovaniya slozhnyh sistem. – M. : Znanie, 1982. – 62 s.

5. **Balci, O.** Credibility Assessment of Simulation Results // Proceedings of the Winter Simulation Conference. – 1986. – P. 39 – 44.

6. **Sargent, R. G.** Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – P. 106 – 114.

7. **Chizhikov, V. I.**, Kurnasov E. V. Kompleksnyj podhod k razrabotke nejrosetevogo funkcional'nogo identifikatora sistemy upravlenija zahvatom predmeta s nechjotkoj geometriej poverhnosti // Vestnik MGTU MIRJeA. – 2015. – № 4-2(9). – S. 275 – 300.

8. **Holopov, V.**, Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – C. 863 – 868.

9. **Kurnasov, E. V.**, Malyshkin A. B. Control of the selective hydrogenation of acetylene compounds // Russian Engineering Research. – 2017. – T. 37, № 5. – C. 393 – 396.

10. **Law, A. M.**, McComas M. G. How to build valid and credible simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – P. 22 – 29.

11. **Yackiv, I. V.** Problema validacii imitacionnoj modeli I ee vozmozhnye resheniya // Materialy konferencii IMMOD. – 2003. – S. 211 – 217.

12. **Lychkina, N. N.** Imitacionnoe modelirovanie ehkonomicheskih processov : uchebnoeposobie. – M. : Akademiya IT, 2005.

УДК 65.011

Сергеева А. С.[1], Немтинов В. А.[2], Немтинова Ю. В.[3]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. 8(910)6504601, e-mail: anya1255@yandex.ru),
[2](Тел. 8(910)7525641, e-mail: nemtinov@mail.gaps.tstu.ru),
[3](Тел. 8(920)4742886, e-mail: jnemtinova@hotmail.com)

КАРТА ПОТОКА СОЗДАНИЯ ЦЕННОСТИ В БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Sergeeva A. S.[1], Nemtinov V. A.[2], Nemtinova Yu. V.[3]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. 8(910)6504601, e-mail: anya1255@ yandex.ru),
[2](Tel. 8(910)7525641, e-mail: nemtinov@mail.gaps.tstu.ru),
[3](Tel. 8(920)4742886, e-mail: jnemtinova@hotmail.com)

VALUE STREAM MAPPING IN LEAN PRODUCTION

Аннотация. Производственные процессы являются неотъемлемой составляющей деятельности предприятия. В данной статье рассматривается необходимость четкого описания бизнес-процессов организации по нескольким причинам. Самая главная из них – возможность постоянного непрерывного совершенствования, а для этого нужно обеспечить визуализацию процесса и его прозрачность. Другими словами, требуется увидеть и понять, как устроен производственный процесс, обнаружить скрытые потери и в конечном итоге создать добавленную ценность. В данной статье рассмотрена методология построения карты потока создания ценности – одного из самых главных инструментов бережливого производства (БП).

Ключевые слова: производство, карта потока создания ценности, схема, ценность, бизнес-процесс.

Abstract. Production processes are an integral part of the company. This article discusses the need for a clear description of the business processes of the organization for several reasons. The most important of them is the possibility of continuous improvement, and for this it is necessary to ensure the visualization of the process and its transparency. In other words, you need to see and understand how the production process works, discover hidden losses and ultimately create added value. This article discusses the methodology for constructing a value stream map asone of the most important tools of lean manufacturing.

Keywords: production, value stream mapping, scheme, value, business process.

Управление производством на сегодняшний день является чрезвычайно актуальной проблемой для отечественных предприятий, устойчивое экономическое развитие организации невозможно без эффективной производственной системы. Актуальность выбранной темы определяется тем, что в современных условиях ведения хозяйственной деятельности совершенствование производственной системы становится одним из главных путей развития предприятия. Внесение изменений в производственную систему не только способствует повышению эффективности деятельности, но и делает орга-

низацию более устойчивой во внешней среде. Термин «бережливое производство» в переводе на русский язык означает: «гибкое производство», «малозатратное производство». Внедрение инструментов данной системы является для предприятия переходом на новый уровень. Внесение инноваций в производственную систему способствует повышению эффективности деятельности и делает организацию более устойчивой во внешней среде. В данной статье мы рассматриваем инструмент бережливого производства под названием VSM (Value Stream Mapping, т.е. карта потока создания ценности). Данная методология помогает увидеть ценные операции и те, которые не добавляют ценности. Создавая карту, можно детально понять процесс и увидеть потери, которые часто составляют бóльшую часть себестоимости продукта. Данный инструмент был разработан Майклом Ротером и Джоном Шуком на практическом опыте в результате работы с компанией Тойота [1]. Как же увидеть бизнес-процессы? Если мы попадем на какое-то конкретное предприятие, то вероятнее всего мы сможем увидеть оборудование, станки, людей, но не определенные процессы. Процессом можно считать особую последовательность действий, которая направлена на получение готовой продукции. Почему же так важно видеть и знать эту последовательность? Во-первых, описание производственного процесса поможет ускорить обмен информацией и снизить риски поспешных и ошибочных управленческих решений. Во-вторых, процесс рисования карты потока дисциплинирует и систематически описывает схему всего производства, учитывая скрытые потери. Благодаря наглядной схеме становится возможным эффективное взаимодействие составных элементов предприятия и непрерывное совершенствование. Для этого требуется описание процесса в том виде, в котором он существует сейчас. Под потоком создания ценности понимаются все действия, требующиеся для создания готовой продукции (и добавляющие, и не добавляющие ценность). В процессе построения карты потока создания ценности мы наблюдаем картину в целом, а не отдельные части и элементы [2]. Если анализировать весь путь потока, т.е. от концепции продукта до его передачи заказчику, то придется взаимодействовать со многими цехами, отделами и даже другими организациями. Функции карты потока создания ценности: помогает увидеть весь поток создания ценности; с помощью нее можно обнаружить источники потерь и устранить или снизить их; может служить общим языком для всех специалистов; является схемой для составления плана внедрения; может наглядно показывать связь между материальным и информационным потоками.

Целью данной статьи является исследование инструмента VSM концепции «бережливого производства», его пользы применения на предприятии. Гипотеза исследования работы состоит в том, что применение данного инструмента за короткий промежуток времени помогает достичь полезного эффекта в виде сокращения издержек производства и добавить ценность готовой продукции. При обработке фактического материала использовались такие традиционные научные методы, как структурно-функциональный анализ, синтез, индукция, дедукция, табличный метод, применение которых позволило обеспечить обоснованность проведенного анализа, теоретических и практических выводов.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных в ходе исследования результатов по исследуемым направлениям, а также в воз-

можности реализации мероприятий по совершенствованию производства в целях повышения эффективности деятельности предприятия.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Рассмотреть сущность инструмента VSM, его состав и структуру.
2. Изучить методы применения данной методологии на практике.
3. Выявить пользу применения инструментов на предприятии.
4. Подвести итоги использования карты потока создания ценности в производстве.

Объектом исследования является инструмент VSM. Предмет исследования – отношения и проблемы, возникающие в процессе использования данного инструмента в концепции «бережливого производства» на предприятии.

Построение карты потока создания ценности – это инструмент, который может помочь наглядно увидеть производственный процесс даже с помощью простого карандаша и бумаги (рис. 1). Это удобно, потому что в любой момент будет возможность дорисовать важные элементы, а ненужные наоборот, стереть ластиком.

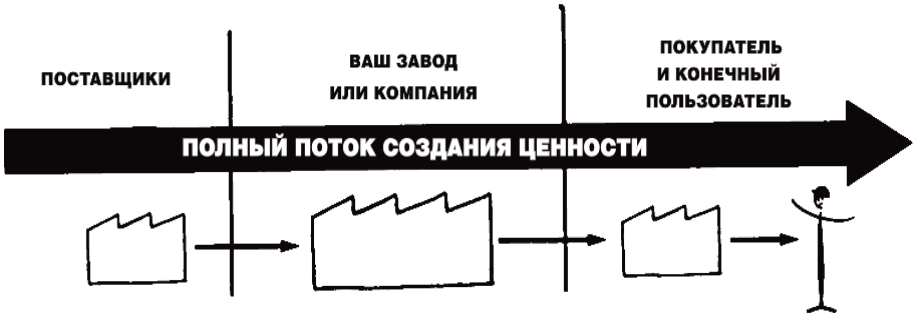


Рис. 1. Поток создания ценности

Построение карты потока ценности может включать следующие этапы:

1. Выбор семейства или отдельного продукта, для которого мы будем строить карту.
2. Закрепление за процессом построения карты специального человека, менеджера потока.
3. Определение ценности для потребителя.
4. Схематическое изображение текущего состояния потока.
5. Проведение анализа процессов и определение их характеристик.
6. Создание карты будущего потока с использованием других инструментов БП.
7. Организация и внедрение движения потока по карте будущего состояния.

Карта потока создания ценности может выполняться по шагам, которые изображены на рис. 2. Обращаем внимание на то, что стрелки текущего и будущего состояния совпадают, так как идеи будущего состояния чаще всего появляются в процессе описания текущего, а описание текущего является важной информацией о текущем состоянии. Заключительным шагом будет являться подготовка плана и внедрение. Когда будущее состояние реализовано в жизнь, составляют новую карту будущего состояния. Это и называют процессом непрерывного улучшения [3]. Результатом такой работы будет всего лишь пара листов бумаги, где будет подробно и наглядно описано будущее состояние потока и план по его достижению, и именно это может повысить эффективность производственных бизнес-процессов без особых затрат.

Рис. 2. Шаги построения карты потока создания ценности

Составление карты потока ценностей начинается с последнего участка производства и проводится в обратном направлении. На каждом участке должно фиксироваться:

1) время цикла операций, приносящих ценность;
2) время цикла операций, не приносящих ценность (переналадка, ожидание, транспортировка и т.д.);
3) количество продуктов в НЗП (незавершенное производство);
4) количество запасов;
5) количество рабочих, которые выполняют данную операцию.

Все показатели желательно оценивать в денежном выражении для проведения финансового анализа. Опыт показывает, что наиболее удобным способом представления потока создания ценности является нанесение изображения на ватмане, лучше карандашом, чтобы была возможность внесения поправок и уточнений. Также карту можно создать в специальной программе под названием UML [4].

Самая главная идея создания карты – это организация производства таким образом, чтобы предыдущий процесс производил то, что нужно и когда нужно, следующему процессу. Для этого нужно создать такой поток, в котором заказ будет выполнен за минимальное время и без лишних издержек. Как же это можно сделать? В нашем случае, для начала нам требуется синхронизовать темп производственного процесса с темпом отгрузки или продаж. Это будет временем такта [5]. Время такта для составления карты потока создания ценности будет выражаться в минутах и рассчитываться по формуле

$$t = \frac{T}{D},$$

где T – продолжительность рабочего дня; D – потребительский спрос за смену.

Таким образом, время такта покажет, сколько продукции требуется производить в зависимости от спроса потребителя. Также, эта несложная формула поможет устранить ненужные потери, такие как простои, переналадка и НЗП. В настоящее время, с помощью такой бережливой линии производитель имеет возможность изменять производительность линии до нужного времени, которое будет соответствовать спросу и отгрузки товара.

В качестве упрощенного примера мы возьмем производственный процесс по изготовлению детали и посмотрим, какой результат может быть достигнут путем составления схемы и несложных манипуляций. У нас есть следующие исходные данные:

1. В цехе № 1 деталь подвергается трем процессам обработки: отрезная, токарная, фрезерная.
2. В цехе № 2 операция сборочная.
3. Склад готовой продукции.

Порядок перемещения детали наглядно изображен на рис. 3. Мы помним, что для составления карты потока, следует начинать со склада готовой продукции и заканчивать цехом 1. Все полученные данные заносятся в специальную таблицу [6]. С помощью чего же можно улучшить производственный процесс, анализируя полученную схему? Однозначного ответа на этот вопрос не существует, так как каждое предприятие уникально. Поэтому и решения, принятые для оптимизации производственного процесса, будут уникальны в рамках конкретной организации [7].

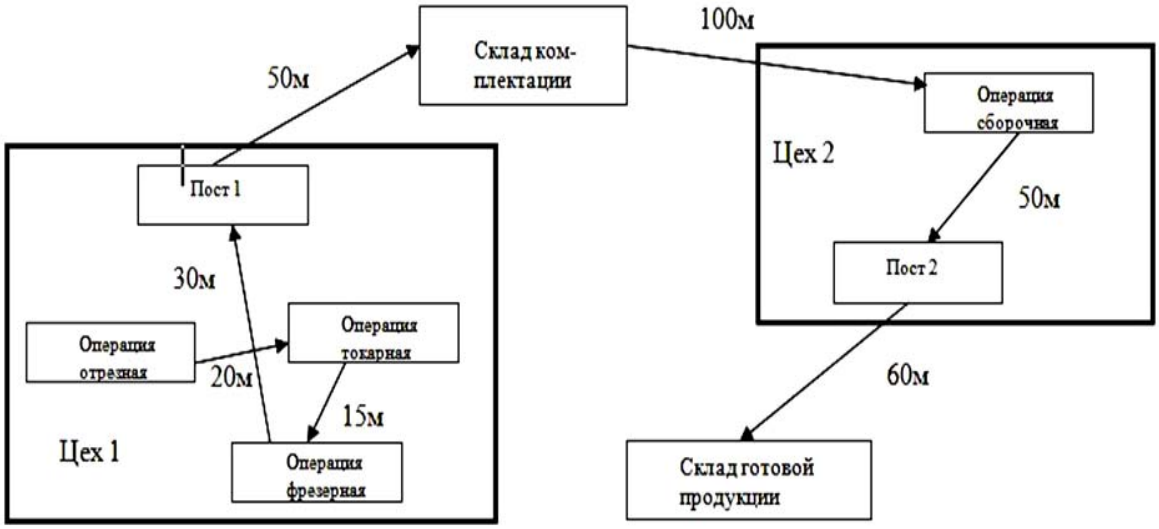


Рис. 3. Процесс перемещения детали

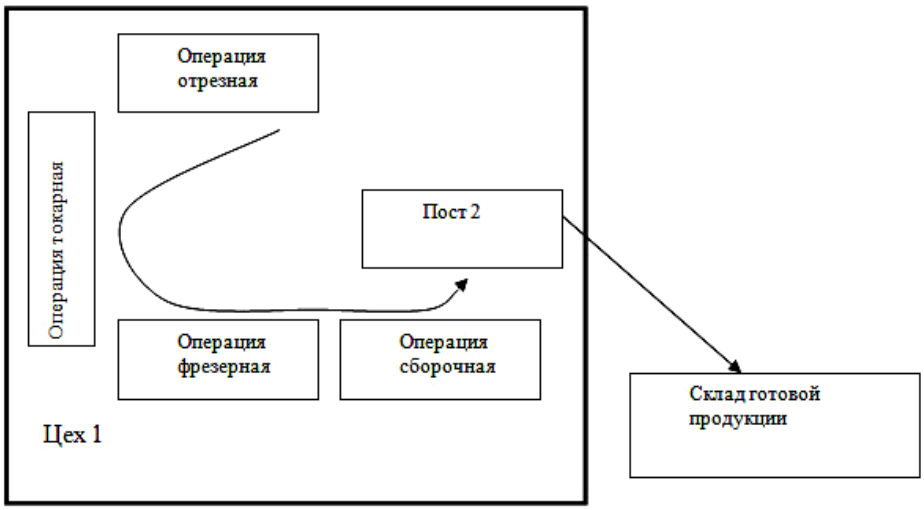


Рис. 4. Будущее состояние процесса перемещения детали

Что касается нашего примера, здесь решением стало использование инструмента U-образной ячейки, которую территориально расположили в первом цехе. Существенные результаты были достигнуты посредством того, что все рабочие места, задействованные в обработке детали, были выстроены таким образом, чтобы оптимизировать расположение рабочих мест таким образом, чтобы сократились потери при транспортировке и хранении.

В таблице 1 мы провели сравнительный анализ текущего и будущего состояния.

1. Сравнение текущего и будущего состояния

Параметры	Единица измерения	Текущее состояние	Будущее состояние
Общее время выполнения операции	Сек.	37 500	16 100
Транспортировка	Сек.	3200	1700
Переналадка	Сек.	1500	700
Хранение	Сек.	21 500	11 000
Запасы	Шт.	580	100
НЗП	Шт.	370	50
Количество операторов	Чел.	12	7

Чтобы провести финансовый анализ в денежном выражении, потребуется ряд дополнительных данных. Это может составить отдельное направление исследования рассматриваемого производственного процесса.

Таким образом, план действий задает общую направленность и показывает шаги, которые надо сделать для достижения результатов. Вместе с тем новая ситуация часто требует новых правил, а иногда и новых видов поведения. Если эти две составляющие хорошо не продумать и правильно не включить в план, то возникает риск возврата к прежнему положению дел. Если последующие действия не будут выполнены так, как надо, составление карт нынешнего и будущего положений дел окажется напрасной потерей времени.

На основе изученного практического опыта, можно полагать, что предприятия, использующие VSM, способны в несколько рез увеличить производительность, сократить производственные площади, уменьшить запасы без особых финансовых затрат.

Таким образом, задачи работы были решены, достигнута цель – исследован инструмент VSM концепции «бережливого производства», изучены методы его применения на практике, выявлена польза его применения на предприятии.

Список использованных источников

1. **Вумек, Дж.** Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Вумек, Д. Джонс ; пер. с англ. – 9-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 472 с.

2. **Вэйдер, М.** Инструменты бережливого производства: Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства / М. Вэйдер ; пер. с англ. – 9-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 125 с.

3. **Немтинов, В. А.** Применение теории нечетких множеств и экспертных систем при автоматизированном выборе элемента технической системы / В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, П. И. Пахомов // Информационные технологии. – 2009. – № 10.

4. **Немтинов, В. А.** Информационный анализ и моделирование объектов природно-промышленной системы / В. А. Немтинов. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 112 с.

5. **Немтинов, В. А.** Методологические основы построения информационной системы принятия решений по обеспечению экологической безопасности / В. А. Немтинов // Научно-техническая информация. Сер. 1. – 2005. – № 10. – С. 1 – 7.

6. **Методы** и алгоритмы создания виртуальных моделей химико-технологических систем : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб, Ю. В. Немтинова. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 236 с.

7. **Немтинов, В. А.** Использование системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 7. – С. 43 – 48.

References

1. **Vumek, Dzh.** Berezhlivoe proizvodstvo: Kak izbavit'sya ot poter' i dobit'sya procvetaniya vashej kompanii / Dzhejms Vumek, Dehniel Dzhons; Per. s angl. – 9-e izd. – M. : Al'pina Pablisher, 2016. – 472 s.

2. **Vehjder, M.** Instrumenty berezhlivogo proizvodstva: Mini-rukovodstvo po vnedreniyu metodik berezhlivogo proizvodstva / Majkl Vehjder; Per. s angl. – 9-e izd. – M. : Al'pina Pablisher, 2016. – 125 s.

3. **Nemtinov, V. A.**, Egorov S. Ya., Pahomov P. I. Primenenie teorii nechetkih mnozhestv i ehkspertnyh sistem pri avtomatizirovannom vybore ehlementa tekhnicheskoj sistemy // Informacionnye tekhnologii. – 2009. – № 10.

4. **Nemtinov, V. A.** Informacionnyj analiz i modelirovanie ob′ektov prirodno-promyshlennoj sistemy / V. A. Nemtinov. – M. : Mashinostroenie-1, 2005. – 112 s.

5. **Nemtinov, V. A.** Metodologicheskie osnovy postroeniya informacionnoj sistemy prinyatiya reshenij po obespecheniyu ehkologicheskoj bezopasnosti / V. A. Nemtinov // Nauchno-tekhnicheskaya informaciya. Seriya 1. – 2005. – № 10. – S. 1 – 7.

6. **Nemtinov, V. A.** Metody i algoritmy sozdaniya virtual'nyh modelej himiko-tekhnologicheskih sistem: monografiya / V. A. Nemtinov, S. V. Karpushkin, V. G. Mokrozub, Yu. V. Nemtinova. – Tambov : Izdatel'skij dom TGU im. G. R. Derzhavina, 2011. – 236 s.

7. **Nemtinov, V. A.** Ispol'zovanie sistemy modelirovaniya dinamicheskih processov dlya operativnogo upravleniya promyshlennym proizvodstvom / V. A. Nemtinov, Yu. V. Nemtinova // Himicheskaya promyshlennost' segodnya. – 2007. – № 7. – S. 43 – 48.

УДК 66.045

Меренцов Н. А.[1], Персидский А. В.[2], Топилин М. В.[3], Лебедев В. Н.[3], Балашов В. А.[1], Голованчиков А. Б.[1]
[1]Волгоградский государственный технический университет, Россия, г. Волгоград
(Тел. 8-917-837-67-38, e-mail: steeple@mail.ru),
[2]АО Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Россия
(Тел. 8-937-718-44-58, e-mail: cdb@cdbtitan.ru),
[3]ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть» филиал,
г. Волгоград, Россия
(Тел. 8 (844) 296-77-99, e-mail: topilinmik@gmail.com)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В НАСАДОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Merentsov N. A.[1], Persidskiy A. V.[2], Topilin M. V.[3], Lebedev V. N.[3], Balashov V. A.[1], Golovanchikov A. B.[1]
[1]Volgograd State Technical University, Russian, Volgograd
(Tel. 8-917-837-67-38e-mail: steeple@mail.ru),
[2]JSC Federal Scientific and Production Centre “Titan – Barricady”, Russia, Volgograd
(Tel. 8-937-718-44-58e-mail: cdb@cdbtitan.ru),
[3]Branch of LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft, Russian, Volgograd
(Tel. 8 (844) 296-77-99e-mail: topilinmik@gmail.com)

AN EXPERIMENTAL FACILITY TO STUDY HYDRODYNAMICS AND HEAT-MASS TRANSFER IN PACKED CONTACT DEVICES

Аннотация. Приведено описание разработанной экспериментальной установки для исследования гидромеханических и тепломассообменных характеристик насадочных устройств любых конфигураций, рассмотрены примеры получаемых данных и оригинальные классифицирующие методики обработки опытных данных.

Ключевые слова: насадка, абсорбция, экстракция, ректификация, испарительное охлаждение, эксперимент, тепло- и массоперенос, гидродинамика.

Abstract. An experimental facility for the research of hydrodynamics and heat/mass transfer characteristics of packed devices of any configuration is described. The examples of the data received and original classificatory methods of experimental data processing are examined.

Keywords: packed, absorption, extraction, rectification, evaporative cooling, experiment, heat and mass transfer, hydrodynamics.

Фильтрационные течения в виде двухфазного газо- и парожидкостного потоков через слой насадки контактных устройств находят широкое промышленное применение. Так, например, в химической промышленности это процессы абсорбции, экстракции и ректификации, протекающие в насадочных колонных массообменных аппаратах, в теплоэнергетике – это испарительное охлаждение воды в оросителях градирен, в экологических процессах – это очистка газовых выбросов в абсорберах и скрубберах. При всем различии и специфике процессов, протекающих в указанном технологическом оборудовании, общим назначением их контактных устройств является создание таких усло-

вий организации взаимодействия газовой и жидкой фаз, когда обеспечивается наибольшая эффективность протекающих в этом оборудовании процессов при наименьших энергетических затратах. При большом разнообразии режимных факторов, химических и теплофизических свойств контактирующих потоков эффективность контактных устройств, как свидетельствует промышленный опыт и экспериментальные исследования, во многом определяется внутренней геометрией и конструктивным исполнением насадки, формирующей гидродинамическую обстановку в двухфазном фильтрационном потоке. Создание новой высокоэффективной насадки, как показано в работах [1 – 8], является трудоемким и затратным по времени процессом, связанным порою с конструктивным обеспечением необходимых и в то же время противоположных требований.

В работах [9, 10] рассматривается огромное количество промышленных и предлагаемых для промышленного использования насадок, продолжается работа по созданию новых видов нерегулярных, регулярных и структурированных насадок [1 – 8]. Выбор известных и создание новых насадок для контактных устройств технологического оборудования всегда связан с необходимостью оценки их эффективности для условий конкретного процесса. Ввиду большой специфики процессов, реализуемых в условиях двухфазного фильтрационного течения, невозможно однозначно определить наиболее эффективный тип насадки для его реализации. Одной из главных наших задач является разработка классифицирующих методик обработки экспериментальных данных [11, 12].

Для осуществления полного спектра экспериментальных исследований и проведения сравнительных характеристик насадочных устройств различных конфигураций была разработана экспериментальная установка (рис. 1, 2, 5), в которую заложен модульный принцип исследования и картриджная система сменных насадок, позволяющая осуществлять очень быстрое и точное исследование тепломассообменных и гидромеханических характеристик насадочных устройств.

Экспериментальная установка состоит из трех основных модулей, каждый из которых отвечает за отдельный спектр исследований. В каждом из модулей реализована картриджная система сменных насадок, позволяющая осуществить быструю смену насадок и обеспечивающая стабильную воспроизводимость экспериментальных данных в повторных экспериментах. Картриджи представляют собой прозрачные стеклянные цилиндрические и призматические колонны. Геометрическая конфигурация самого картриджа зависит от типа насадки и методики изготовления ее пилотного образца, так как многие структурированные насадки требуют очень четкой пространственной фиксации, и призматические картриджи с внутренними структурными элементами (скелетами) существенно упрощают задачу.

В первом модуле (рис. 1) реализуется широкий спектр традиционных экспериментальных исследований (рис. 3), таких как гидравлические сопротивления сухих и орошаемых насадок, удерживающая способность по жидкости и газу, гидравлические режимы и оптимальные диапазоны расходов жидкости и газов, коэффициенты тепло- и массопередачи и т.д. Особую ценность, наряду с традиционными критериями, для нас составляет удерживающая способность по жидкости и газу, которая является отражением аккумулирующей способности насадки, дающая возможность рассчитать время пребывания контактирующих фаз в аппарате, указать на суммарную поверхность тепломассопередачи для целого ряда насадок [13].

Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических и тепломассообменных характеристик насадочных устройств различных конфигураций:
1 – модуль исследования традиционных гидравлических и тепломассообменных характеристик насадок; *2* – модуль исследования структур потоков по жидкости и газу;
3 – модуль для адаптации насадочных устройств для реальных промышленных условий

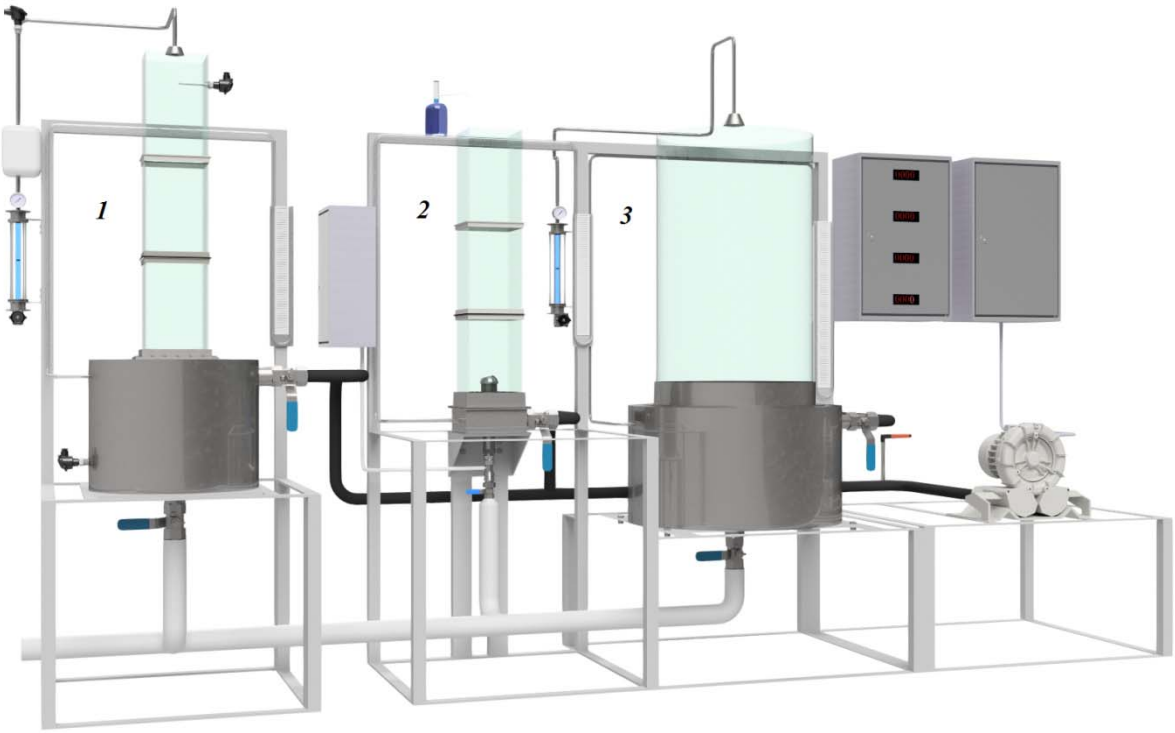


Рис. 2. Пространственная схема экспериментальной установки для исследования гидродинамических и тепломассообменных характеристик насадочных устройств:
1 – модуль исследования традиционных гидравлических и тепломассообменных характеристик насадок; *2* – модуль исследования структур потоков по жидкости и газу;
3 – модуль для адаптации насадочных устройств для реальных промышленных условий

Очень важной подтвержденной функцией экспериментального определения удерживающей способности является то, что она способна засвидетельствовать о наличии застойных зон в насадочных устройствах. Этот способ заключается в импульсной продувке насадочных устройств после первого замера удерживающей способности, и объем остаточной жидкости укажет на относительный процент застойных зон в объеме насадки. Следует иметь в виду, в первом модуле сменными являются не только исследуемые картриджные насадки, но и верхняя часть несущей колонны. Пример характеристик, исследуемых при помощи первого модуля, представлен на рис. 3.

Второй модуль экспериментальной установки (рис. 1) ориентирован на исследование структур потоков по жидкости и газу сквозь насадочные устройства любых конфигураций. Полученные данные по структурам потоков позволят дополнить расчет массообменных аппаратов по ячеечной, диффузионной и комбинированным моделям [14, 15].

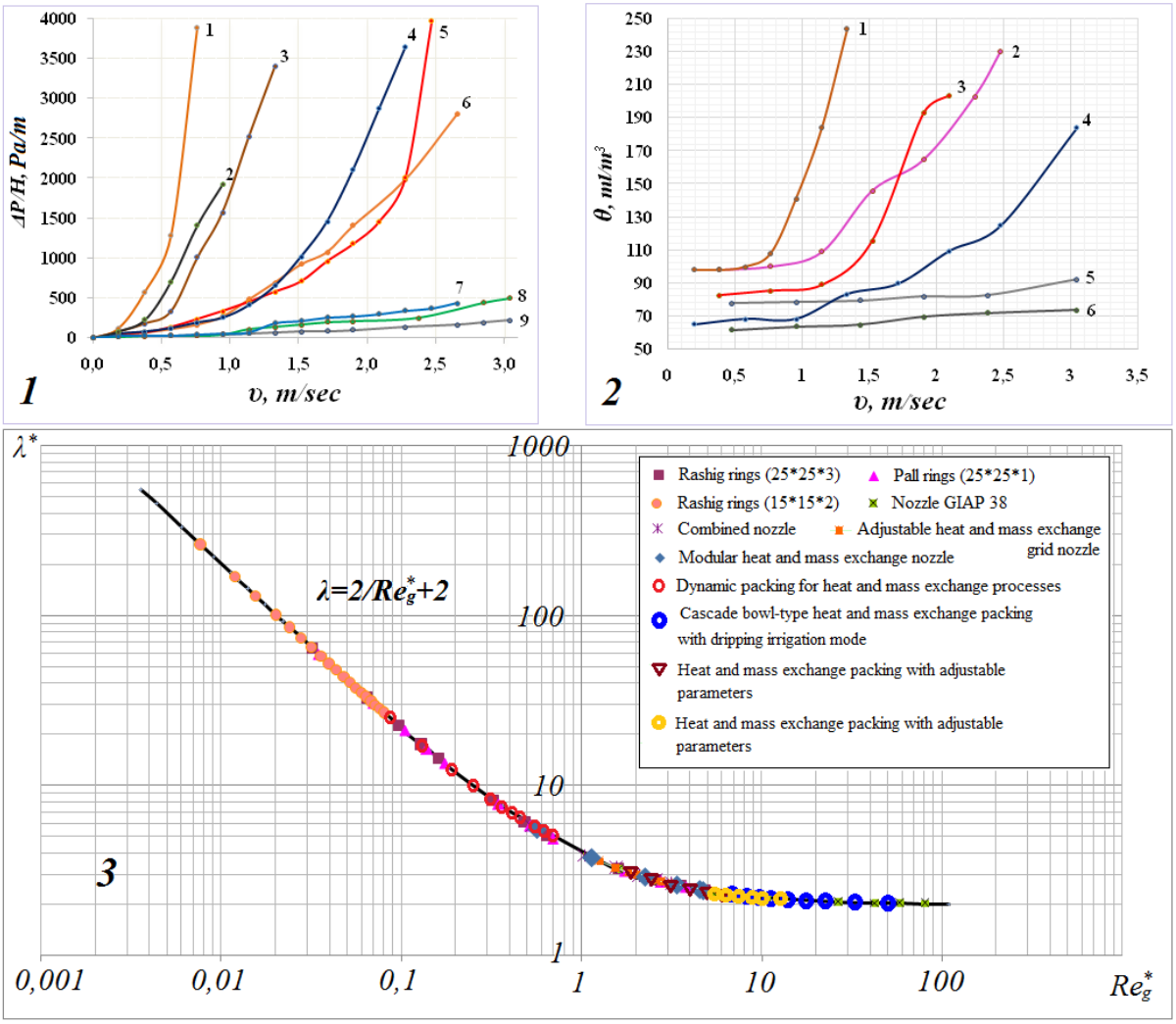


Рис. 3. Пример полученных экспериментальных данных при помощи первого модуля экспериментальной установки:
1 – гидравлические сопротивления сухих и орошаемых насадочных устройств;
2 – сравнительная классификация тепломассообменных насадочных устройств согласно режимному диапазону [11, 12]; *3* – удерживающая способность насадочных устройств различной конфигурации

Пример замеряемых кривых отклика для различных насадочных устройств представлен на рис. 4. Данная методика исследования структур потоков насадочных устройств позволяет не только получать необходимые реальные экспериментальные данные, дополняющие расчетные математические модели процессов, но и проводить классификацию насадок и выступать одной из важнейших классифицирующих характеристик. Кроме того, экспериментальное определение реальных структур потоков сквозь насадочные слои также позволяет выявить застойные зоны в объеме насадки.

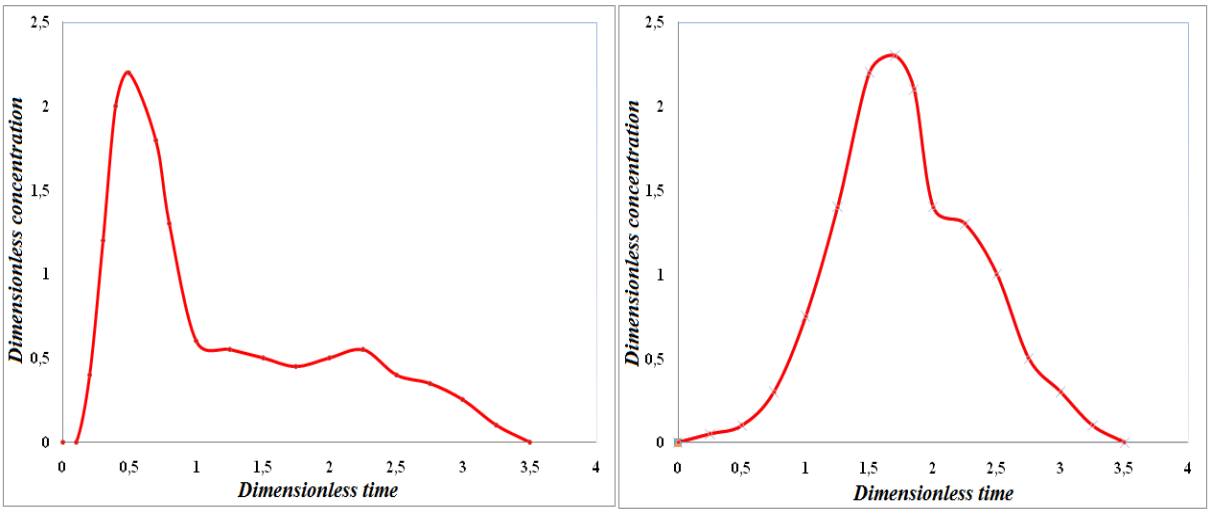


Рис. 4. Кривые отклика на импульсное возмущение потока жидкости на входе в безразмерных координатах (безразмерное время – безразмерная концентрация), отражающие реальные структуры потоков тепломассообменных насадочных устройств, полученные при помощи второго модуля экспериментальной установки

Третий модуль экспериментальной установки (рис. 1) позволяет, частично сглаживая масштабный переход, испытывать насадочные устройства в колонне большего размера, приближенной к реальным аппаратам малой производительности. Он состоит из газораспределительного и водосборного коллектора, на который устанавливаются сменные колонны с испытуемыми образцами насадок.

Рассмотрим схему (рис. 5) и принцип работы разработанной экспериментальной установки.

Экспериментальная установка состоит из опорных каркасов *1* и установленных на них корпусах колонн *2*, закрепленных на водосборных и газораспределительных коллекторах *3*. Корпус колонны *2* выполняет несущую функцию, в него помещаются сменные картриджи с насадочными устройствами *4*. Картридж заполняется исследуемой насадкой и помещается в корпус колонны *2*. Картридж представляет собой прозрачный цилиндрический или призматический канал, имеющий опорную решетку. Следует отметить, что корпуса колонн *2* являются быстросъемными, для замены в зависимости от формы устанавливаемого картриджа *4*. Стенки корпусов колонн *2* выполнены плоскими (цилиндрическими) и прозрачными, что позволяет без искажения наблюдать работу насадки в различных гидродинамических режимах и осуществлять съемку скоростной видеокамерой. Насадки орошаются жидкостью с помощью оросителей со сменными распределителями *10*, расход жидкости регулируется при помощи ротаметров *9*.

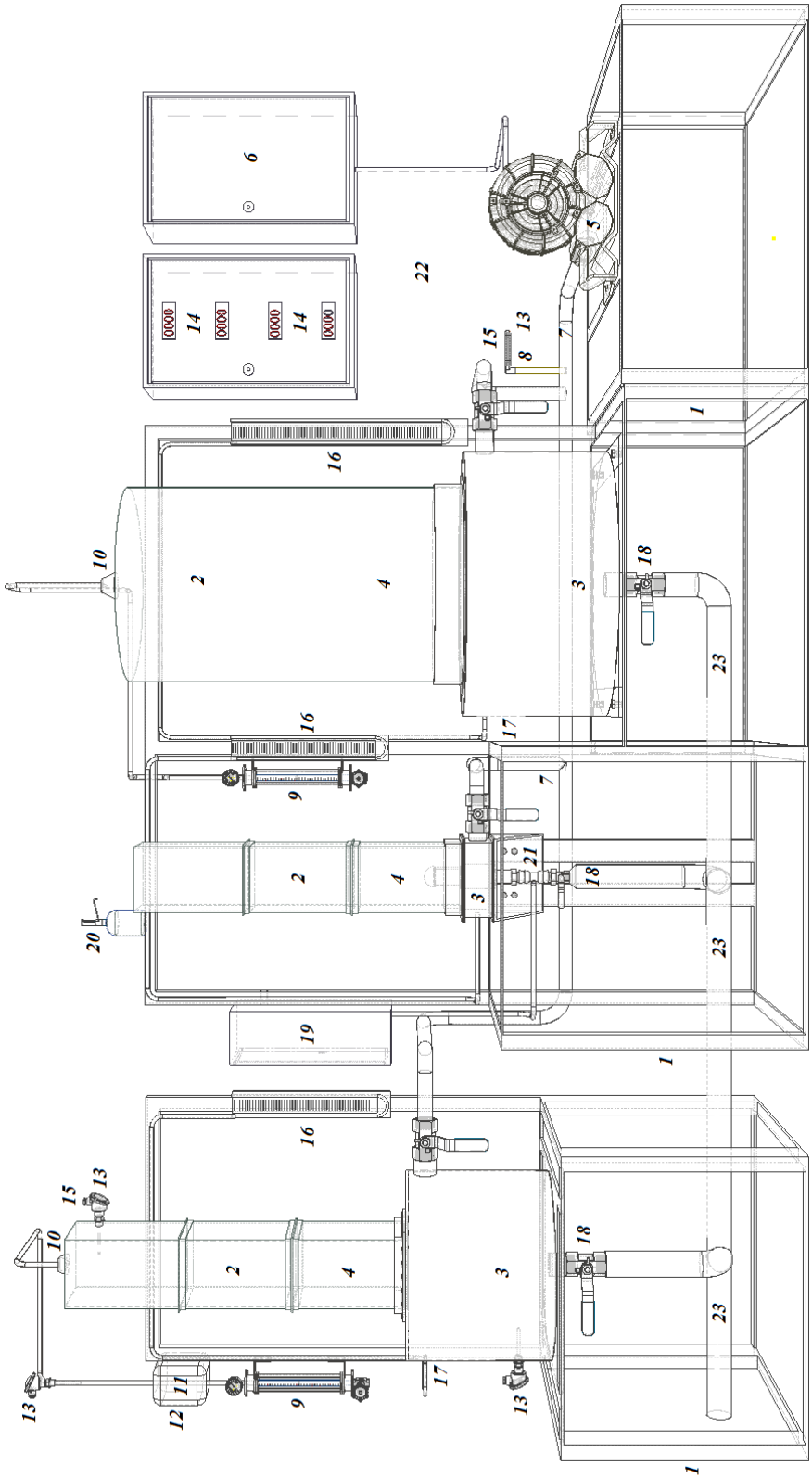


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

1 – опорная станина; *2* – корпус колонны; *3* – водосборный и газораспределительный коллектор; *4* – исследуемые насадочные устройства в картриджах; *5* – напорная воздуходувка; *6* – частотные преобразователи; *7* – воздухораспределительный канал; *8* – газовый расходомер с указанием скорости и объемного расхода; *9* – ротаметры; *10* – распределители жидкости сменные; *11* – проточный водонагреватель; *12* – потенциометр регулировки нагрева воды; *13* – температурные датчики; *14* – микропроцессорные приборы, обрабатывающие сигнал температурных датчиков; *15* – гигрометры; *16* – дифманометры; *17* – указатели уровня жидкости в коллекторах; *18* – вентили сливные быстросъемные (необходимо для экспериментально исследования удерживающей способности); *19* – блок для снятия кривых отклика при расшифровке структур потоков; *20* – механический дозатор индикаторных растворов; *21* – сменные электродные группы; *22* – экран для нанесения тарировочных графиков (представлен на фото); *23* – труба для слива воды в канализацию

Противотоком сквозь насадку *4* движется поток газа, поступающий по воздухораспределительному каналу *7*. Расход газа контролируется при помощи газового расходомера *8*, который транслирует скорость и объемный расход газа. Расход газового потока регулируется при помощи частотных преобразователей *6*, подающих сигнал на напорную воздуходувку *5* (вихревой турбокомпрессор).

Контролируемыми параметрами являются: расход подаваемой на орошение воды, контролируемый ротаметрами *9* и подогреваемой проточным водонагревателем *11*, тепловая мощность которого регулируется потенциометром *12*. Температура воды контролируется с помощью температурных датчиков *13* (ДТС 105-Pt100.A3) на входе и выходе, сигнал от которых обрабатывается в микропроцессорных приборах *14* (регистрирования 2ТРМ0 и регулирования ТРМ10), программируемых по очень широкому диапазону датчиков. Температура и влажность газа, поступающего и уходящего из колонн, фиксируется с помощью температурных датчиков *13* и гигрометров *15*. Гидравлическое сопротивление слоя насадки замеряется с помощью дифференциальных манометров *16* (жидкостных и электронных). Уровень жидкости в водосборных и газораспределительных коллекторах *3* контролируется с помощью указателей уровня *17*.

Подача жидкости на орошение насадки и регулирование ее расхода осуществляется с помощью ротаметров *9*, а ее накопление в водосборной емкости и истечение – с помощью кранов *18*. Вода из водосборных емкостей сливается в канализацию *23* через гидравлический затвор, легко снимаемый его штуцер крана *18*, что необходимо при проведении опытов по определению удерживающей способности насадки.

Регистрация структур потоков (рис. 4) в массообменных насадочных устройствах *4* осуществляется при помощи сменных электродных групп *21*, сигнал от которых обрабатывается в микросхемном блоке *19*. Для этого, предварительно, в жидкость при помощи механического дозатора *20* (BiohitProLine) импульсно подаются индикаторные растворы.

Таким образом, разработанная экспериментальная установка позволяет испытывать существующие и вновь разрабатываемые насадочные устройства любых конфигураций, проводить сравнительные (классифицирующую) характеристики этих насадок при помощи разработанных методик [11, 12], давать ориентир их промышленного применения и получать необходимые экспериментальные данные по структурам потоков жидкости и газа сквозь слой насадки, дополняющие разработанные математические модели массообменных процессов [14, 15].

Список использованных источников

1. **Study** of Fluid Dynamics of Mass-Transfer Apparatuses Having Stream-Bubble Contact Devices / I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Т. 52, № 5–6. – P. 299 – 304.

2. **Hydrodynamic** Characteristics of Mini-Ring Truncated-Cone Packing / A. S. Sokolov, A. S. Pushnov, M. V. Shapovalov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Т. 53, № 1–2. – С. 1 – 4.

3. **Flow** Dynamics of Mass Exchangers with Jet-Bubbling Contact Devices / O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Т. 53, № 1 – 2. – С. 130 – 134.

4. **Geometric** Characteristics of Packings and Hydrodynamics of Packed Biotrickling Filters for Air-Gas Purification / A. K. Mitin, N. E. Nikolaikina, A. S. Pushnov, N. A. Zagustina // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – T. 52, № 1. – P. 47 – 52.

5. **Optimal** Designing of Mass Transfer Apparatuses with Jet-Film Contact Devices / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, № 7–8. – P. 430 – 434.

6. **Improving** the Design of Grid Packing / A. A. Gorodilov, A. S. Pushnov, M. G. Berengarten // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – T. 50, № 1–2. – P. 84 – 90.

7. **Efficiency** of the Contact Stage of a Jet-Film Device During Rectification of Ethylbenzene–Styrene Mixture / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, № 7–8. – C. 501 – 507.

8. **Assessment** of Change in Torque of Stream-Bubble Contact Mass Transfer Devices / I. **N.** Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – T. 51, № 5–6. – C. 383 – 387.

9. **Сокол, Б. А.** Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол, А. К. Чернышов, Д. А. Баранов. – М. : ЗАО «Инфохим», 2009. – 358 с.

10. **Контактные** насадки промышленных тепломассообменных аппаратов / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов. – Казань : Отечество. 2013. – 454 с.

11. **The Filtration** Equation for Packing Material / A. B. Golovanchikov, V. A. Balashov, N. A. Merentsov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – V. 53, № 1–2. – P. 10 –13.

12. **Experimental** assessment of heat and mass transfer of modular nozzles of cooling towers / N. A. Merentsov, V. N. Lebedev, A. B. Golovanchikov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 115. – 9 p.

13. **Modeling** and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, V. A. Balashov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – V. 48, № 9–10. – P. 595 – 601.

14. **Голованчиков, А. Б.** Моделирование насадочной экстракционной колонны с диффузионной структурой потока по сплошной фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов // Химическая технология. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 377 – 384.

15. **Голованчиков, А. Б.** Оценка влияния обратного перемешивания сушильного агента на технологические и геометрические параметры барабанной сушилки / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 5. – С. 50 – 56.

References

1. **Study** of Fluid Dynamics of Mass-Transfer Apparatuses Having Stream-Bubble Contact Devices / I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – T. 52, № 5–6. – P. 299 – 304.

2. **Hydrodynamic** Characteristics of Mini-Ring Truncated-Cone Packing / A. S. Sokolov, A. S. Pushnov, M. V. Shapovalov// Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, № 1–2. – C. 1 – 4.

3. **Flow** Dynamics of Mass Exchangers with Jet-Bubbling Contact Devices / O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, №.1 – 2. – C. 130 – 134.

4. **Geometric** Characteristics of Packings and Hydrodynamics of Packed Biotrickling Filters for Air-Gas Purification / A. K. Mitin, N. E. Nikolaikina, A. S. Pushnov, N. A. Zagustina // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – T. 52, № 1. – P. 47 – 52.

5. **Optimal** Designing of Mass Transfer Apparatuses with Jet-Film Contact Devices / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, № 7–8. – P. 430 – 434.

6. **Improving** the Design of Grid Packing / A. A. Gorodilov, A. S. Pushnov, M. G. Berengarten // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – T. 50, № 1–2. – P. 84 – 90.

7. **Efficiency** of the Contact Stage of a Jet-Film Device During Rectification of Ethylbenzene–Styrene Mixture / A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – T. 53, № 7–8. – C. 501 – 507.

8. **Assessment** of Change in Torque of Stream-Bubble Contact Mass Transfer Devices / I. **N.** Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – T. 51, № 5–6. – C. 383 – 387.

9. **Sokol, B. A.** Mass-transfer column packed-type devices / B. A. Sokol, A. K. Chermyshov, D. A. Baranov. – Infokhim, Moscow, 2009. – 358 p.

10. **Kagan, A. M.** Contact packings in industrial heat-and-mass transfer apparatuses / A. M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farakhov. – Otechestvo, Kazan, 2013. – 454 p.

11. **The Filtration** Equation for Packing Material / A. B. Golovanchikov, V. A. Balashov, N. A. Merentsov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – V. 53, № 1–2. – P. 10 –13.

12. **Experimental** assessment of heat and mass transfer of modular nozzles of cooling towers / N. A. Merentsov, V. N. Lebedev, A. B. Golovanchikov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 115. – 9 p.

13. **Modeling** and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, V. A. Balashov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – V. 48, № 9–10. – P. 595 – 601.

14. **Nozzle** extraction column with diffusion flow structure over the uniform phase simulation/ A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov // Chem. Technology. – 2016. – T. 17, № 8. – P. 377 – 384.

15. **The backmixing** of drying agent impact on technological and geometrical parametres of reel dryer was assessed / A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, V. A. Balashov // Chem. Industry Today. – 2017. – № 5. – P. 50 – 56.

УДК 004.942: 57.0331

Куликова Е. Г.[1], Ефремова С. Ю.[2], Коновалов В. В.[3], Гумаров Г. С.[4]
[1]Пензенский государственный аграрный университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7963)1097784, e-mail: :kuleg@mail.ru,
[2]Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7963)1097784, e-mail: s_sharkova@mail.ru,
[3]Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),
[4]Западно-Казахстанский государственный университет имени М. Утемисова,
Республика Казахстан, г. Уральск
(Тел. (+7777)1831245, e-mail: ggs65@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ВЫСОТЫ РАСТЕНИЙ ТОМАТА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЛАМП ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Kulikova E. G.[1], Efremova S. Yu [2], Konovalov V. V.[3], Gumarov G. S.[4]
[1]Penza State Agrarian University, Russia, Penza
(Tel. (+7963)1097784, e-mail: kuleg@mail.ru,
[2]Penza State Technological University, Russia, Penza
(Tel. (+7963)1097784, e-mail: s_sharkova@mail.ru,
[3]Penza State Technological University, Russia, Penza
(Tel. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),
[4]West-Kazakhstan State University named after M. Utemisov,
Republic of Kazakhstan, Uralsk
(Tel. (+7777)1831245, e-mail: ggs65@yandex.ru)

MODEL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SPECIAL SPECTRUM LAMPS ON THE GROWTH PROCESSES OF TOMATO PLANTS

Аннотация. Целью исследований являлось определение функциональных зависимостей роста высоты растений томатов в первые два месяца вегетации. Сравнивается динамика роста высоты растений различных вариантов освещения: без дополнительного искусственного освещения, при использовании лампы DNAT, лампы GLP-FH-56-B, лампыGLP-FH-56-R, лампыGLP-FH-56-RB. Полученные функциональные модели увеличения высоты растений томатов в первые два месяца вегетации для различных способов дополнительного освещения с хорошей корреляцией описывают степенные уравнения.

Ключевые слова: модель, степенное уравнение, высота томата, искусственное освещение теплиц

Abstract. The aim of the research was to determine the functional dependences of the height growth of tomato plants in the first two months of vegetation. The dynamics of plant height growth of different lighting options is compared: without additional artificial lighting, using DNAT lamp, GLP-FH-56-B lamp, GLP-FH-56-R lamp, GLP-FH-56-RB lamp. The power equations described the functional models ofincrease in height of tomato plants in the first two months of vegetation for different ways of additional lighting with good correlation.

Keywords: model, power equation, tomato height, artificial lighting of greenhouses.

Введение. Растения адаптированы к тому спектральному составу излучения, который поступает к ним в условиях их экологической ниши, однако в различных широтах и в течение года (и даже дня) интенсивность спектра может значительно изменяться, т.е. солнечный свет не может быть принят как универсальное излучение для всего множества растений. Для получения сильного и здорового посадочного материала продолжительность светового дня для растений должна составлять не менее 10…14 часов.

В начале развития растений, когда площадь листьев небольшая, повышение темпа фотосинтеза происходит при более низких уровнях освещенности, чем при развитом листовом аппарате взрослых растений. Поэтому на общем слабом световом фоне даже незначительное дополнительное освещение – досвечивание рассады – дает ощутимый эффект, и первостепенной задачей овощеводства является организация дополнительного освещения. Это было отмечено и Канадскими исследователями [1].

В этом плане представляют интерес работы по изучению спектрального состава света, наиболее эффективного для выращивания растений [2]. Для оценки светодиодов подробные научные исследования по влиянию различных спектров для оптимального роста растений на конкретные виды растений также проведены многими зарубежными учеными. Влияние типа источника света на томаты по фотосинтетической активности разнообразно и является многонаправленным [3]

В частности, отмечена эффективность влияния синих светодиодов на фотосинтетическую активность растений томата [4], показано, что сочетание синих длин волн улучшает количество пигмента хлорофилла. В работе [5] отмечено, что влияние синего света было полезно для огурца, но не для томатов. В сравнительном исследовании авторами [6, 7] обсуждается специфическая реакция растений на разные длины волн. Явная реакция растений томатов до 3-недельного выращивания была отмечена под более красным и темно-красным светом [2].

Целесообразно научно обосновать оптимальный спектральный состав зоны фотосинтетически активной радиация (8, 9) для конкретной культуры защищенного грунта [5 – 7], в связи с этим нами было изучено влияние пиков 440…450 нм и 650…660 нм спектра экспериментальных светодиодных ламп на фазы развития томата.

Анализируя как указанные работы, так и работы иных авторов, следует отметить отсутствие функциональных математических моделей развития растений.

Целью данной работы является выявление функциональной модели изменения высоты растений томатов в процессе их роста при световом воздействии различных источников света.

Результаты экспериментальных исследований и методика моделирования. В основу численного моделирования роста растений томата положены результаты экспериментальных исследований облучения растений различными лампами в процессе первых двух месяцев вегетации.

У растений семейства пасленовые, так же как и у зеленных культур, положительное влияние ламп специального спектра проявляется уже на первых этапах развития. Растения под лампой с пиком в синей зоне выглядели коренастыми, компактными, имели интенсивную окраску.

Томат в своем развитии проходит несколько стадий. Одним из основных показателей, характеризующих развитие растения на начальных фазах, конечно, является высота растений. Под контрольной лампой DNAT растения сразу начинали вытягиваться и

имели явные признаки светоголодания. В фазу 3–4 настоящих листов данная тенденция усиливалась, и растения под контрольными лампами вытягивались и явно отставали в развитии.

В фазу формирования первой завязи динамика сохранялась, и растения томата под испытуемыми лампами с пиками в синей и красной зоне наиболее чутко реагировали на данные виды освещения, что подтверждается результатами биометрических исследований (рис. 1).

У растений семейства пасленовые, так же как и у зеленых культур, положительное влияние ламп специального спектра проявляется уже на первых этапах развития. Растения под лампой с пиком в синей зоне выглядели коренастыми, компактными, имели интенсивную окраску.

Томат в своем развитии проходит несколько стадий. Одним из основных показателей, характеризующих развитие растения на начальных фазах, конечно, является высота растений. Под контрольной лампой DNAT растения сразу начинали вытягиваться и имели явные признаки светового голодания. В фазу 3–4 настоящих листов данная тенденция усиливалась, и растения под контрольными лампами вытягивались и явно отставали в развитии.

В фазу формирования первой завязи динамика сохранялась, и растения томата под испытуемыми лампами с пиками в синей и красной зоне наиболее чутко реагировали на данные виды освещения, что подтверждается результатами биометрических исследований.

В фазу цветения наблюдалось уже явное преимущество воздействия испытуемых ламп над светильником ДНАТ по всем трем культурам. Кроме того, отмечалось наступление этой фазы на десять дней раньше под лампой с пиком в синей зоне, на 7 дней – в красной, по сравнению с контрольным светильником. Растения сформировали наибольшую наземную массу, имели хорошую облиственность, яркую окраску листьев и мощные соцветия.

В основу численного моделирования роста высоты растений томата положены результаты экспериментальных исследований облучения растений различными лампами в процессе первых двух месяцев вегетации.

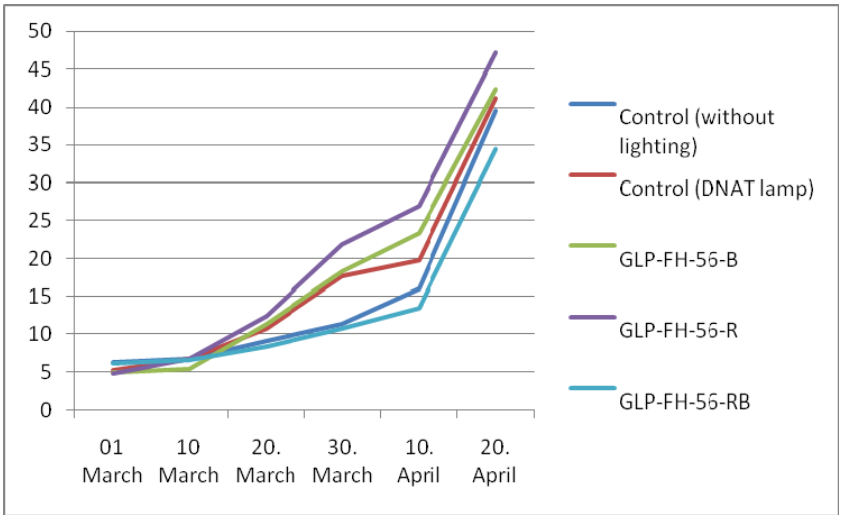


Рис. 1. Динамика высоты растений томата под исследуемыми лампами, см

Изучение динамики роста растений томатов под исследуемыми лампами показало (рис. 1), что лампа GLP-FH-56-B с пиком в красной зоне оказывала наибольшее влияние на показатели линейного роста перца сладкого, лампа GLP-FH-56-R с пиком в красной зоне – на растения томата. Суточный прирост томатов – 15,3%, по сравнению с группой облучаемой контрольной лампой.

Методика моделирования предусматривала обработку результатов экспериментальных исследований по средним значениям высоты растений на момент проведения замера. Для обработки полученных данных использовались возможности встроенных функций статистической обработки программы MathCAD по получению регрессионных моделей различного типа. Наиболее точно описывает экспериментальные данные степенная модель.

Результаты моделирования и их анализ. В результате статистической обработки результатов экспериментов (рис. 1), используя возможности математического пакета MathCAD-14, были получены ряд функциональных моделей для высоты растений при различных способах освещения (рис. 2): Y – без дополнительного освещения; Y0 – лампа DNAT; Y1 – лампа GLP-FH-56-B; Y2 – лампа GLP-FH-56-R; Y3 – лампа GLP-FH-56-RB. Для каждой модели приведен коэффициент корреляции R.

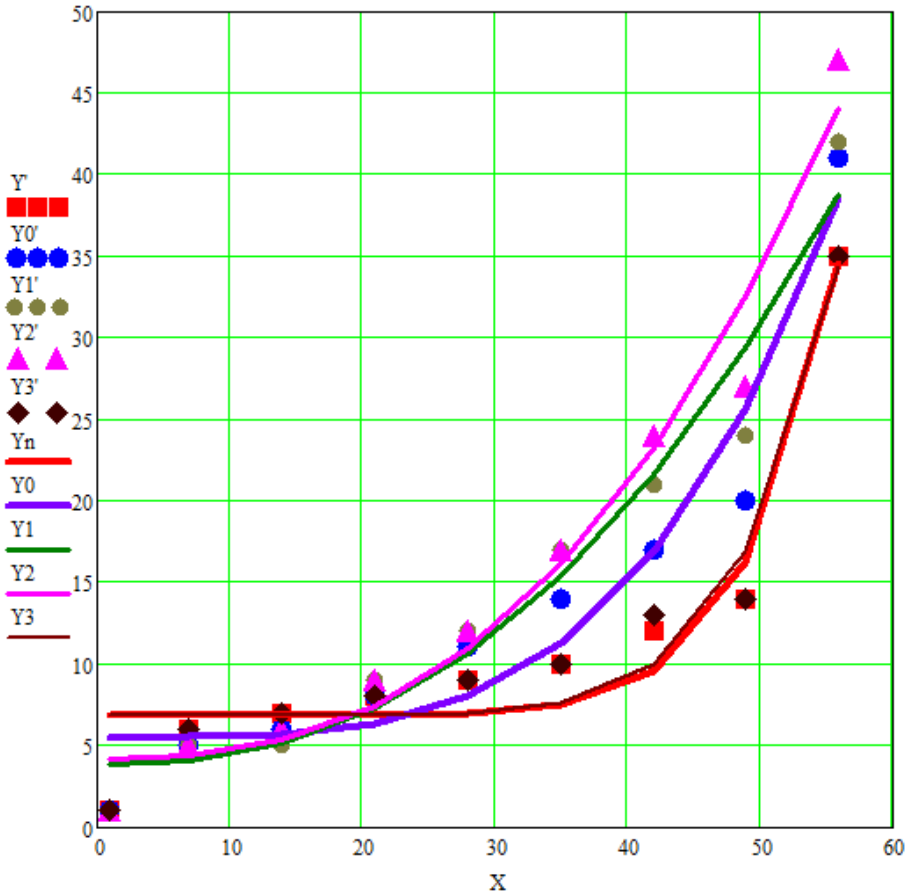


Рис. 2. Графические результаты моделирования роста растений степенными функциями:
Y, Yn – без дополнительного освещения; Y0 – лампа DNAT;
Y1 – лампа GLP-FH-56-B; Y2 – лампа GLP-FH-56-R; Y3 – лампа GLP-FH-56-RB;
наличие «штриха» показывает экспериментальные результаты; отсутствие «штриха» показывает расчетные значения по степенной модели

Степенная модель роста растений томата, см:

$$Y = 6{,}823 + 2{,}084 \cdot 10^{-13} \cdot X^{8{,}079};\ \mathrm{R} = 0{,}921; \quad (1)$$

$$Y_0 = 5{,}484 + 1{,}037 \cdot 10^{-5} \cdot X^{3{,}72};\ \mathrm{R} = 0{,}932; \quad (2)$$

$$Y_1 = 3{,}78 + 2{,}772 \cdot 10^{-3} \cdot X^{2{,}346};\ \mathrm{R} = 0{,}957; \quad (3)$$

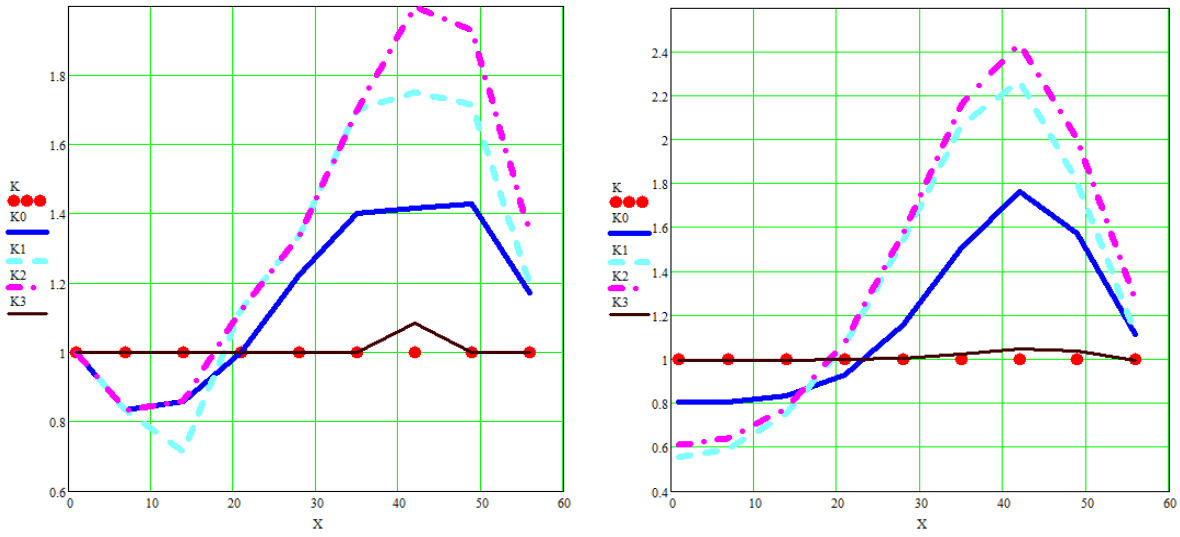
$$Y_2 = 4{,}157 + 1{,}308 \cdot 10^{-3} \cdot X^{2{,}565};\ \mathrm{R} = 0{,}967; \quad (4)$$

$$Y_3 = 6{,}8 + 1{,}928 \cdot 10^{-12} \cdot X^{7{,}525};\ \mathrm{R} = 0{,}914; \quad (5)$$

Графический анализ результатов (см. рис. 2) и числовые значения коэффициентов корреляции моделей R позволили выделить совпадение тенденций опытных значений и степенной функции.

Анализ графиков функциональных моделей роста высоты растений томата показывает соответствие степенных моделей экспериментальным результатам, что подтверждается числовыми значениями коэффициентов корреляции: R = 0,914…0,967. Поэтому указанные функциональные модели могут использоваться при описании роста высоты растений в первые два месяца вегетации растений.

Определено экспериментальное соотношение значений высоты растения при дополнительном освещении относительно варианта отсутствия дополнительного освещения (рис. 3, *а*) по экспериментальным данным. На рисунке 3, *б* даны результаты сопоставления расчетных данных по степенным моделям.



а) *б*)

Рис. 3. Зависимость длительности роста на коэффициент соотношения роста растений при исследуемом варианте дополнительного освещения на рост при отсутствии дополнительного освещения:

а – экспериментальные данные; *б* – расчетные данные по моделям;
К – без дополнительного освещения; К0 – лампа DNAT; К1 – лампа GLP-FH-56-B;
К2 – лампа GLP-FH-56-R; К3 – лампа GLP-FH-56-RB

Анализ графиков показывает общие тенденции изменения высоты растений при сроке роста растений более 2 недель. Наиболее интенсивно различие высоты при возрасте растений от 30 до 50 суток. Позже высоты растений выравниваются. Однако различия при этом в высоте сохраняются.

Коэффициент увеличения высоты растений для разных вариантов дополнительного освещения относительно отсутствия дополнительного освещения составляет на конец эксперимента: K = 1,17 – для лампы DNAT; K = 1,2 – для лампы GLP-FH-56-B; K = 1,343 – для лампы GLP-FH-56-R; K = 1 – для лампы GLP-FH-56-RB.

Заключение. Наиболее эффективным вариантом освещения томатов, влияющим на рост растений томатов в первые два месяца вегетации, является дополнительное использование ламп GLP-FH-56-R. Наиболее существенны различия роста растений во второй месяц вегетации. В дальнейшем различия высоты растений снижаются. Увеличение высоты растений томатов в первые два месяца с хорошей корреляцией описывают степенные уравнения функциональных моделей.

Список использованных источников

1. **Dorais, M.**, Gosselin, A. Physiological response of greenhouse vegetable crops to supplemental lighting // ActaHorticulturae. – 2002. – V. 580. – P. 59 – 67.

2. **Gorbachevskaya, O.**, Vogel, K., Kappis, C., Schreiter, H. Light red and dark red as well as far red light in the cultivation of tomato // Journal fur Kulturpflanzen. – 2016. – V. 68, Is. 10. – P. 295 – 305.

3. **Rakutko, S.**, Alsina, I., Avotins, A., Berzina, K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses // Engineering for Rural Development. – 2018. – V. 17. – P. 186 – 191.

4. **Metera, A.**, Wtulich, J. Gajc-Wolska, J., Bujalski, D.KowalczykK. Evaluation of developmental parameters of tomato seedlings (Solanumlycopersicum) due to various LED light quality // ActaHorticulturae. – 2016. – V. 1142. – P. 383 – 388.

5. **Ménard, C.**, Dorais, M., Hovi, T., Gosselin, A. Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue // ActaHorticulturae. – 2015. – V. 711. – P. 291 – 296.

6. **Singh, D.**, Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., Roth, B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 49. – P. 139 – 147.

7. **Olle, M.**, Viršile, A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality // Agricultural and Food Science. – 2013. – V. 22, Is. 2. – P. 223 – 234.

8. **Vinković, T.**, Parađiković, N., Tkalec, M., Lisjak, M., Teklić, T., Zmaić, K., Vidaković, M. Influence of led lighting on yield and growth parameters of tomato // Poljoprivreda. – 2016. – V.22, Is. 1. – P. 3 – 9.

9. **Durieux, A.** Effect of (additional) lighting on the production of vegetable crops // ActaHorticulturae. – 1997. – V. 418. – P. 33 – 36.

УДК 621.91.061

Макухин А. Г.[1], Кроль О. С.[2], Синдеева Е. В.[1], Сыровой Г. В.[1]
[1]Луганский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск
(E-mail: siig@i.ua),
[2]Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,
Украина, г. Северодонецк
(Тел. (+38)0957131879, e-mail: krolos@yandex.ru)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКЕ МОДЕЛИ СФ68

Makukhin A. G.[1], Krol O. S.[2], Sindeyeva E. V.[1], Syrovoy G. V.[1]
[1]Vladimir Dahl Lugansk National University, Lugansk
(E-mail: siig@i.ua),
[2]Vladimir DahlEast Ukrainian National University, Ukraine, Severodonetsk
(Tel. (+38)0957131879, e-mail: krolos@yandex.ru)

OPTIMIZATION OF CUTTING CONDITIONS IN MILLING ON THE CF68 MODEL MACHINE

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации режимов резания детали типа «основание» на вертикально-фрезерном консольном станке модели СФ68ВФ4. В качестве метода поиска наилучших режимов обработки выбран метод линейного программирования в графо-аналитическом варианте.

Разработана трехмерная модель торцевой фрезы в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.

В качестве целевой функции выбран показатель производительности обработки, оцениваемый по основному времени обработки. Для этого в работе осуществлен выбор оптимизируемых переменных – подачи на зуб и частоты вращения шпинделя.

Предложена математическая модель задачи оптимизации режимов фрезерной обработки жаропрочной стали. Сформирована система технических ограничений, включающая стойкостные зависимости, характерные для твердосплавной торцевой фрезы, а также энергетические предельные ограничения, лимитируемые приводом главного движения и приводом подачи.

Приведена графическая интерпретация выпуклой области допустимых режимов резания и целевой функции решаемой задачи. Определены численные значения режимов резания, допускающих максимум производительности операции торцевого фрезерования заготовки из жаропрочной стали.

Ключевые слова: оптимизация, фрезерование, подача на зуб, глубина резания, целевая функция, технические ограничения.

Abstract. The paper considers optimization of cutting modes for “base” type parts on vertical milling console machine of CF68BF4model. The method of linear programming in the graph-analytical version was used to seek the best processing modes.

A three-dimensional model of the end mill was constructed in the COMPASS-3D computer-aided design system.

The processing performance indicator estimated by the main processing time was used as a target function. For this purpose, the choice of optimized variables – feed to the tooth and spindle speed – was made.

A mathematical model of the problem of optimization of milling modes of heat-resistant steel is proposed. A system of technical constraints, including the resistance dependencies typical of a carbide end mill, as well as energy limit constraints limited by the main drive and feed drive, has been formed.

A graphical interpretation of the convex domain of permissible cutting conditions and the objective function of the problem is presented. The numerical values of cutting conditions, allowing for high productivity face milling operation of a work piece of heat-resistant steel are determined.

Keywords: optimization, milling, feeding per tooth, cutting depth, target function, technical limitations.

Современный исследователь должен владеть методикой и алгоритмами решения задач выбора оптимальных режимов резания. Это особенно важно при эксплуатации дорогостоящего оборудования. Выбор оптимальных режимов резания осуществляется на базе математического моделирования задачи [1].

Анализ работ показал, что целевые функции различаются выбором критерия оптимизации, комплексом исходных параметров модели и технических ограничений и методами решения задачи оптимизации [2 – 4].

В работе [2] рассмотрена оптимизация режимов резания при чистовом точении вала в центрах на токарно-винторезном станке модели 16К20Ф3 методом геометрического программирования (ГП). В качестве целевой функции принята себестоимость продукции, а оптимизируемыми параметрами являлись глубина и скорость резания.

Вместе с тем, метод ГП позволяет решить ряд практических задач оптимизации режимов резания, не прибегая к трудоемким методам нелинейного программирования.

В работе [4] авторами рассмотрена оптимизация резания по таким критериям, как машинное время, стрела прогиба детали и мощность резания. С помощью этого метода были получены оптимальные режимы черновой токарной обработки. Черновая обработка осуществлялась с помощью сборного проходного резца с механическим креплением шестигранной пластины Т30К4.

В данной работе проводится оптимизация режимов резания при фрезеровании на станке модели методом линейного программирования.

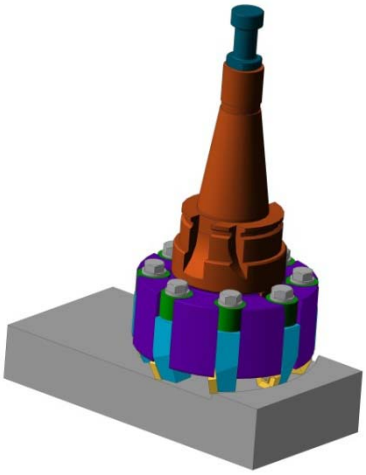
Целью работы является решение задачи оптимизации режимов резания при обработке детали типа «основание» на фрезерно-сверлильно-расточном станке модели СФ68ВФ4 с помощью метода линейного программирования.

Для достижения данной цели решаются следующие задачи:

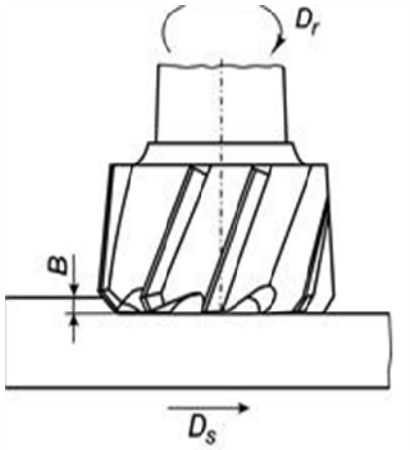
1. Построение модели для торцевого фрезерования.
2. Нахождение частоты вращения станка.
3. Определение подачи станка на зуб фрезерования

Для решения задачи необходимо определить целевую функцию, на основе которой можно произвести анализ вариантов оптимального фрезерования.

Для построения модели фрезерования (рис. 1) принимаем материал детали – сталь жаропрочную 12Х18Н9 со следующими свойствами: предел прочности $\sigma_в = 660$ Мпа; заготовка – поковка.



а)



б)

Рис. 1. Технологическая операция торцевого фрезерования:
а – 3D-модель; *б* – схема фрезерования

В качестве критерия оптимизации принимаем основное время обработки при фрезеровании и производительность.

Выбираем оптимизируемые параметры – подачу на зуб S_z и частоту вращения *n*, тогда целевая функция будет иметь вид

$$t_0 \to \min,$$

где t_0 – основное время обработки при фрезеровании.

Следовательно,

$$S_z n \to \max,$$

принимая

$$S_z = x_2, \quad n = x_1.$$

Целевая функция принимает вид

$$f(x_1 + x_2) \to \max.$$

Математическая модель представляет собой совокупность уравнений и неравенств:

$$\begin{cases} nS_z^{0,3} \le 148{,}43; \\ nS_z^{0,78} \le 11{,}63; \\ S_z^{0,78} \le 0{,}13; \\ n_1 \ge 20; \\ n_2 \le 4000; \\ S_1 \ge 0{,}00005; \\ S_2 \le 15; \\ f_0 = (x_1 + x_2) \to \max. \end{cases} \qquad \begin{cases} x_1 + 0{,}3x_2 \le 2{,}17; \\ x_1 + 0{,}78x_2 \le 1{,}07; \\ 0{,}78x_2 \le -0{,}89; \\ x_1 \ge 1{,}3; \\ x_1 \le 3{,}6; \\ x_2 \ge -4{,}3; \\ x_2 \le 1{,}2; \\ f_0 = (x_1 + x_2) \to \max. \end{cases}$$

Для решения математической модели формируем технические ограничения:

1. Ограничение по режущим возможностям (стойкости) инструмента, которое устанавливает взаимосвязь между скоростью резания V и показателем обрабатываемости V_T (скорость резания, соответствующая определенной скорости инструмента).

Из уравнения [6] и справочных данных [5]

$$V \le V_T, \quad V = \frac{\pi D n}{1000}, \quad V_T = \frac{C_V D_ф^q K_V}{T t S_z^y B^u z^p}.$$

Диаметр фрезы определяем по формуле

$$D_{\max} = (0{,}4...0{,}5)B_c = (0{,}4...0{,}5)\cdot 400 = 160...200 \text{ мм},$$

где B_c – ширина стола.

Принимаем

$$\frac{\pi D n}{1000} \le \frac{C_V D_ф^q K_V}{T^m t^x S_z^y B^u z^p},$$

$$n S_z^{0,3} \le 148{,}43.$$

2. Ограничение по мощности станка

$$N_{эф} = \frac{P_z V}{1020\cdot 60} \le N_{ст} = N_{эд}\eta,$$

где $N_{ст} = 7{,}5$ кВт – мощность электродвигателя привода главного движения. Задаем коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}8$

$$n S_z^{0,78} \le 11{,}63.$$

3. Для ограничения по прочности механизма подач принимаем наибольшее усилие подачи $[P_{ст}] = 4000$ Н.

С учетом данных [6]

$$S_z^{0,78} \le 0{,}13.$$

Параметрические ограничения по паспорту станка:

$$20 \le n \le 4000,$$

$$S_м = 2...3000,$$

$$S_м = S_z z_ф n,$$

$$S_z = \frac{S_м}{z_ф n} = \frac{2}{4000\cdot 10} = 0{,}00005,$$

$$S_z = \frac{S_м}{z_ф n} = \frac{3000}{20\cdot 10} = 15.$$

При использовании метода линейного программирования искомая модель процесса представляет собой

$$\begin{cases} nS_z^{0,3} \le 148{,}43; \\ nS_z^{0,78} \le 11{,}63; \\ S_z^{0,78} \le 0{,}13; \\ n_1 \ge 20; \\ n_2 \le 4000; \\ S_1 \ge 0{,}00005; \\ S_2 \le 15; \\ f_0 = (x_1 + x_2) \to \max. \end{cases} \qquad \begin{cases} x_1 + 0{,}3x_2 \le 2{,}17; \\ x_1 + 0{,}78x_2 \le 1{,}07; \\ 0{,}78x_2 \le -0{,}89; \\ x_1 \ge 1{,}3; \\ x_1 \le 3{,}6; \\ x_2 \ge -4{,}3; \\ x_2 \le 1{,}2; \\ f_0 = (x_1 + x_2) \to \max. \end{cases}$$

Оптимальные режимы резания определяются графически, изобразив все неравенства и уравнения f_0 в двойных логарифмических координатах (рис. 2).

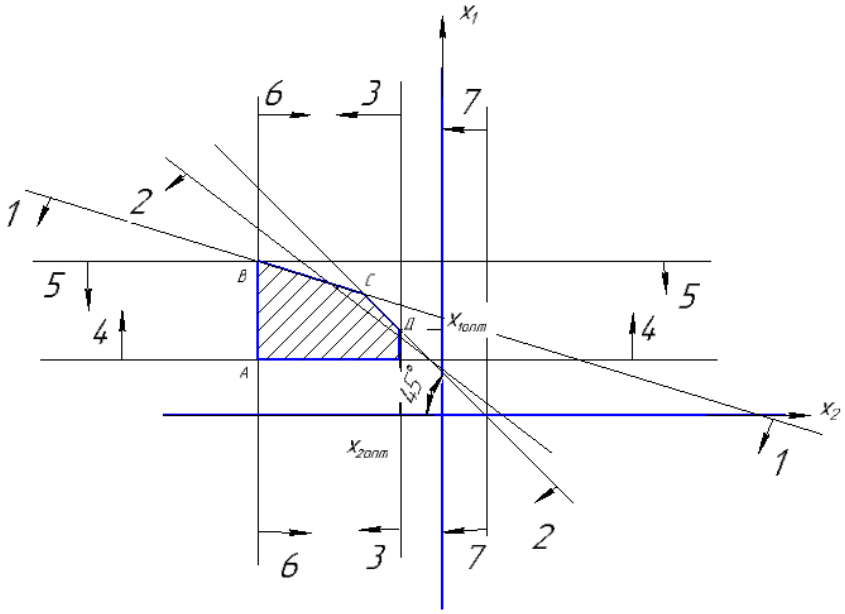


Рис. 2. Схема определения оптимальных режимов резания

Таким образом, решение математической модели методом линейного программирования дало значения для построения схемы определения оптимальных режимов резания.

Исходя из анализа (рис. 2), получаем область допустимых значений для n и S_z.

Для нахождения оптимальных значений при решенных величинах проводим прямую под углом 45°, получаем координаты точки D со значениями $x_{1опт}$ и $x_{2оп}$. Таким образом, поставленная задача получения оптимальных значений $n_0 = 10^{x_1} = 10^{2,07} = 117{,}5$ об/мин и $S_0 = \frac{1}{10^{1,1}} = \frac{1}{12{,}6} = 0{,}079$ мм/зуб. решена.

Выводы

1. В работе предложен один из вариантов оптимизации режимов резания при фрезеровании на станке модели СФ68ВФ4.

2. Сформирована математическая модель, позволяющая построить схему определения оптимальных параметров режимов резания методом линейного программирования.

3. Получены значения оптимальных параметров режимов резания для станка модели СФ68ВФ4.

Список использованных источников

1. **Штойер, Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. – М. : Радио и связь, 1992. – 504 с.

2. **Кроль, О. С.** Методы объединения и двойственного геометрического программирования оптимальных режимов резания / О. С. Кроль, Г. Л. Хмеловский, В. В. Пейчева // Технология и автоматизация машиностроения : Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1990. – Вып. 46. – С. 58 – 63.

3. **Кроль, О. С.** Метод послідовних відступлень у задачах оптимізації режимів різання / О. С. Кроль, Г. Л. Хмєловський // Технологія та автоматизація машинобудування : Респ. міжвідомств. наук-техн. зб. – 1981. – Вип. 48. – С. 28 – 31.

4. **Кроль, О. С.** Оптимізація процесу різання методом «ідеальної точки» / О. С. Кроль, Г. Л. Хмєловський // Технологія та автоматизація машинобудування : Респ. міжвідомств. наук-техн. зб. – 1992. – Вип. 49. – С. 34 – 38.

5. **Справочник** технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 496 с.

6. **Кроль, О. С.** Методы и процедуры оптимизации режимов резания : монография / О. С. Кроль – Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. – 260 с.

7. **Руководство** по эксплуатации станка модели СФ68.

УДК 621.8

Зайцев В. Ю.[1], Коновалов В. В.[1], Родионов Ю. В.[2]
[1]Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7909)31, e-mail: vluzai@gmail.com),
[2]Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (+7920)4780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru)

ЗАКЛИНИВАНИЯ РУЧНОГО ЗАКЛЕПОЧНИКА – ПРОБЛЕМА, РЕШЕНИЕ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Zaitsev V. Yu.[1], Konovalov V. V.[1], Rodionov Yu. V.[2]
[1]Penza State Technological University, Russia, Penza
(Tel. (+7909)3163775, e-mail: vluzai@gmail.com),
[2]Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (+7920)4780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru)

MANUAL RIVETER JAMMING – PROBLEM, DECISION, VISUALIZATION

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования механизма устройства для установки заклепок ручным инструментом (заклепочником). В том числе решается проблема заклинивания отработанной ножки заклепки в исполнительном механизме заклепочника. Описано устройство и принцип работы ручного заклепочника. Устанавливаются достоинства и проблемы, возникающие при работе с ручными заклепочниками. В процессе моделирования работы заклепочника записываются предельные условия равновесия. Из условий прочности определяются силовые зависимости. Определяется условие самоторможения оторванного сердечника в губках заклепочника. Исходя из полученного условия самоторможения, производится визуализация результатов моделирования работы механизма заклепочника и вырабатываются практические рекомендации по устранению проблемы заклинивания отработанного сердечника.

Ключевые слова: заклепочник, исполнительный механизм, сердечник заклепки, губки заклепочника, напряжения растяжения, напряжения смятия, условие прочности, предельное равновесие, условие заклинивания, угол трения, угол наклона зуба.

Abstract. The issues of modeling the mechanism of the device for installing rivets with a hand tool (riveter) are considered. The problem of jamming the use drivet leg in the executive mechanism of the riveter is considered. The device and the principle of operation of the manual riveter are described. The advantages and problems arising when working with manual riveters are established. In the process of modeling the work of the riveter, the limiting equilibrium conditions are recorded. The strength conditions are determined by force dependencies. The condition of self-braking of the severed core in the riveter jaws is determined. Based on the obtained condition of self-braking, the results of modeling of the riveter mechanism operation are visualized and practical recommendations to eliminate the problem of jamming of the spent core are developed.

Keywords: riveter, actuator, rivet core, rivet sponge, tensile stress, crushing stress, strength condition, ultimate balance, jamming condition, friction angle, tooth tilt angle.

Введение. Часто в строительстве, машиностроении и других отраслях, в индивидуальном хозяйстве существует необходимость крепления и соединения нагруженных деталей из тонких листовых материалов, без особых требований по прочности и герметичности соединений.

В настоящее время для крепления и соединения листовых материалов широко применяются заклепочные соединения с использованием вытяжных заклепок открытого типа. Для осуществления соединения деталей с помощью вытяжных заклепок применяется достаточно простой и дешевый по конструкции и эксплуатации ручной механизм, не требующий особых навыков в работе и высокой квалификации рабочего. Поэтому ручные заклепочники (механические, пневматические, пневмогидравлические) подобного назначения получили широкое распространение [3].

Однако при работе с ручным вытяжным заклепочником возникают следующие проблемы [1, 2]:

– наличие острого края сердечника с одной стороны заклепки;

– оторванный сердечник заклепки остается в исполнительном механизме заклепочника.

Решению второй указанной проблемы и посвящена данная работа.

Основная часть. *Задачей* исследований является теоретическое обоснование выражений для моделирования работы механизма заклепочника и установление условий, препятствующих заклиниванию сердечника заклепки в механизме заклепочника.

Для установления причин заклинивания ножки заклепки в исполнительном механизме ручного механического заклепочника рассмотрим устройство вытяжной заклепки и исполнительного механизма заклепочника.

Диаметры вытяжных заклепок (d_1) чаще всего соответствуют диапазону размеров от 2,4 до 6,4 мм, диаметры сердечников (d) от 1,85 до 3,71 мм. Наиболее распространенным вариантом на практике является вариант, когда корпус заклепки изготавливается из алюминиевого сплава, а сердечник из стали. Конструктивно вытяжная заклепка представлена на рис. 1.

Несмотря на многообразие конструкций ручных заклепочников исполнительный механизм инструментов конструктивно можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2.

Коническая направляющая *2* в виде втулки служит для обеспечения продольного холостого и рабочего хода губок *3*, перемещающихся в процессе заряжания и работы заклепочника. Коническая часть позволяет губкам расходиться и смыкаться по продольном их перемещении вдоль направляющей. Клиновый замыкатель *4* за счет пружины и конической части направляющей обеспечивает сжимание губок 3 при захвате сердечника.

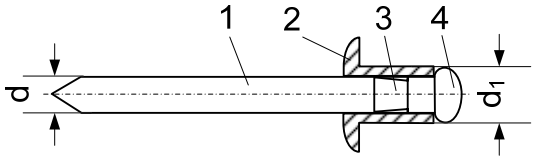


Рис. 1. Конструкция вытяжной заклепки:

1 – сердечник заклепки; *2* – корпус заклепки; *3* – опасное сечение сердечника заклепки; *4* – головка сердечника

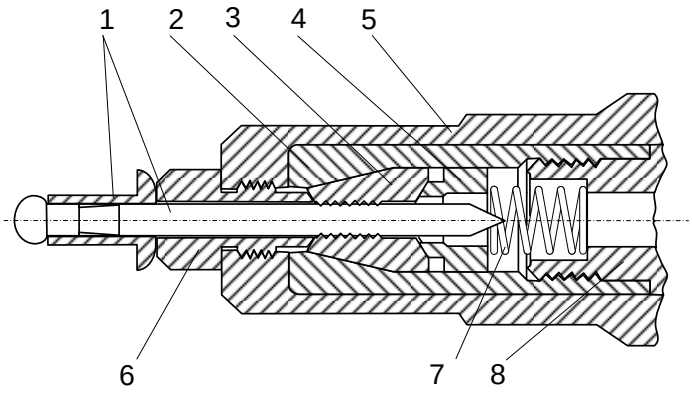


Рис. 2. Исполнительный механизм ручного заклепочника вытяжных заклепок:
1 – заклепка; *2* – направляющая; *3* – губка; *4* – клиновой замыкатель; *5* – корпус;
6 – втулка размерная; *7* – пружина; *8* – втулка регулировочная

Корпус *5* служит для размещения деталей исполнительного механизма, крепления рычажного механизма привода заклепочника и обеспечивает требуемую жесткость и прочность конструкции. Втулка размерная *6* служит для унификации заклепочника и дает возможность работать с заклепками различного диаметра (поставляется в комплекте с заклепочником). При необходимости смены одного диаметра заклепки на другой необходимо заменить втулку размерную из комплекта на втулку, соответствующую диаметру используемой заклепки. Пружина *7* и втулка регулировочная *8* служат для обеспечения требуемого усилия захвата заклепки (регулируется при сборке заклепочника или в процессе сервисного обслуживания инструмента).

Принцип работы исполнительного механизма ручного заклепочника (рис. 2).

В процессе заряжания заклепки *1* губки *3* отводятся частично вправо и раздвигаются для прохода сердечника. Заклепка устанавливается до упора внешним фланцем корпуса заклепки во втулку размерную *6*, как показано на рис. 2. При этом клиновый замыкатель перемещается вправо, сжимая пружину *7*. Это обеспечивает радиальное усилие первичного захвата губками стержня. Механизм готов к работе. Зубья губок охватывают сердечник заклепки практически по всей дуге окружности сердечника, обеспечивая максимальную площадь смятия сердечника. Это обусловлено конструкцией губок. Зубья губок представляют собой внутреннюю резьбу. Это, с одной стороны, обеспечивает технологичность процесса изготовления губок *3*, а с другой стороны, ограничивает угол при вершине зуба.

При перемещении направляющей *2* вправо, губки *3* вгрызаются в сердечник *1* и тянут его за собой. В результате головка сердечника втягивается в корпус заклепки, а при значительном усилии сердечник разрывается в опасном сечении заклепки.

При окончании силового воздействия человека, под действием силы упругости сжатой пружины *7* клиновый размыкатель втулки размерной *6* перемещает губки *3* влево и частично их разводит. Сердечник заклепки должен освобождаться и выпадать из заклепочника. Однако, если сердечник не успел освободиться от губок, то конусная часть направляющей вновь смыкает губки. Далее процесс клепания повторяется.

Бывают случаи, когда после окончания процесса заклепывания, оторванная часть сердечника заклепки заклинивается в исполнительном механизме, препятствуя процессу заряжания новой заклепки (рис. 3).

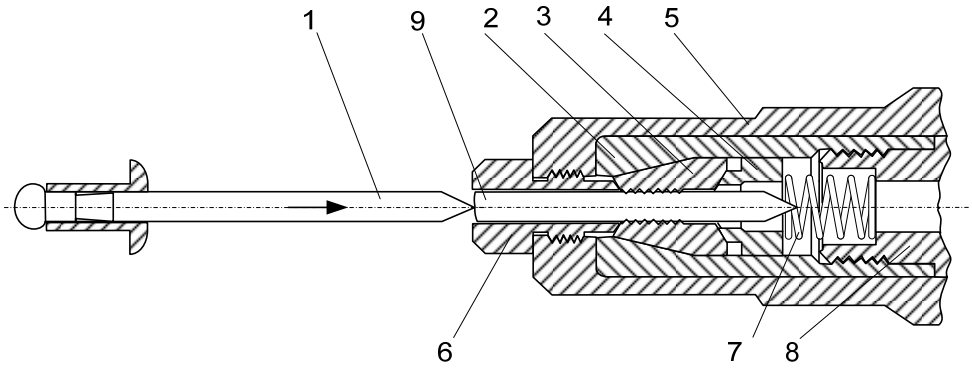


Рис. 3. Исполнительный механизм заклепочника в момент заклинивания:
1 – новая заклепка; *2* – направляющая; *3* – губка; *4* – клиновой замыкатель; *5* – корпус; *6* – втулка размерная; *7* – пружина; *8* – втулка регулировочная; *9* – оторванный сердечник

В этом случае зубья губок *3* достаточно глубоко вминаются в отработанный сердечник *9*. Это препятствует разведению губок. Попытка выдавить отработанный сердечник новой заклепкой *1* приводит к дополнительному вдавливанию зубьев губок в отработанный сердечник. Поэтому невозможно получить желаемый результат. Все это приводит к дополнительным затратам времени и труда.

С целью выработки практического решения данной задачи необходимо определить усилия, возникающие в процессе работы механизма.

Рассмотрим предельное равновесие сердечника заклепки в исполнительном механизме заклепочника (рис. 3, 4).

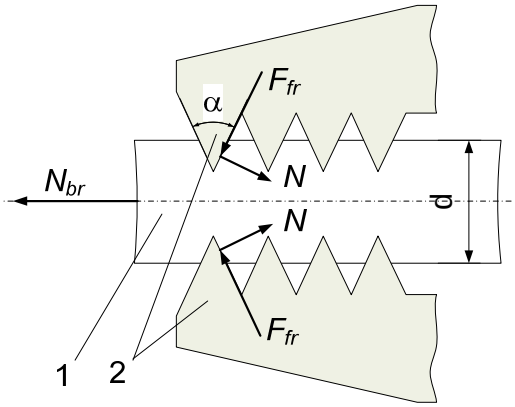


Рис. 4. Предельное равновесие стержня заклепки:
1 – сердечник заклепки; *2* – губки механизма

На сердечник заклепки в состоянии предельного равновесия действуют силы: предельная сила разрыва N_{br}, нормальные реакции N опор зубьев верхних и нижних губок, силы трения между боковыми поверхностями зубьев верхних и нижних губок и поверхностями вмятин сердечника заклепки F_{fr}. В свою очередь силы трения зубьев верхней и нижней губок равны

$$F_{fr} = N\nu, \tag{1}$$

где ν – коэффициент трения между материалом зубьев губок и материалом сердечника заклепки.

Таким образом, условие предельного равновесия [3, 4] сердечника заклепки в исполнительном механизме можно записать в следующем виде:

$$N_{br} - 2 \cdot \left(N \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - F_{fr} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) = 0 \,, \tag{2}$$

где α – угол между боковыми поверхностями зуба губки (при вершине зуба).

Из уравнения (2) с учетом (1) выразим предельную силу разрыва сердечника заклепки N_{br}

$$N_{br} = 2 \cdot N \cdot \left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \nu \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) . \tag{3}$$

С другой стороны, предельную силу разрыва сердечника заклепки можно найти из условия прочности на разрыв [4, 5], согласно которому

$$\sigma_t = \frac{N_{br}}{A_c} \le [\sigma_t] \,, \tag{4}$$

где σ_t – расчетное нормальное напряжение при растяжении сердечника, МПа; $[\sigma_t]$ – допускаемое нормальное напряжение при растяжении, МПа; N_{br} – предельная сила разрыва сердечника, Н; $A_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения сердечника заклепки, мм^2; d – диаметр сердечника заклепки, мм.

Из выражения (4)

$$N_{br} = [\sigma_t] \cdot A_c = [\sigma_t] \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \,. \tag{5}$$

Для получения зависимости силы разрыва от глубины смятия сердечника заклепки зубьями губок рассмотрим условие прочности на смятие [4, 5], согласно которому

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A_{cr}} \le [\sigma_{cr}] \,, \tag{6}$$

где σ_{cr} – расчетное нормальное напряжение при смятии сердечника, МПа; $[\sigma_{cr}]$ – допускаемое нормальное напряжение смятия, МПа; F_{cr} – предельная сила смятия, Н; A_{cr} – площадь смятия сердечника заклепки, мм.

Для определения площади смятия, изобразим увеличенный отпечаток зуба губки, который он оставляет в сердечнике заклепки после клепки деталей (рис. 5).

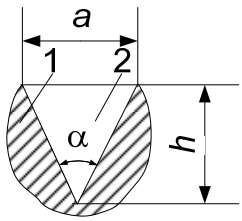


Рис. 5. Отпечаток в сердечнике заклепки:
1 – сердечник заклепки; *2* – вмятина

Из рисунка 5 с учетом рис. 3 площадь смятия сердечника зубьями губок запишется в виде

$$A_{cr} = alz\,, \tag{7}$$

где a – длина боковой поверхности вмятины, мм; l – длина дуги окружности, вмятины, мм; z – число зубьев губок, оставивших вмятины.

Длина боковой поверхности вмятины a выражается из рис. 5 через глубину h проникновения зуба губок в сердечник заклепки следующим образом:

$$a = h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right). \tag{8}$$

В результате формула (7) примет вид

$$A_{cr} = h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l \cdot z\,. \tag{9}$$

Из рисунка 3 предельная сила смятия определяется

$$F_{cr} = 2 \cdot N \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \nu \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right). \tag{10}$$

Из выражений (6) и (9) предельная сила смятия равна

$$F_{cr} = [\sigma_{cr}] \cdot A_{cr} = [\sigma_{cr}] \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l \cdot z\,. \tag{11}$$

Выразим глубину проникновения зубьев губок в сердечник заклепки

$$h = \frac{F_{cr}}{[\sigma_{cr}] \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l \cdot z}. \tag{12}$$

Или с учетом выражения (10) получим

$$h = \frac{2 \cdot N \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \nu \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{[\sigma_{cr}] \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l \cdot z}. \tag{13}$$

Из выражений (3) и (5) имеем нормальную силу

$$N = [\sigma_t] \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot \left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \nu \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}. \tag{14}$$

Выражение (13) с учетом выражения (14) примет вид

$$h = \frac{[\sigma_t]}{[\sigma_{cr}]} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \nu \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \nu \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot l \cdot z}. \quad (15)$$

Выражение (15) определяет глубину проникновения зубьев губок в сердечник заклепки в момент разрыва сердечника.

Для установления причины заклинивания сердечника заклепки в исполнительном механизме рассмотрим сердечник заклепки в момент выхода зубьев губок из сердечника. Под действием силы упругости пружины *7* клиновый замыкатель *4* давит на губки *3* механизма, стремясь конусом направляющей *2* (см. рис. 2, 3) сжать левую часть губок. При этом губки внешней стороной упираются в конический размыкатель втулки размерной *6*. Наличие конуса способствует разведению губок, освобождая сердечник. Однако встречаются случаи, когда освобождается лишь одна из губок, а вторая остается в сердечнике. При нажатии сердечником новой заклепки на отработанный сердечник происходит смещение отработанного сердечника вместе с губками. При этом освобождения отработанного сердечника от зубьев губок не происходит – наблюдается заклинивание зубьев губки в сердечнике без дополнительного их разведения в разные стороны. Осуществляя силовой анализ, видим: на губки заклепочника действуют нормальная сила N_2 и сила трения F_{fr2} от клинового замыкателя, нормальная сила N_1 и сила трения F_{fr1} от отработанного сердечника, и нормальная сила N_3 и сила трения F_{fr3} от конуса направляющей на внешнюю поверхность губок. Схема действующих сил при размыкании исполнительного механизма заклепочника показана на рис. 6.

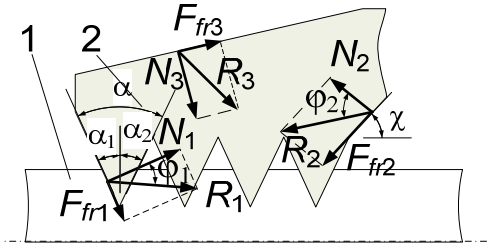


Рис. 6. Процесс размыкания исполнительного механизма заклепочника:
1 – сердечник заклепки; *2* – губки заклепочника

При попытке переместить отработанный сердечник *1* вправо вдоль оси симметрии исполнительного механизма, сердечник вместе с губками переместится вправо, тем самым, внешняя поверхность губок *3* и внутренняя поверхность направляющей *2* (см. рис. 3) соприкасаться не будут. Таким образом, нормальная сила N_3 и сила трения F_{fr3} будут равны нулю. Элементы механизма заклепочника в данном положении изображены на рис. 7.

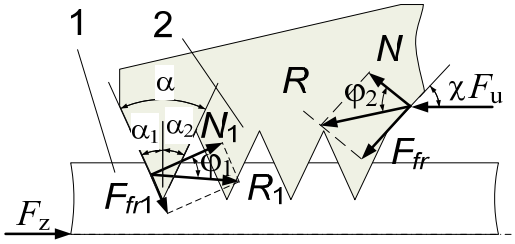


Рис. 7. Элементы механизма заклепочника при попытке извлечения оторванного сердечника:
1 – сердечник заклепки; *2* – губки заклепочника

Из рисунка 7 видно, что процесс размыкания губок заклепки начнется только тогда, когда проекция результирующей силы клинового замыкателя R на горизонталь будет меньше, чем сумма проекций на горизонталь результирующей силы сердечника R_1. В данном случае губки отойдут влево.

Условие заклинивания зубьев губок в отработанном сердечнике запишется в следующем виде:

$$\frac{N_1}{\cos(\varphi_1)} \cdot \cos(\varphi_1 - \alpha_1) > \frac{N}{\cos(\varphi_2)} \cdot \cos(\chi - \varphi_2), \tag{16}$$

где $\varphi_1 = a\tan(v_1)$ – угол трения зуба губок; $\varphi_2 = a\tan(v_2)$ – угол трения зуба замыкателя; v_1 и v_2 – коэффициенты трения между зубом губок и сердечником и губками и клиновым замыкателем, соответственно.

Если неравенство (16) выполняется, то возникает эффект самоторможения, т.е. происходит заклинивание в отработанном сердечнике зубьев губок механизма. Таким образом, для извлечения оторванного сердечника из механизма заклепочника необходимо, чтобы правая часть уравнения (16) была больше левой, т.е. необходимо, чтобы условие (16) не выполнялось.

Визуализация графического решения [6] неравенства (16) для различных возможных вариантов коэффициентов трения между зубьями губок и сердечником представлена на рис. 8.

Анализ графиков, представленных на рис. 8, показывает, что взаимное перемещение зубьев губок заклепочника и отработанного сердечника заклепки возможно, когда значения проекций на горизонталь результирующей силы сердечника R_1 [$R(\alpha_1)$ = 2; 3; 4; 5; 6] лежат справа от точки пересечения с графиком *1* [$R(\chi)$].

Заключение. Результаты вычислений показывают, что для наиболее распространенных значений коэффициентов трения угол наклона передней части зуба губки α_1 должен быть больше чем 32°. В этом случае эффекта заклинивания не происходит, т.е. будет возможен выход зуба из ножки заклепки и ее освобождение. Кроме того, с учетом износа и ошибок изготовления необходимо предусмотреть дополнительное увеличение угла α_1 на 10…15%. Поэтому, для обеспечения гарантированного извлечения оторванной ножки заклепки из губок исполнительного механизма угол наклона передней части зуба (со стороны захода ножки заклепки) должен быть не менее 39°.

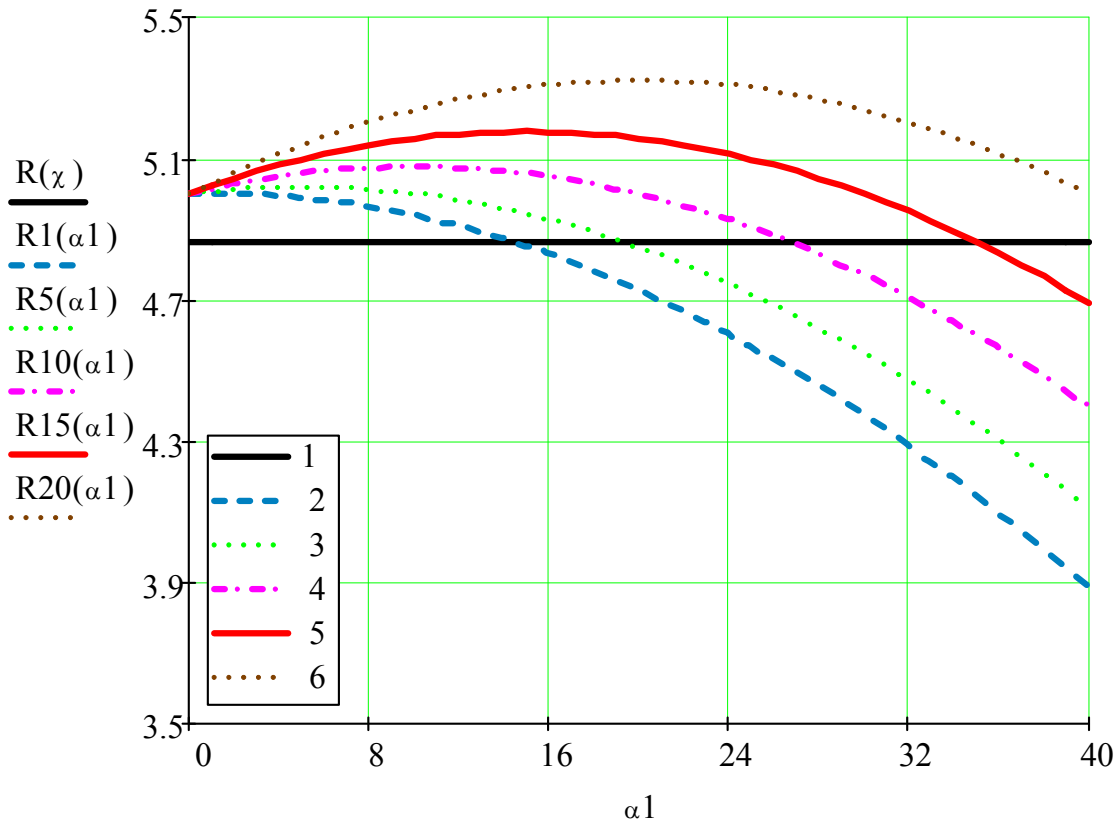


Рис. 8. Графическое решение неравенства (16):
1 – зависимость проекции размыкающего усилия *R* на горизонталь; *2*, *3*, *4*, *5*, *6* – зависимости проекций на горизонталь результирующей силы сердечника R_1 для различных коэффициентов трения ν_1 (число при *R* соответствует значению угла трения) и угла наклона зуба губки α_1

Список использованных источников

1. **Гашин, В. А.** К силовому анализу рычажно-пружинного механизма заклепочника / В. А. Гашин, В. Ю. Зайцев, В. В. Коновалов // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований : науч.-практ. конф. – Пенза : Пензенский государственный технологический университет, 2017. – С. 121 – 124.

2. **Гашин, В. А.** Совершенствование ручного заклепочника для изготовления и ремонта изделий машиностроения / В. А. Гашин, В. В. Коновалов, В. П. Терюшков // Инженерная наука в АПК. Проблемы. Решения. Перспективы. Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 65-летию инженерного факультета. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2017. – С. 117 – 119.

3. **Диевский, В. А.** Теоретическая механика : учебное пособие / В. А. Диевский. – СПб. : Лань, 2016. – 336 с.

4. **Арсланов, И. Г.** Расчеты в теоретической и прикладной механике / И. Г. Арсланов, М. Я. Хабибуллин. – Уфа : Уфимский ГНТУ, 2016. – 94 с.

5. **Сопротивление** материалов. / П. А. Павлов, Л. К. Паршин, Б. Е. Мельников, В. А. Шерстнев. – СПб. : Лань, 2017. – 556 с.

6. **Синельщиков, А. В.** Компьютерные технологии в инженерных расчетах (на базе системы MATHCAD) / А. В. Синельщиков. – Астрахань : Астраханский ГТУ. – 2013. – 128 с.

References

1. **Gashin, V. A.** To force analysis of the lever-spring mechanism of the riveter / Gashin V. A., Zaitsev V. Yu., Konovalov V. V. // Actual problems of modern science: the theory and practice of scientific research: Scientific-practical conference. – Penza : Penza State Technological University, 2017. – P. 121 – 124.

2. **Gashin, V. A.** Improving the manual riveter for the manufacture and repair of engineering products / Gashin V. A., Konovalov V. V., Teryushkov V. P. // Engineering science in agriculture. Problems. Solutions. Perspectives. All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 65th anniversary of the Faculty of Engineering. – Penza : Penza State Agrarian University, 2017. – P. 117 – 119.

3. **Dievsky, V. A.** Theoretical Mechanics : Tutorial. – SPb. : “Lan” publishing house, 2016. – 336 pp., Ill.

4. **Arslanov, I. G.** Calculations in theoretical and applied mechanics / I. G. Arslanov, M. J. Habibullin. – Ufa : Ufa State Technical University, 2016. – 94 p.

5. **Pavlov, P. A.** Strength of materials / Pavlov P. A., Parshin L. K., Melnikov B. E., Sherstnev V. A. – SPb. : “Lan” publishing house, 2017. – 556 p.

6. **Sinel’shchikov, A. V.** Computer technologies in engineering calculations (based on the MATHCAD system) / A. V. Sinel’shchikov. – Astrakhan : Astrakhan state technical University. – 2013. – 128 p.

УДК 621.45.01:004.942

Филинов Е. П.[1], Остапюк Я. А.[2]
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, Россия, г. Самара
[1](E-mail: filinov.evg@gmail.com),
[2](E-mail: oya92@mail.ru)

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Filinov E. P.[1], Ostapyuk Ya. A.[2]
Samara National Research University, Russia, Samara
[1](E-mail: filinov.evg@gmail.com),
[2](E-mail: oya92@mail.ru)

OPTIMIZATION OF WORKING PROCESS PARAMETERS AND DETERMINING THE ARCHITECTURE OF A SMALL-SCALE TURBOJET ENGINES AT CONCEPTUAL DESIGN STAGE

Аннотация. Представлено исследование влияния размерности турбореактивного двигателя на оптимальные значения параметров его рабочего процесса и выбор конструктивной схемы двигателя. Определены области оптимальных параметров рабочего процесса малоразмерных турбореактивных двигателей в диапазоне тяги от 0,1 кН до 100 кН. Выполнен обзор существующих математических моделей массы авиационных двигателей и сделаны выводы о необходимости уточнения коэффициентов, применительно к МГТД.

Ключевые слова: концептуальное проектирование, малоразмерный газотурбинный двигатель, параметры рабочего процесса, конструктивная схема, многокритериальная оптимизация.

Abstract. The paper presents the study of the effect of turbojet engine size on the optimal values of the parameters of its working process and the choice of the engine design. Areas of optimal parameters of the working process of small-sized turbojet engines in the range of traction from 0.1 kN to 100 kN were determined. Available mathematical models for mass of gas turbine engines estimation were examined. None of the open-source models are suitable for the small-scale engines, as they require tuning of the coefficients to provide the acceptable accuracy. The most effective mass models were identified with an account to the design phase of engine development.

Keywords: conceptual designing; mathematical model; small-scale gas turbine engine; working process parameters; architecture; multi-criteria optimization.

Введение. В зависимости от целевого назначения малоразмерного газотурбинного двигателя (ГТД) может сильно изменяться рациональное сочетание параметров рабочего процесса, что порождает большое разнообразие конструктивных схем этих двигателей. Проблеме проектирования малоразмерных газотурбинных двигателей в последнее время уделяется пристальное внимание, поскольку сфера их применения постоянно

расширяется. Однако вопросы оптимизации и выбора параметров рабочего процесса малоразмерных ГТД и их конструктивных схем исследованы не в полной мере. Поэтому данная работа, посвященная исследованию влияния размеров двигателя на его оптимальные параметры, является актуальной.

Целью данной работы является выработка рекомендаций для сокращения времени на формирование первоначального облика турбореактивного двигателя (ТРД). В ходе работы будут решены следующие задачи: анализ особенностей проектирования малоразмерных ГТД, уточнение математической модели массы, оптимизация параметров рабочего процесса линейки ТРД на основе методов численного моделирования в широком диапазоне тяг от 0,1 кН до 100 кН, сформулированы рекомендации по выбору наиболее рациональных параметров рабочего процесса и схемы каждого из двигателей линейки.

Работа проводилась в CAE-системе «АСТРА», которая была разработана в Самарском университете для решения задач оптимизации параметров и схем газотурбинных двигателей.

Особенностью разработанной авторами математической модели малоразмерного ГТД (МГТД) является учет снижения КПД лопаточных машин и относительного возрастания потерь в проточной части при уменьшении размера двигателя. В этой модели учтены поправки на КПД осевого, осецентробежного и центробежного компрессоров; на коэффициент полноты сгорания топлива и потери полного давления в камере сгорания; на КПД осевой и радиально-осевой турбин [1, 2]. В математической модели МГТД в CAE системе АСТРА использованы зависимости, основанные на обобщении экспериментальных данных, полученных в работах ведущих ученых данной области [3, 4].

В литературе отсутствует информация о специализированных моделях массы применительно к малоразмерным двигателям, поэтому проведен сравнительный анализ моделей оценки массы всех современных турбореактивных двухконтурных двигателей. Рассмотрены модели следующих авторов [5]: Torenbeek E. (Delft University of Technology, Nederland), Raymer D. P. (Conceptual Research Corporation, USA), Jenkinson (Loughborough University, UK), Svoboda C. (The University of Kansas, USA), Clavier J. (Cranfield University, UK and France), Guha A. (Indian Institute of Technology, India), Byerley A. R. (USAF Academy, USA), а также модель профессора В. С. Кузьмичева. Для определения точности представленных выше моделей создана база данных из 77 двухконтурных турбореактивных двигателей с датой выпуска не ранее 1992 года, с широким диапазоном параметров рабочего процесса. Подбирались двигатели как для гражданской, так и для военной авиации. Для каждого двигателя по каждой из вышеуказанных моделей был произведен расчет массы. Определялось отклонение полученной расчетной массы от реального значения и вычислялось среднеквадратичное отклонение для каждой модели массы ГТД. Была выбрана наиболее точная модель и проведено уточнение коэффициентов, применительно к малоразмерным ГТД.

Результаты. В ходе расчетов и построения локально-оптимальных областей с учетом функциональных ограничений были выбраны рациональные конструктивные схемы ТРД для следующих диапазонов тяг:

- От 0,1 до 0,7 кН – центробежный компрессор и центростремительная турбина;
- От 0,7 до 1,3 кН – центробежный компрессор и осевая турбина;

– От 1,3 до 7 кН – осецентробежный компрессор и осевая турбина;
– От 7 до 100 кН – осевой компрессор и осевая турбина.

С уменьшением размерности двигателя оптимальные значения параметров рабочего процесса ТРД снижаются, особенно заметно это по степени повышения давления $\pi^*_{к\Sigma}$, а сами значения $\pi^*_{к\Sigma opt}$ уменьшаются в 6 раз при уменьшении тяги двигателя от 100 до 0,1 кН. При этом оптимальные значения температуры газа перед турбиной $T^*_{г\,opt}$ уменьшаются незначительно, на 10…15%. При уменьшении тяги с 50 до 25 кН оптимальное значение $\pi^*_{к\Sigma}$ снижается на 5%, а при уменьшении тяги с 25 до 10 кН $\pi^*_{к\Sigma}$ – снижается на 15%. Отсюда можно сделать вывод, что влияние размерности на оптимальные параметры рабочего процесса становится особенно сильным при уменьшении тяги двигателя ниже значения 25 кН.

Заключение. В результате проведенных исследований выполнен анализ влияния размерности ГТД на эффективность осевых, осецентробежных и центробежных компрессоров, осевых и радиально-осевых турбин. На этой основе в математические модели термогазодинамического анализа ГТД введены поправки на КПД лопаточных машин, учитывающие влияние фактора размерности.

Выполнен обзор существующих математических моделей массы авиационных двигателей и сделаны выводы о необходимости уточнения коэффициентов, применительно к МГТД. В результате проведенного уточнения удалось добиться требуемой точности рассматриваемой модели для расчета массы малоразмерных ГТД.

Были сформулированы рекомендации по выбору рациональных параметров рабочего процесса и схем для линейки МТРД.

Применение результатов данной работы на этапе концептуального проектирования позволит существенно сократить временны́е затраты на проектирование, снизить риск невыполнения требований технического задания и повысить надежность проектирования, обеспечить обоснованный выбор конструктивных и режимных параметров двигателя, в том числе в условиях множественности показателей эффективности системы более высокого уровня и неопределенности исходных проектных данных. Результаты оптимизации на рассмотренном этапе проектирования используются в дальнейшем в качестве исходных данных для детального проектирования и конструирования элементов и систем двигателя.

Дальнейшее развитие рассмотренной темы возможно в направлении повышения точности моделирования показателей эффективности системы на основе моделирования полетного цикла летательного аппарата, для которого предназначается двигатель, а также использования моделей, учитывающих нестационарность процессов. Продолжение работы заключается в проведении подобного исследования для двухконтурных турбореактивных двигателей с учетом динамического моделирования полетного цикла для разных типов летательных аппаратов.

Список использованных источников

1. **Epstein, A. H.** Millimeter-scale, MEMS gas turbine engines / A. H. Epstein // Proc. of ASME Turbo Expo 2003. – 2003. – T. 4. – P. 669 – 696.

2. **Sehra, A. K.** Propulsion and power for 21st century aviation / A. K. Sehra, W. Jr. Whitlow // Progress in Aerospace Sciences. – 2004. – Т. 40, № 4-5. – P. 199 – 235.

3. **Ткаченко, А. Ю.** Разработка виртуального прототипа ГТД в CAE-системе «Астра» на этапе концептуального термогазодинамического проектирования [Текст] / А. Ю. Ткаченко, И. Н. Крупенич // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34), Ч. 2. – С. 333 – 242.

4. **Кузьмичев, В. С.** Сравнительный анализ автоматизированных систем проектирования газотурбинных двигателей [Текст] / В. С. Кузьмичев, Я. А. Остапюк, А. Ю. Ткаченко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 6(3). – С. 644 – 656.

5. **Lolis, P.** Development of a Preliminary Weight Estimation Method for Advanced Turbofan Engines : Ph. D. Thesis / P. Lolis. – Cranfield University, 2014. – 189 p.

References

1. **Epstein, A. H.** Millimeter-scale, MEMS gas turbine engines / A. H. Epstein // Proc. of ASME Turbo Expo 2003. – 2003. – T. 4. – P. 669 – 696.

2. **Sehra, A. K.** Propulsion and power for 21st century aviation / A. K. Sehra, W. Jr. Whitlow // Progress in Aerospace Sciences. – 2004. – T. 40, № 4-5. – P. 199 – 235.

3. **Tkachenko, A. Y.** Razrabotka virtual'nogo prototipa GTD v CAE-sisteme “Astra” na ehtape konceptual'nogo termogazodinamicheskogo proektirovaniya / A. Y. Tkachenko, I. N. Krupenich // Vestnik SGAU. – 2012. – № 3(34), V. 2. – P. 333 – 242.

4. **Kuz'michev, V. S.** Sravnitel'nyj analiz avtomatizirovannyh sistem proektirovaniya gazoturbinnyh dvigatelej / V. S. Kuz'michev, Y. A. Ostapyuk, A. Y. Tkachenko // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2015. – V. 17, № 6(3). – P. 644 – 656.

5. **Lolis, P.** Development of a Preliminary Weight Estimation Method for Advanced Turbofan Engines : Ph. D. Thesis / P. Lolis. – Cranfield University, 2014. – 189 p.

УДК 621.45.01:004.942

Филинов Е. П.[1], Остапюк Я. А.[2]
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, Россия, г. Самара
[1](E-mail: filinov.evg@gmail.com),
[2](E-mail: oya92@mail.ru)

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССЫ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВУХКОНТУРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Filinov E. P.[1], Ostapyuk Ya. A.[2]
Samara National Research University, Russia, Samara
[1](E-mail: filinov.evg@gmail.com),
[2](E-mail: oya92@mail.ru)

IMPROVED MODEL FOR SMALL-SCALE TURBOFAN ENGINE WEIGHT ESTIMATION

Аннотация. В статье рассматривается усовершенствованная применительно к малоразмерным газотурбинным двигателям математическая модель массы Кузьмичева (Самарский университет). Для уточнения коэффициентов корреляционно-регрессионной модели была сформирована база данных, включающая параметры 50 газотурбинных двигателей с тягой менее 50 кН. Для каждого из 50 двигателей по существующей и усовершенствованной моделям была определена масса ГТД и произведено сопоставление результатов с фактическим значением массы двигателя, что позволило определить среднеквадратичное отклонение и коэффициент корреляции модели. Уточнение коэффициентов модели проводилось путем минимизации значения среднеквадратичного отклонения.

Ключевые слова: математическое моделирование, корреляционно-регрессионные коэффициенты, малоразмерный ГТД, масса.

Abstract. The article describes Kuz'michev (Samara University) weight model updated for the small-scale turbofan engine. The database of 50 turbofans with thrust less than 50 kN was formed to refine coefficients of the regression model. The weight of each of considered engines was calculated with existed models and updated model and results were compared with actual engine weight. Standard deviations and correlation factors of models were determined. Refining of model coefficients was obtained as a result of minimization of a standard deviation value.

Keywords: mathematical model, empirical coefficients, small-scale gas turbine engine, weight.

Введение. На этапе концептуального проектирования, как правило, требуется оценка массы газотурбинного двигателя для расчета показателей его технико-экономической эффективности и оптимизации по ним его параметров. От результатов концептуального проектирования во многом зависит дальнейшая судьба проекта.

В настоящее время широкое распространение получили малоразмерные газотурбинные двигатели. Эти двигатели используются на легких самолетах, беспилотных летательных аппаратах и крылатых ракетах, их применяют в качестве вспомогательных силовых установок, а в будущем на их основе планируется создание распределенных силовых установок.

На начальном этапе разработки двигателя используются корреляционно-регрессионные модели массы, основанные на статистических данных созданных перспективных проектов ГТД. Точность моделей данного типа зависит от количества двигателей, участвующих в статистике, а также от достоверности используемой статистической информации.

Модель массы. В данной работе рассматривалась модель Кузьмичева, разработанная в Самарском университете на кафедре теории двигателей. Для повышения ее точности при проектировании малоразмерных ГТД проводилось уточнение ее статистических коэффициентов для данного типа двигателей. Модель массы зависит от пяти параметров газотурбинного двигателя:

$$M_{\text{дв}} = f(m,\ \pi_{\text{к}\Sigma},\ G_{\text{в}},\ T_{\Gamma}^{*},\ \pi_{\text{в}}).$$

В общем виде модель выглядит следующим образом:

$$M_{\text{дв}} = \left(M_{\text{I}} + M_{\text{II}} + M_{\text{ксм}} + M_{\text{фк}}\right)\cdot k_{\text{с}}\cdot k_{\text{рес}}.$$

Здесь: $M_{\text{I}} = B\cdot\left(G_{\text{в I пр.вен}}\right)^{k_1}\cdot\left[\left(\dfrac{\pi_{\text{к}\Sigma}}{\pi_{\text{в}}}\right)^{0,286} - 1\right]^{k_2}\cdot k_{T_{\text{г}}^{*}}$ – масса газогенератора внутреннего контура двигателя;

$G_{\text{в I пр.вен}} = G_{\text{в I}}\dfrac{1}{\pi_{\text{в}}}\sqrt{1+\left(\pi_{\text{в}}^{0,286}-1\right)\dfrac{1}{\eta_{\text{в}}}}$ – расход воздуха на взлетном режиме через внутренний контур, приведенный по параметрам за вентилятором;

$M_{\text{II}} = 2,865\, G_{\text{в}\sum\text{взл}}^{0,903}\, m^{0,104}\, \pi_{\text{в}}^{1,193}$ – масса турбовентилятора и обечайки наружного контура.

Значения коэффициентов B, k_1, k_2 определялись на основе статистических данных по ГТД и сведены в табл. 1. В дальнейшем данные коэффициенты были уточнены для малоразмерных ТРДД на основе собранных статистических данных.

1. Коэффициенты для расчета массы авиационных ГТД

Тип ГТД	$0,5 < G_{\text{в I пр вен}} < 5$ кг/с			$5 < G_{\text{в I пр вен}} < 50$ кг/с			$G_{\text{в I пр вен}} > 50$ кг/с		
	B	k_1	k_2	B	k_1	k_2	B	k_1	k_2
ТРД, ТРДД $\pi_{\text{к}\sum\text{взл}} > 5$	20,9	0,8	0,5	15,2	1	0,5	6,96	1,2	0,5
ТРД, ТРДД $\pi_{\text{к}\sum\text{взл}} < 5$	16,0	0,8	0	11,6	1	0	5,32	1,2	0

Уточнение статистических коэффициентов. Большое влияние на точность расчета массы рассматриваемой модели оказывает размерность газотурбинного двигателя: для двигателей малой размерности наблюдается рост среднеквадратичного отклонения. Это связано в первую очередь с недостаточным количеством информации о параметрах малоразмерных газотурбинных двигателей в свободной печати. В связи с этим для уточнения статистических коэффициентов модели массы была собрана база данных, состоящая из 151 газотурбинного двигателя с тягой менее 50 кН.

Поиск исходных данных производился на основе анализа работ [1 – 4]. В результате поиска, из 151 найденного двигателя все требуемые параметры для расчета массы по рассматриваемой модели имели 50 двигателей. По этим двигателям и производилась корректировка статистических коэффициентов.

Точность модели характеризуется величиной отклонения выхода модели от реального значения моделированных переменных. Считается, что статистические модели имеют удовлетворительную точность, если среднеквадратическое отклонение составляет не более 10…15%. Для модели массы была проведена оценка ее точности по четырем основным показателям, которые характеризуют точность прогнозирования: среднеквадратическое отклонение, средняя относительная ошибка аппроксимации, коэффициент корреляции и критерий Фишера. Данные показатели позволяют выбрать наиболее точную модель при их сравнительном анализе. И могут быть использованы при выборе модели, по которой будет производиться расчет массы. Для собранной базы данных среднеквадратическое отклонение модели составило 16% (средняя ошибка аппроксимации – 13%), коэффициент корреляции – 0,905. Значение критерия Фишера: 106. Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 составляет 3,2. Так как $F_{расч} > F_{табл}$ (106 > 3,2), модель признается статистически значимой и надежной. Анализ точности модели приводит к необходимости оптимизации ее статистических коэффициентов, так как относительное среднеквадратическое отклонение модели не удовлетворяет требуемому значению.

На основе собранных данных было произведено уточнение статистических коэффициентов модели массы для двух групп двигателей. Уточнение производилось путем нахождения минимального значения относительного среднеквадратического отклонения модели. Новые значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Относительное среднеквадратическое отклонение модели снизилось с 16 до 13,5% (средняя ошибка аппроксимации – 10,4%), что удовлетворяет требуемой [5]. После уточнения статистических коэффициентов коэффициент корреляции составил – 0,959. Значение критерия Фишера: 270. Критическое значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 составляет. $F_{расч} > F_{табл}$ (270 > 3,2), поэтому статистическая модель признается статистически значимой и надежной.

2. Уточненные коэффициенты для расчета массы малоразмерных авиационных ГТД

Тип ГТД	$0{,}5 < G_{в\,I\,пр\,вен} < 10$ кг/с			$10 < G_{в\,I\,пр\,вен} < 20$ кг/с		
	B	k_1	k_2	B	k_1	k_2
ТРД, ТРДД $\pi_{к\sum\,взл} > 5$	15,49	0,87	0,15	6,81	1,19	0,16

Заключение. В результате проведенного исследования удалось добиться требуемой точности рассматриваемой модели для расчета массы малоразмерных ГТД. Для собранной базы малоразмерных газотурбинных двигателей модель Кузьмичева до уточнения, имела относительное среднеквадратичное отклонение 16%. После уточнения статистических коэффициентов для группы двигателей с приведенным расходом воздуха через вентилятор от 10 до 20 кг/с, значение среднеквадратического отклонения было снижено до 11,8%. Для группы двигателей с приведенным расходом воздуха через вентилятор менее 10 кг/с среднеквадратическое отклонение было снижено до 13,5%.

В дальнейшем планируется создать программу на основе нейронных сетей для автоматизации процесса уточнения коэффициентов. Это позволит производить непрерывное уточнение статистических коэффициентов модели в условиях постоянного обновления статистических данных.

Список использованных источников

1. **Иностранные** авиационные двигатели [Текст] : справочник / под ред. Л. И. Соркина. – М. : ЦИАМ, 1992. – 286 с.

2. **Roux, E.** Turbofan and Turbojet Engines: Database Handbook / E. Roux. – Elodie Roux, 2007. – 595 p.

3. **Svoboda, C.** Turbofan Engine Database as a Preliminary Design Tool / C. Svoboda // Aircraft Design. – 2000. – № 3. – P. 17 – 31.

4. **Mattingly, J. D.** Aircraft Engine Design / J. D. Mattingly, W. H. Heiser, D. T. Pratt. – Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. – 679 p.

5. **Политова, И. Д.** Дисперсионный и корреляционный анализ в эконометрике [Текст]/ И. Д. Политова. – М. : Дело, 1998. – 248 с.

References

1. **Inostrannye** aviacionnye dvigateli: spravochnik / pod red. L. I. Sorkina. – M. : CIAM, 1992. – 286 p.

2. **Roux, E.** Turbofan and Turbojet Engines: Database Handbook / E. Roux. – Elodie Roux, 2007. – 595 p.

3. **Svoboda, C.** Turbofan Engine Database as a Preliminary Design Tool / C. Svoboda // Aircraft Design. – 2000. – № 3. – P. 17 – 31.

4. **Mattingly, J. D.** Aircraft Engine Design / J. D. Mattingly, W. H. Heiser, D. T. Pratt. – Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. – 679 p.

5. **Politova, I. D.** Dispersionnyj i korrelyacionnyj analiz v ehkonometrike / I. D. Politova. – M. : Delo, 1998. – 248 p.

УДК 004

Долбин Р. А., Минин Ю. В., Нурутдинов Г. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 8(920)4849397, e-mail: RADolbin@yandex.ru)

ВЫЯВЛЕНИЕ КРИТИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Dolbin R. A., Minin Yu. V., Nurutdinov G. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 8(920)4849397, e-mail: RADolbin@ yandex.ru)

IDENTIFYING THE CRITICAL ELEMENTS OF A NETWORK INFORMATION SYSTEM

Аннотация. В данной работе рассматривается вопрос оценки эффективности функционирования сетевой информационной системы при ограниченной надежности элементов. Представлена математическая модель для оценки эффективности функционирования сетевой информационной системы.

Ключевые слова: информационная система, сетевая информационная система, эффективность функционирования, надежность.

Abstract. The issue of evaluating the performance of a network information system is considered with limited reliability of elements. A mathematical model for evaluating the efficiency of the functioning of a network information system is proposed.

Keywords: information system, network information system, efficiency of functioning, reliability.

Введение. Современное общество характеризуется широким использованием и непрерывным совершенствованием информационных систем (ИС), которые в большинстве своем имеют развитую структуру и обеспечивают эффективное принятие решений в различных сферах деятельности. Совершенствование ИС приводит к усложнению их топологической структуры.

Как правило, ИС включает в себя множество узлов, которые связаны между собой определенным образом. Такая конструкция способна подвергаться негативным воздействиям, которые наносят системе повреждения любой природы теми или иными внешними средствами или факторами.

Одним из важнейших факторов, определяющих качество функционирования ИС, является способность выполнять свои основные функции, несмотря на полученные повреждения. Потребность в оценках эффективности функционирования современных информационных систем существует на всех стадиях жизненного цикла этих сложных и многофункциональных объектов.

Проблема теоретического описания и анализа процессов функционирования при различных вариантах структуры ИС приобретает особую актуальность в условиях быстрой смены технологий, когда постоянное стремление к улучшению эксплуатационных характеристик системы неизменно приводит к появлению аппаратных средств и программного обеспечения с отсутствовавшими ранее и потому труднопредсказуе-

мыми свойствами. В частности, современный этап развития технологий построения ИС характеризуется переходом к широкому внедрению корпоративных систем обработки информации с распределенной архитектурой, т.е. сетевых информационных систем (СИС).

Нередко в процессе эксплуатации СИС ее характеристики постепенно перестают удовлетворять пользователей по быстродействию, надежности, эксплуатационным затратам и другим показателям. Причина обычно связана с ростом объема данных, что повышает время обработки запросов, посылаемых к серверам компьютерной сети, и увеличивает вероятность негативных последствий отказов. Следовательно, в процессе длительной эксплуатации СИС параметры ее эффективности должны всегда поддерживаться на требуемом уровне.

К показателям эффективности функционирования относят пропускную способность, время реакции, показатели качества обслуживания, оговоренные в соглашении об уровне обслуживания, и др.

Описание исследуемой системы. Рассмотрим СИС со структурой «звезда–дерево» (рис. 1), которая с помощью каналов сети передачи данных объединяет набор структур, реализованных в виде локальных вычислительных сетей (ЛВС) с центральным узлом СИС. В составе *i*-й ЛВС ($i = \overline{1, n}$) имеются C_i рабочих станций, которые являются конечными узлами СИС и узлы концентрации информационных потоков (УКИП) в СИС имеющие сервер локальной базы данных.

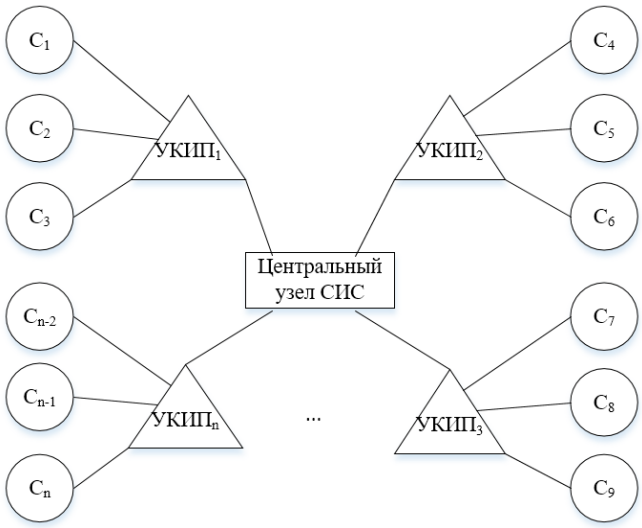


Рис. 1. Структура СИС

Для всех пользователей СИС общее пространство данных состоит из *M* фрагментов (таблиц, файлов), которые определенным образом размещены в разных УКИП. Чтобы дать полное описание конкретного варианта размещения отдельных фрагментов данных, введем матрицу $X = \left\| x_{ij};\ i = \overline{1, n};\ j = \overline{1, M} \right\|$, элементы которой принимают следующие значения:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й фрагмент присутствует в } i\text{-й ЛБД;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В наиболее общей ситуации для отдельных фрагментов данных предусматриваются копии, т.е. одни и те же данные хранятся в нескольких УКИП, что обеспечивает снижение объема данных, передаваемых между разными ЛВС, а также повышение доступности данных при выходе из строя элементов системы. Следовательно, при любом $j = \overline{1, M}$ имеет место неравенство

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} > 1.$$

Запрос к j-му фрагменту данных ($j = \overline{1, M}$) от одного из пользователей, относящихся к i-й ЛВС ($i = \overline{1, n}$), обрабатывается локальным сервером при условии, что этот сервер находится в работоспособном состоянии, и УКИП содержит требуемый фрагмент. В противном случае для отправки запроса равновероятно выбирается другой работоспособный УКИП, где имеется j-й фрагмент данных. Предполагается, что от любого пользователя СИС запросы к j-му фрагменту данных (запросы к j-го типа) поступают с интенсивностью λ_j.

Модель оценки эффективности функционирования сетевой информационной системы. Пусть в i-й ЛВС ($i = \overline{1, n}$) сервер в УКИП имеет коэффициент простоя $K_{\text{пр}}^{(i)}$. Это означает, что в произвольный момент времени с вероятностью $K_{\text{пр}}^{(i)}$ все фрагменты данных оказываются не доступными для обработки поступающих запросов. Дополнительно будем предполагать, что все значения $K_{\text{пр}}^{(i)}$ при $i = \overline{1, n}$ являются достаточно малыми величинами. Тогда одновременный отказ двух и более серверов можно приближенно считать невозможным событием.

Согласно этому предположению получаем множество технических состояний рассматриваемой СИС: $S = \{S_k;\ k = \overline{0, n}\}$, где состояние S_k при $k = \overline{1, n}$ возникает в результате отказа k-го сервера в УКИП и имеет вероятность $P_k = K_{\text{пр}}^{(i)}$, а в состоянии S_0, которое наблюдается с вероятностью

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^{n} K_{\text{пр}}^{(i)},$$

все серверы УКИП работоспособны.

В зависимости от конкретного технического состояния изменяется общая совокупность доступных файлов данных (с учетом имеющихся копий). Чтобы принять во внимание это обстоятельство, определим множество матриц $\{Z_k;\ k = \overline{0, n}\}$, среди которых $Z_0 = X$, а для получения матрицы $Z_k = \left\| z_{ij}^{(k)};\ i = \overline{1, n};\ j = \overline{1, M} \right\|$ необходимо в матрице X обнулить k-ю строку, т.е.

$$x_{ij}^{(k)} = \begin{cases} x_{ij}, \text{ если } i \neq k; \\ 0, \text{ если } i = k. \end{cases}$$

Теперь по отношению к j-му фрагменту данных число доступных экземпляров, которые могут участвовать в обслуживании поступающих запросов, легко найти для каждого состояния из множества S:

$$d_{kj} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} x_{ij} = \sum_{i=1}^{n} z_{ij}^{(k)}.$$

Количественную оценку эффективности функционирования рассматриваемой СИС будем производить с помощью показателей, характеризующих скорость обработки поступившего запроса (например, среднее время, в течение которого пользователь ожидает ответ на свой запрос). В этом случае можно воспользоваться теорией очередей и каждый ЛВС представить в виде разомкнутой сети массового обслуживания (СеМО), состоящей из трех обслуживающих устройств [1]: сервер в УКИП и два канала ПД (входящий и исходящий).

Запросы, поступающие от C_i рабочих станций *i*-й ЛВС, относятся к категории внутренних, если они направлены к фрагментам данных, которые присутствуют в УКИП рассматриваемой ЛВС. Следовательно, в состоянии S_k собственная нагрузка на *i*-й сервер формируется потоком заявок с интенсивностью

$$\lambda_{ki}^{\text{сб}} = C_i \sum_{j=1}^{M} z_{ij}^{(k)} \lambda_j.$$

Данные в ответ на запросы к фрагментам данных, которые отсутствуют в УКИП *i*-й ЛВС, поступают по входящему каналу этой ЛВС. Интенсивность соответствующего потока сообщений равна

$$\lambda_{ki}^{\text{вх}} = C_i \sum_{j=1}^{M} (1 - z_{ij}^{(k)}) \lambda_j.$$

По исходящему каналу *i*-й ЛВС с интенсивностью $\lambda_{ki}^{\text{исх}}$ передаются сообщения в ответ на запросы, которые возникают в других ЛВС, причем для запросов *j*-го типа должно выполняться условие $z_{ij}^{(k)}(1 - z_{lj}^{(k)}) = 1$, где $l \neq i$. От пользователей *l*-й ЛВС, доля таких запросов, которые направляются для обслуживания в *i*-й ЛВС, равна $1/d_{kj}$, поэтому

$$\lambda_{ki}^{\text{исх}} = \left\{ \sum_{j=1}^{M} \frac{z_{ij}^{(k)} \lambda_j}{d_{kj}} \sum_{l=1}^{n} (1 - z_{ij}^{(k)}) C_l \right\}.$$

Для сервера *i*-й ЛВС, который участвует в обработке всех перечисленных запросов, интенсивность общего потока заявок, обслуживаемых в состоянии S_k, равна

$$\lambda_{ki}^{\text{сер}} = \lambda_{ki}^{\text{сб}} + \lambda_{ki}^{\text{вх}} + \lambda_{ki}^{\text{исх}} = \sum_{j=1}^{M} \left\{ C_j + \frac{z_{ij}^{(k)}}{d_{kj}} \sum_{l=1}^{n} (1 - z_{lj}^{(k)} C_l \right\} \lambda_j.$$

Запрос *j*-го типа, возникающий в *i*-й ЛВС, с вероятностью $z_{ij}^{(k)}$ проходит обработку как внутренний запрос, а с вероятностью $(1 - z_{lj}^{(k)})^{z_{lj}^{(k)}} / d_{kj}$ пересылается в *l*-ю ЛВС $(l = \overline{1, n};\ l \neq i)$. Во втором случае имеет место многоэтапный процесс обработки запроса

с последовательным использованием следующих элементов системы: сервер и исходящий канал l-й ЛВС, входящий канал и сервер i-й ЛВС. Введем средние значения продолжительности этих этапов $t_{kl}^{\text{сер}}$, $t_{kl}^{\text{исх}}$, $t_{ki}^{\text{вх}}$, $t_{ki}^{\text{сер}}$, где каждый из них включает в себя ожидание в очереди и непосредственное обслуживание. В результате, для состояния S_k можем получить среднее время обработки рассматриваемого запроса как математическое ожидание интервала времени от момента посылки запроса до получения ответа на него:

$$t_{ij}^{(k)} = \begin{cases} t_{kl}^{\text{сер}}, \ \ \textit{если } z_{ij}^{(k)} = 1; \\ t_{ki}^{\text{сер}} + t_{ki}^{\text{вх}} + \dfrac{1}{d_{kj}} \sum\limits_{l=1}^{n} (t_{kl}^{\text{сер}} + t_{kl}^{\text{исх}}) z_{lj}^{(k)}, \ \ \textit{если } z_{lj}^{(k)} = 0. \end{cases}$$

Чтобы при нагрузке, соответствующей состоянию S_k, определить величины $t_{ki}^{\text{сер}}, t_{ki}^{\text{исх}}, t_{ki}^{\text{вх}}$, которые характеризуют производительность отдельных компонентов i-й ЛВС (сервер, входящий и исходящий каналы), необходимо подобрать наиболее адекватные модели для этих элементов СеМО. Самым простым вариантом такой модели является однолинейная СМО с неограниченной очередью. В частности, если длительность обработки любого запроса сервером i-й ЛВС имеет экспоненциальное распределение с параметром $\mu_i^{\text{сер}}$, то при обслуживании запросов в порядке поступления

$$t_{ki}^{\text{сер}} = \frac{1}{\mu_i^{\text{сер}} - \Lambda_{ki}^{\text{сер}}}.$$

Используя теоретические результаты, представленные в [2], можно оценить степень ухудшения функционирования рассматриваемой СИС из-за отказов, возникающих в каналах ПД. Проводится исследование одноканальной СМО с бесконечным буфером на входе при условии, что поступающие сообщения образуют простейший поток с интенсивностью λ и имеют случайную длину, которая распределена по экспоненциальному закону с параметром μ. В дополнение к этому принимаются во внимание показатели ограниченной надежности канала: коэффициент готовности $k_Г$ и средняя длительность простоя $\tau_П$. Для определения среднего времени, в течение которого сообщение будет доставлено в пункт назначения, получено следующее выражение:

$$t_Д = \frac{1}{\mu_Э - \lambda}(1 + \mu_Э k_П \tau_П),$$

где $\mu_Э = k_Г \mu$; $k_П = 1 - k_Г$. При известных значениях соответствующих параметров, которые характеризуют каналы ПД между ЛВС исследуемой СИС, с помощью этого выражения можно вычислить $t_{ki}^{\text{вх}}$ и $t_{ki}^{\text{исх}}$.

Для интервалов времени, на которых СИС находится в фиксированном техническом состоянии S_k, оценкой общего уровня эффективности функционирования системы будет среднее время обработки произвольного запроса от любого пользователя, имеющего доступ к системе:

$$\overline{t_k} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{M}\lambda_j t_{ij}^{(k)}\right)C_i}{\lambda_{\text{сум}}\sum_{i=1}^{n}C_i},$$

где $\lambda_{\text{сум}} = \sum_{j=1}^{M}\lambda_j$ – суммарная интенсивность запросов от одного пользователя. Наконец, усреднение по всем состояниям из множества S дает среднее время обработки для любого запроса с учетом влияния ограниченной надежности элементов системы:

$$t_H = \sum_{k=0}^{n} P_k \overline{t_k}.$$

Пример расчетов с использованием описанной методики содержится в работе [3]. Эти расчеты демонстрируют возможность выявления элементов системы, наиболее критичных для сохранения требуемого уровня эффективности функционирования в реальных условиях эксплуатации, когда эпизодически возникают аварийные ситуации.

Список использованных источников

1. **Треногин, Н. Г.** Методика размещения данных при проектировании биллинговых систем / Н. Г. Треногин, В. И. Терехов // Электросвязь. – 2002. – № 3. – С. 32 – 34.

2. **Захаров, Г. П.** Методы исследования сетей передачи данных / Г. П. Захаров – М. : Радио и связь, 1982. – 208 с.

3. **Мейкшан, В. И.** Анализ качества функционирования распределенной информационной системы при ограниченной надежности ее элементов / В. И. Мейкшан, Л. И. Мейкшан // Труды ИВМиМГ СО РАН. – 2005. – Вып. 5. – С. 79 – 88.

References

1. **Trenogin, N. G.** The method of data placement in the design of billing systems / N. G. Trenogin, V. I. Terekhov // Electrosvyaz. – 2002. – № 3. – P. 32 – 34.

2. **Zakharov, G. P.** Methods for the study of data transmission networks / G. P. Zakharov. – M. : Radio and Communication, 1982. – 208 p.

3. **Meikshan, V. I.** Analysis of the quality of functioning of a distributed information system with limited reliability of its elements / V. I. Meikshan, L. I. Meikshan // Proceedings of the IVMMG SB RAS. – 2005. – Release. 5. – P. 79 – 88.

УДК 616.13.002.2-007.6-031.38.-073

Егорова Е. А.[1], Лисицын А. С.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (953)1228235, e-mail: katrinlexus2@ mail.ru),
[2](Тел. (915)8722102, e-mail: lisitsyn.andryushka@mail.ru)

СПОСОБ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕЗОВ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И ОДНОФОТОННОЙ ЭМИССИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ЛЕГКИХ

Egorova E. A.[1], Lisitsyn A. S.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (953)1228235, e-mail: katrinlexus2@ mail.ru),
[2](Tel. (915)8722102, e-mail: lisitsyn.andryushka@mail.ru)

METHOD OF COMBINING IMAGES OF MULTISPIRAL COMPUTER TOMOGRAPHIC SIZES AND ONE-PHOTON EMISSIONAL COMPUTER TOMOGRAPHY OF LUNGS

Аннотация. Способ относится к медицине, а именно, к рентгенорадиологии. Перед проведением однофотонной эмиссионной компьютерной томографии на область средней трети ключицы устанавливают радиоактивную метку. Выполняют мультиспиральную компьютерную томографию. Затем совмещают в корональной и сагиттальной проекциях радиоактивную метку и срез средней трети ключицы, полученный на компьютерном томографе. Из полученных сцинциграмм и томограмм строят трехмерное изображение легких. Способ обеспечивает получение совмещенных изображений срезов МСКТ и ОФЭКТ на стандартном оборудовании, повышает точность диагностики заболеваний легких.

Ключевые слова: срез мультиспиральной компьютерной томографии, срез однофотонной эмиссионной компьютерной томографии легких, совмещение компьютерно-томографических сканов.

Abstract. The method refers to medicine, namely to x-ray radiology. Before conducting single-photon emission computed tomography, a radioactive label is placed on the middle third of the clavicle. Perform multispiral computed tomography. Then a radioactive label and a cut of the middle third of the clavicle obtained on a computer tomograph are performed in the coronal and sagittal projection. From the number of scintigrams and tomograms, a three-dimensional image of the lungs is constructed. The method of providing a combined image of MSCT and SPECT slices on standard equipment improves the accuracy of lung diagnosis.

Keywords: a multispiral computed tomography slice, a single-photon emission computed tomography slice of the lungs, a combination of computed tomography scans.

Способ относится к медицине, а именно, к рентгенорадиологии, и может быть использовано для получения совмещенных изображений срезов мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), применяемых в диагностике заболеваний легких.

Сущность способа заключается в достижении указанного технического результата в способе совмещения изображений срезов мультиспиральной компьютерной томографии и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии легких, согласно которому перед проведением однофотонной эмиссионной компьютерной томографии на область средней трети ключицы устанавливают радиоактивную метку, выполняют мультиспиральную компьютерную томографию и затем совмещают в корональной и сагиттальной проекциях радиоактивную метку и срез средней трети ключицы, полученный на компьютерном томографе.

Для совмещения целесообразно полученные матрицы срезов привести к одинаковой размерности и из полученных сцинциграмм и томограмм построить и совместить трехмерное изображение легких.

Для синхронизации изображения ОФЭКТ и МСКТ авторами предложено на область средней трети ключицы устанавливать радиоактивную метку. Эта область оптимально позволяет рассчитать количество томографических срезов с установленной толщиной (0,5 см) и соответствует топической локализации верхушек легких.

Для того чтобы наиболее точно совместить полученные матрицы срезов при проведении двух разных методов (рентгенологического – МСКТ и радиологического – ОФЭКТ), их необходимо привести к одинаковой размерности.

Двумерные матрицы срезов, получаемые в корональной и сагиттальной проекциях, совмещают друг с другом относительно расположения радиоактивной метки на срезе, получаемом на гамма-камере, и полученном на компьютерном томографе срезе средней трети ключицы. При совмещении корональных и сагиттальных срезов аксиальные срезы также совмещаются. Уровень полученных срезов определяют совмещением радиоактивной метки на ОФЭКТ и средней трети ключицы на МСКТ. В дальнейшем из полученных сцинтиграмм на гамма-камере строят трехмерное изображение легких, и из томограмм, полученных на компьютерном томографе, также строят трехмерное изображения легких. Полученные трехмерные изображения легких на ОФЭКТ и на МСКТ совмещают.

Исследование выполняют в два этапа: один из них на гамма-камере, другой – на мультиспиральном компьютерном томографе. Принципиальной разницы в последовательности выполнения этих этапов нет. Это является важным преимуществом предлагаемого способа, ибо иногда оказывается достаточным для целей диагностики одного исследования и можно отказаться от другого, что способствует снижению экономических затрат, лучевой нагрузки на пациента, а также рациональному использованию оборудования.

Способ осуществляют, например, следующим образом.

На этапе 1 больному выполняют ОФЭКТ на двух детекторной гамма-камере Philips Forte 2005. Внутривенно вводят радиофармацевтический препарат (РФП), представляющий собой крупные белковые частицы, меченные гамма-излучателем и вызывающие временную эмболизацию артериоло-капиллярного русла легких в дозе 1,0…1,5 мБк на 1 кг веса тела исследуемого. Для последующей синхронизации изображения ОФЭКТ и МСКТ на область средней трети ключицы устанавливают радиоактивную метку 1, показанную на рис. 1.

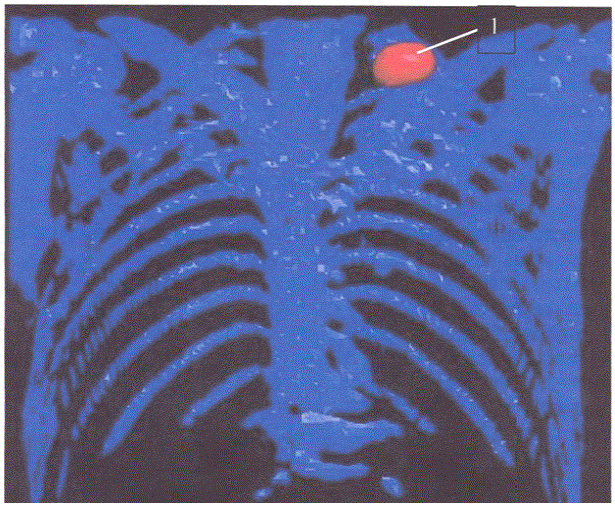


Рис. 1. Изображение радиоактивной метки, расположенной на средней трети ключицы в совмещенном трехмерном изображении легких

Исследование начинают непосредственно после инъекции РФП. Пациента обследуют в положении лежа в режиме TotalBody в течение 10…12 минут по программе Lung Spect, в положении детекторов 180 градусов, орбита эллиптическая, 32 азимута, 40 с на угол. Обработка исследования возможна с произвольным размещением слоев от 0,5 до 2,0 см, используют высокочастотный фильтр Furye трансформации по методу Henning или Batterword. Двухдетекторное сканирование позволяет получить послойное полипозиционное изображение легких на продольных, боковых и поперечных срезах с последующей реконструкцией трехмерного изображения.

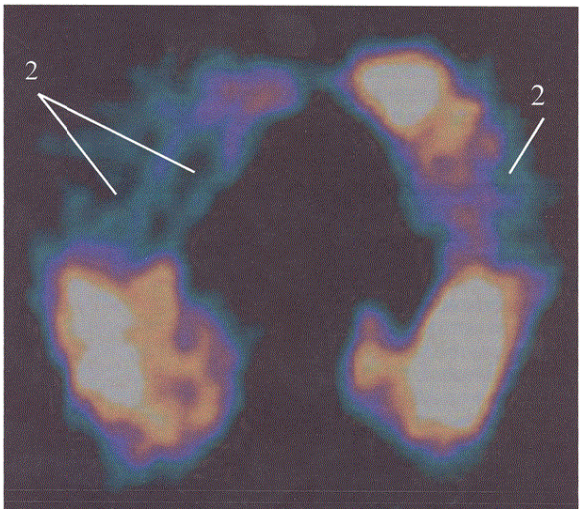


Рис. 2. Аксиальный срез легких на однофотонном компьютерном томографе, где видны участки редуцированного кровотока

На этапе 2 выполняют МСКТ на компьютерном четырехсрезовом томографе «Asteion», фирмы «Toshiba». Пациента исследуют в положении лежа с руками за головой, без наклона гентри, в краниокаудальном направлении, с задержкой дыхания на спокойном вдохе. Напряжение составляет 120 кВТ, экспозиция одного среза 90 мАс, шаг спирали (pitch) 3,5, толщина среза 0,5 см, инкремент реконструкции 3 мм.

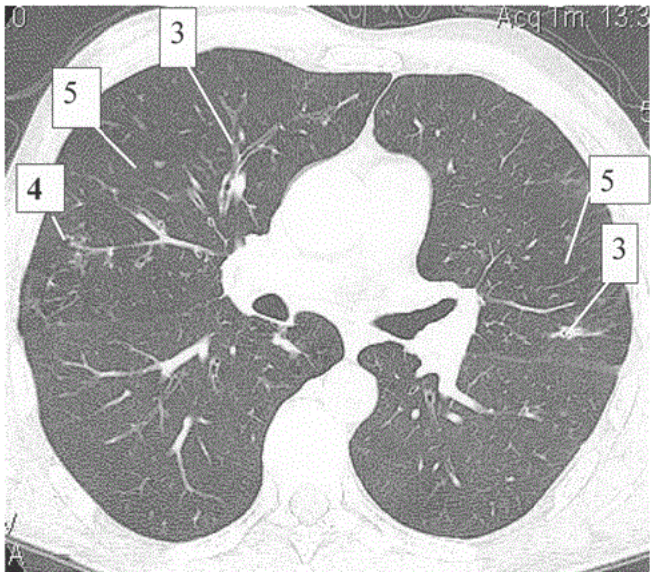


Рис. 3. Аксиальный срез легких на компьютерном тогмографе, где видны участки наибольшего поражения легочной паренхимы

На этапе 3 выполняют совмещение компьютерно-томографических сканов МСКТ и ОФЭКТ на рабочей станции гамма-камеры. Для наиболее точного совмещения полученные матрицы срезов приводят к одинаковой размерности 256×256, обусловленной программным обеспечением гамма-камеры. Двухмерные матрицы срезов, полученные в корональной и сагиттальной проекциях, совмещают друг с другом, совмещением радиоактивной метки на срезе, полученном на гамма-камере, и среза средней трети ключицы, полученного на компьютерном томографе. При совмещении корональных и сагиттальных срезов аксиальные срезы автоматически совмещаются. Уровень полученных срезов определяется совмещением радиоактивной метки на ОФЭКТ и средней трети ключицы на МСКТ. В дальнейшем из полученных матриц срезов как на МСКТ, так и ОФЭКТ, строят трехмерное изображение легких. Полученные трехмерные изображения легких на ОФЭКТ и на МСКТ совмещают.

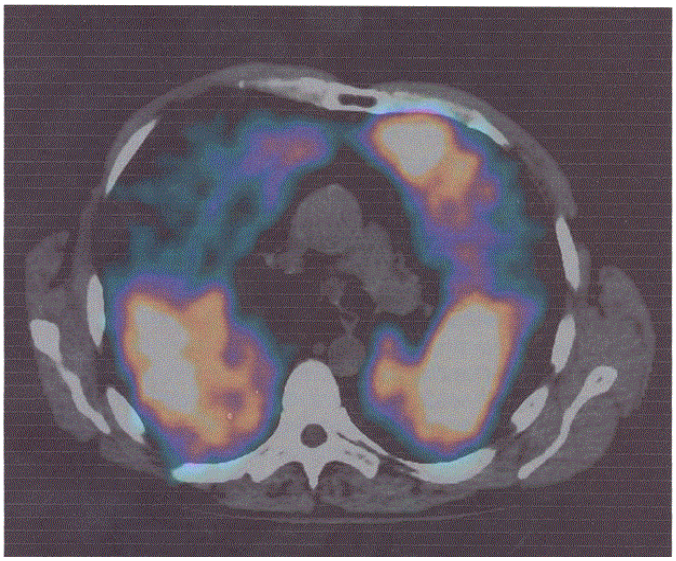


Рис. 4. Совмещенное изображение аксиального среза легких

Заявленный способ был применен у 16 пациентов. Больные поступали на обследование с подозрением на: тромбоэмболию мелких ветвей легочной артерии – 12 человек; хроническую обструктивную болезнь легких – 4 человека. Положительный результат заключался в повышении точности диагностики заболеваний легких за счет комплексного анализа морфологических изменений в легочной ткани и нарушений микроциркуляции. У 9 больных с хронической обструктивной патологией легких и с подозрением на тромбоэмболию мелких ветвей легочной артерии были выявлены участки эмфизематозного вздутия легочной ткани в местах редуцированного кровотока, а также зоны с нарушенным кровотоком, где нарушений в легочной ткани не было выявлено, что свидетельствовало о нарушениях в сосудистом русле легких. Таким образом, у больных с хронической обструктивной патологией диагноз тромбоэмболии мелких ветвей легочной артерии был подтвержден. У трех больных с буллезными изменениями в легочной ткани и с редуцированным кровотоком в этих же зонах не было выявлено дополнительных участков с редуцированным кровотоком. Диагноз ТЭЛА был снят.

У трех пациентов с хронической обструктивной болезнью легких, которым были проведены операции по уменьшению объема легких, на совмещенных срезах были выявлены нарушения микроциркуляции в зонах с буллезной перестройкой легочной ткани, а также кровоток отсутствовал в проекции удаленных зон легких. Диагноз ТЭЛА был снят.

Использование заявленного способа обеспечивает получение совмещенных изображений срезов МСКТ и ОФЭКТ на стандартном оборудовании, повышает точность диагностики заболеваний легких.

Список использованных источников

1. **Фролова, Т. А.** Information models of a medical device for its evaluation / Т. А. Фролова, М. С. Фролова, И. А. Толстухин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 587 – 591.

2. **Фролова, М. С.** Информационная модель медицинской техники на основе объектно-ориентированного подхода / М. С. Фролова, Т. А. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 4(58). – С. 139 – 145.

3. **Гундарцова, Е. С.** Применение GMR-датчиков в медицине / Е. С. Гундарцова, Т. А.Фролова ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. II Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2. – Т. II.

4. **Фролов, С. В.** Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений / С. В. Фролов, М. С. Фролова, А. Ю. Потлов // Врач и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 35 – 45.

5. **Фролов, С. В.** Объектно-ориентированная декомпозиция информационной модели изделий медицинской техники / С. В. Фролов, М. С. Фролова // Ползуновский альманах. – 2016. – № 2. – С. 112 – 117.

УДК 661.935; 519.633.2

Акулинин Е. И., Голубятников О. О., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(E-mail: akulinin-2006@yandex.ru)

КОРОТКОЦИКЛОВЫЕ АДСОРБЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ОЧИСТКИ И РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O., Dvoretsky D. S., Dvoretsky S. I.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(E-mail: akulinin-2006@yandex.ru)

CYCLIC PRESSURE SWING ADSORPTION PROCESSES FOR PURIFICATION AND SEPARATION OF GAS MIXTURES

Аннотация. В работе обсуждаются результаты численного анализа свойств и режимов процесса адсорбционного разделения атмосферного воздуха и концентрирования кислорода с чистотой 90…95% об., осуществляемого в двухадсорберной установке с гранулированным цеолитовым адсорбентом NaX производительностью до 2 л/мин. Проведены вычислительные эксперименты с использованием разработанной математической модели и исследовано влияние температуры, давления, коэффициента обратного потока, длительности цикла адсорбции–десорбции и состава атмосферного воздуха на кинетику и эффективность процесса разделения воздуха методом КБА.

Ключевые слова: короткоцикловая безнагревная адсорбция, цеолитовый адсорбент, NaX, воздух, кислород, азот, математическая модель, численное исследование.

Abstract. The paper discusses the results of numerical studies of the properties and modes of the process of adsorption separation of atmospheric air and oxygen concentration with a purity of 90…95%vol. The process is carried out in a 2-bed PSA unit with granular zeolite adsorbent 13X capacity up to 2 L/min. Computational experiments were carried out to study the effect of temperature, pressure, backflow coefficient, duration of the adsorption–desorption cycle and the composition of atmospheric air on the kinetics and efficiency of the air separation process.

Keywords: pressure swing adsorption, zeolite adsorbent, 13X, air, oxygen, nitrogen, mathematical model, numerical study.

Одним из наиболее распространенных способов разделения газовых смесей и концентрирования в них целевых продуктов являются циклические адсорбционные процессы (короткоцикловая безнагревная адсорбция – КБА или в англоязычной литературе *PSA – Pressure Swing Adsorption*), не предполагающие наличия внешнего источника тепла для регенерации адсорбента. КБА-процессы используются при обогащении воздуха кислородом в медицинских концентраторах кислорода, используемых для дыхательной терапии пациентов с хронической легочной недостаточностью [1].

Целью данной работы является: исследование динамики процесса адсорбционного концентрирования кислорода из атмосферного воздуха и определение степени влияния изменения температуры, состава и давления исходной газовоздушной смеси на чистоту и степень извлечения кислорода в широком диапазоне изменения длительности цикла «адсорбция–десорбция» и давлений на стадиях адсорбции и десорбции.

Технологический процесс получения кислорода методом адсорбционного разделения воздуха осуществляется в двухадсорберной установке КБА с гранулированным адсорбентом – синтетическим цеолитом NaX (рис. 1).

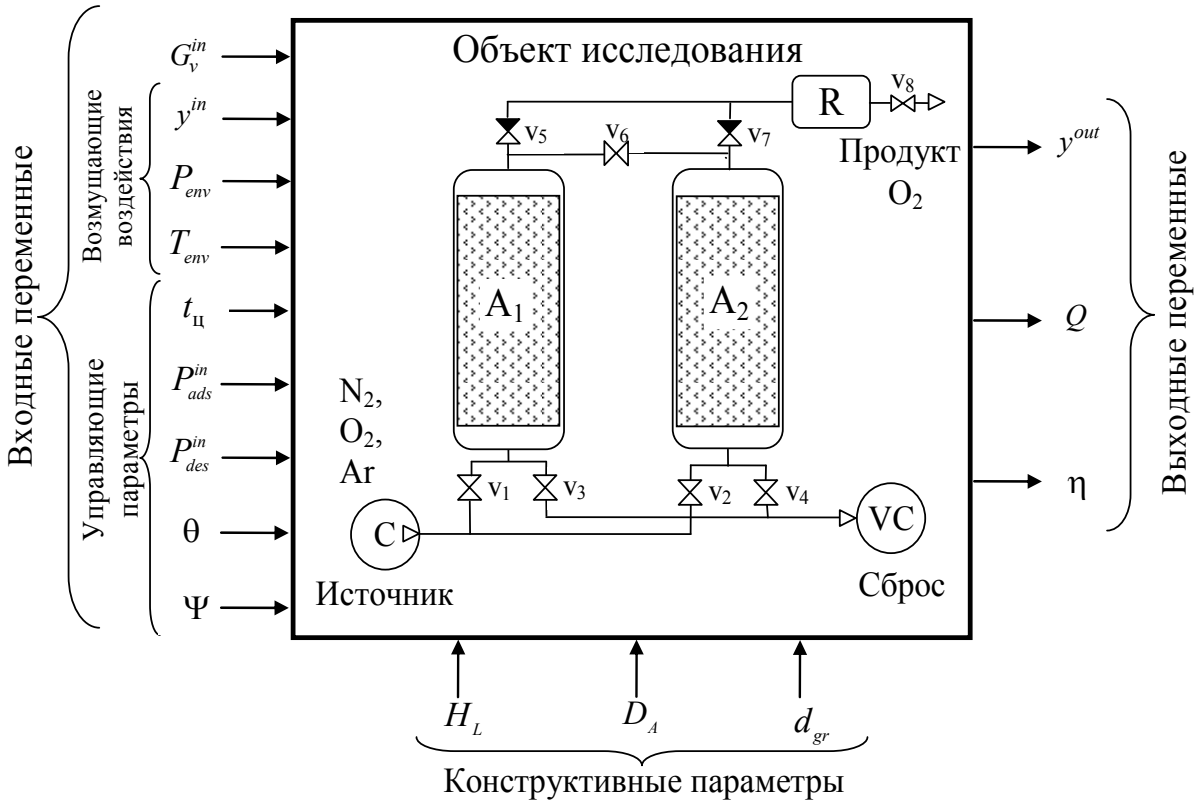


Рис. 1. Схема двухадсорберной установки КБА для получения кислорода:
A_1–A_2 – адсорберы; R – ресивер; v_1 – v_8 – клапаны; C – компрессор; VC – вакуум-насос

Входные переменные в установке КБА включают: нагрузку по сырью $x_н = \{y^{in},\ G_v^{in}\}$, y^{in}, G_v^{in} – состав и пропускная способность впускного клапана; вектор управлений $u = \{t_ц, P_{ads}^{in}, P_{des}^{in}, \theta, \Psi\}$, $P_{ads}^{in}, P_{des}^{in}$ – давления на стадиях адсорбции, десорбции, $t_ц$ – продолжительность цикла адсорбции–десорбции; θ – коэффициент обратного потока, Ψ – степень открытия впускных и выпускных клапанов; вектор возмущений $z = \{T_{env}, P_{env}, y_{env}\}$ – температура T_{env}, давление P_{env} и состав исходной газовоздушной смеси y_{env}, поступающей на разделение в адсорберы. В состав выходных переменных входят концентрация y_1^{out} продукционного газа, степень извлечения η и производительность Q установки КБА. Конструктивные параметры установки: L – высота насыпного слоя адсорбента, D_A – внутренний диаметр адсорбера, d_{gr} – диаметр гранул адсорбента.

При математическом описании процесса обогащения воздуха кислородом принимали следующие допущения:

1) атмосферный воздух (содержит: 1 – O_2 с концентрацией 20,8% об., 2 – N_2 с концентрацией 78,2% об., 3 – Ar и другие примеси с концентрацией 1% об.) является трехкомпонентной газовоздушной смесью (концентрация других веществ (примесей)

не превышает 0,001% об.) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до 200×10^5 Па [2];

2) диффузия O_2, N_2 и распространение тепла в газовоздушной смеси и адсорбенте осуществляются только в аксиальном направлении движения потока газовоздушной смеси в адсорбере (по высоте адсорбента);

3) в качестве адсорбента используется гранулированный цеолит NaX с диаметром гранул 2 мм;

4) адсорбционное равновесие (изотерма адсорбции) описывается уравнением Дубинина–Радушкевича [3];

5) десорбционные ветви изотерм адсорбции O_2, N_2 на цеолите NaX совпадают с адсорбционными;

6) температура газа в ресивере равна температуре газа на выходе из адсорбера, тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы.

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание процесса разделения воздуха включает следующие уравнения [4]:

1) покомпонентный материальный баланс компонентов (O_2, N_2) в потоке газовоздушной фазы с учетом продольного перемешивания в слое адсорбента (нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа);

2) кинетика адсорбции–десорбции (нелинейное дифференциальное уравнение в обыкновенных производных);

3) распространения тепла в газовоздушной смеси и адсорбенте с учетом конвективной составляющей и теплопроводности (нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных параболического типа);

4) изменение скорости потока газовоздушной смеси (нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных); изменение давления газовоздушной смеси (дифференциальное уравнение Эргуна в обыкновенных производных) по высоте адсорбента.

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями использовался метод конечных элементов в программной среде Matlab [5].

Анализ точности математических моделей процессов адсорбционного разделения воздуха проводили с использованием относительной погрешности рассогласования расчетных по модели и экспериментальных значений(максимальная погрешность рассогласования не превышала 15%).

С использованием математической модели процесса адсорбционного разделения воздуха были проведены численные исследования влияния режимных переменных на концентрацию и степень извлечения кислорода в двухадсорберной установке КБА.

Исходные данные для вычислительного эксперимента представлены в табл. 1.

На рисунке 2 представлена динамика давления P воздуха в адсорбере на стадиях адсорбции и десорбции. Анализ графиков показывает, что при длительности цикла $t_ц$ = 20 с стадия адсорбции и набора давления совмещаются.

На рисунке 3 приведена динамика входного, сбросного и продукционного расходов. Из анализа зависимостей следует, что в момент открытия впускного и сбросного клапана перепад давлений на клапанах достигает максимального значения, что вызывает скачкообразное изменение входного и сбросного расходов.

1. Исходные данные для вычислительного эксперимента

Варьируемые переменные	Номинальные значения	Диапазон изменения	Варьируемые переменные	Номинальные значения	Диапазон изменения
$t_ц$, с	20	1…120	Ψ, отн. ед.	1	–
y_1^{in}, % об.	20,8	–	T_{env}, К	293	–
y_3^{in}, % об.	1	–	G_v^{in}, л/мин	18	–
θ, отн. ед.	1,6	0…2	L, м	0,5	–
P_{ads}^{in}, $\times 10^5$ Па	3	2…5	D_A, м	0,05	–
P_{des}^{in}, $\times 10^5$ Па	1	0,25…1	d_{gr}, мм	2	–

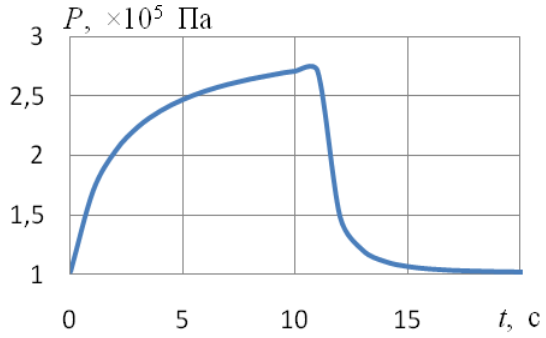


Рис. 2. Динамика давления в адсорбере в одном цикле (при *t* от 0 до 10 с – стадия адсорбции; при *t* от 10 до 20 с – стадия десорбции)

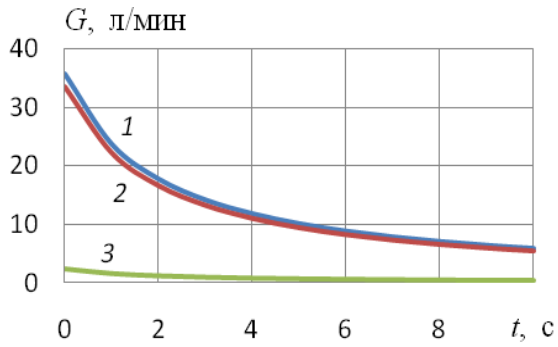


Рис. 3. Динамика расходов в установке КБА:
1 – на впускном клапане; *2* – на сбросной клапане; *3* – продукционный расход

По мере выравнивания давления в адсорбере расход монотонно уменьшается. Резких колебаний продукционного расхода не наблюдается, поскольку колебания давления в продукционной линии демпфируются ресивером *R*.

Анализ зависимостей на рис. 4, 5 показывает, что при увеличении коэффициента обратного потока θ максимальная концентрация y_1^{out} достигается быстрее, и необходимо уменьшать длительность цикла $t_ц$ (рис. 4, кривые *2*, *3*), поскольку в адсорбере быстрее снижается давление до рабочего значения P_{des}^{in}, при этом возрастает равновесная концентрация и обеспечивается более глубокая промывка адсорбента. Однако степень извлечения η при увеличении коэффициента обратного потока θ снижается (рис. 5). Следует отметить, что при увеличении $t_ц$ возрастает степень извлечения η (рис. 5, кривые *2*, *3*), поскольку обеспечивается более глубокая промывка адсорбента за счет повышения времени работы установки при давлениях P_{ads}^{in} и P_{des}^{in}.

Из анализа графиков на рис. 6, 7 следует, что концентрация y_1^{out} возрастает при увеличении давления адсорбции P_{ads}^{in}, поскольку значение равновесной концентрации увеличивается, одновременно сокращается требуемая длительность цикла адсорбции–десорбции $t_ц$. При этом степень извлечения η также возрастает, так как при увеличении давления адсорбции P_{ads}^{in} снижается доля потока, отбираемого на промывку адсорбента.

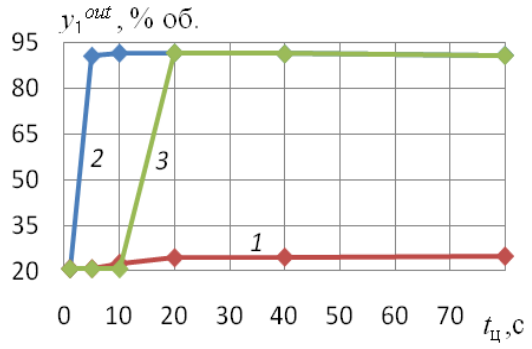


Рис. 4. Зависимость концентрации кислорода y_1^{out} в продуктовом потоке от $t_ц$ при:
1 – θ = 0; *2* – θ = 1,6; *3* – θ = 2

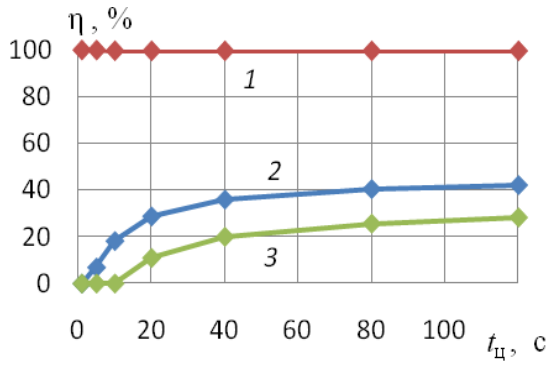


Рис. 5. Зависимость степени извлечения η кислорода от $t_ц$ при:
1 – θ = 0; *2* – θ = 1,6; *3* – θ = 2

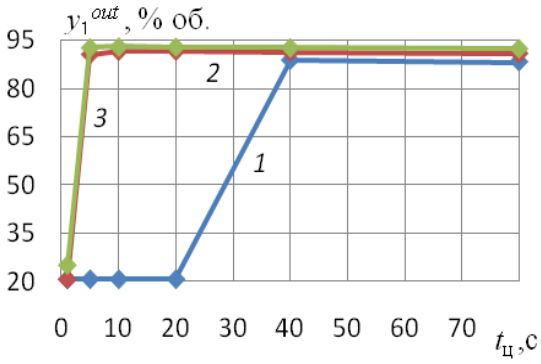


Рис. 6. Зависимость концентрации кислорода y_1^{out} в продуктовом потоке от $t_ц$ при:
1 – $P_{ads}^{in} = 2\cdot10^5$ Па; *2* – $P_{ads}^{in} = 3\cdot10^5$ Па;
3 – $P_{ads}^{in} = 5\cdot10^5$ Па

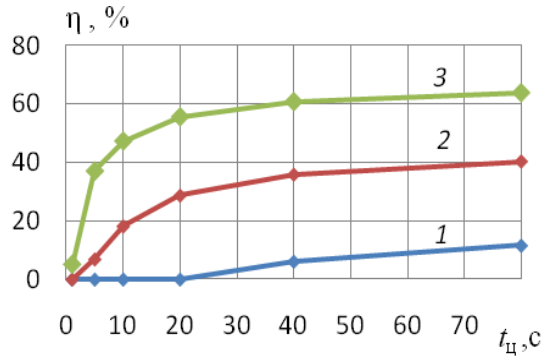


Рис. 7. Зависимость степени извлечения η от времени от $t_ц$ при:
1 – $P_{ads}^{in} = 2\cdot10^5$ Па; *2* – $P_{ads}^{in} = 3\cdot10^5$ Па;
3 – $P_{ads}^{in} = 5\cdot10^5$ Па

Заключение. В ходе проведения вычислительных экспериментов установлено, что изменение величин давлений адсорбции и десорбции, коэффициента обратного потока, длительности цикла адсорбции–десорбции оказывает существенное влияние на степень извлечения и концентрацию кислорода в продуктовой смеси на выходе установки КБА. Полученные результаты могут быть использованы: для постановки и решения задачи оптимизации циклических режимов процесса адсорбционного разделения воздуха с целью получения кислорода с чистотой 90…95%об., для оптимального проектирования новых автоматизированных процессов и установок КБА с циклически изменяющимся давлением, для оптимального конструирования малогабаритных медицинских концентраторов кислорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки России в рамках проектной части Государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ.

Список использованных источников

1. **Skvortsov, S. A.**, Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O., Dvoretsky D. S., Dvoretsky S. I. Mathematical modelling of cyclic pressure swing adsorption processes // Journal of Physics: Conference Series Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1015(3). – 032002.

2. **Кириллин, В. А.** Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – 496 с.

3. **Дубинин, М. М.** Адсорбция и пористость / М. М. Дубинин. – М. : Изд-во ВАХЗ, 1972. – 123 с.

4. **Оптимальное** проектирование короткоцикловых адсорбционных установок для концентрирования кислорода / Е. И. Акулинин, О. О. Голубятников, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2017. – № 41. – С. 119 – 127.

5. **Akulinin, E. I.** Mathematical modeling of hydrogen production process by pressure swing adsorption method // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – № 2. – P. 38 – 49.

References

1. **Skvortsov, S. A.**, Akulinin E. I., Golubyatnikov O. O., Dvoretsky D. S., Dvoretsky S. I. Mathematical modelling of cyclic pressure swing adsorption processes // Journal of Physics: Conference Series Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1015(3). – 032002.

2. **Kirillin V. A.**, Sychev V. V., Sheindlin A. E. Technical thermodynamics. – M. : Publishing house MEI, 2008. – 496 p.

3. **Dubinin, M. M.** Adsorption and porosity. – Russia, Moscow, 1972. – 124 p.

4. **Akulinin E. I.**, Golubyatnikov O. O., Dvoretsky D. S., Dvoretsky S. I. // Bulletin of St PbSIT (TU). – 2017. – № 41(67). – P. 119 – 127.

5. **Akulinin, E. I.** Mathematical modeling of hydrogen production process by pressure swing adsorption method // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – № 2. – P. 38 – 49.

УДК 681.51

Семенов Д. Д.[1], Коновалова К. Н.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. 89606682372, e-mail: siemionov1995@mail.ru),
[2](Тел. 89107581761, e-mail: xu.konovalova@gmail.com)

ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Semenov D. D.[1], Konovalova K. N.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. 89606682372, e-mail: siemionov1995@mail.ru),
[2](Tel. 89107581761, e-mail: xu.konovalova@gmail.com)

VIRTUAL MODEL OF PRESSURE AND TEMPERATURE REGULATION SYSTEM

Аннотация. Проведен анализ точности и оперативности мультипликативно-симметричного, стандартного критериев при помощи виртуальной модели оптимального регулирования динамических характеристик для автоматического контроля измерительными средствами в адаптивном диапазоне.

Ключевые слова: система управления, точность, оперативность, регулирование, ПИД-регулирование, аналитический контроль.

Abstract. The analysis of the accuracy and efficiency of the multiplicative-symmetric standard criteria is carried out using a virtual model of optimal control of dynamic characteristics for automatic monitoring by measuring means in the adaptive range

Keywords: control system, accuracy, efficiency, regulation, PID control, analytical control.

В настоящее время основными недостатками систем управления являются недостаточные оперативность и точность ПИД-регулирования [1], поэтому для создания эффективных автоматических систем контроля климатических и биологических условий необходимо создать виртуальную модель такой системы управления, которая позволяет уменьшить погрешность за счет изменения алгоритма оценки сигнала.

ПИД-регулирование, представляет собой совокупность позиционного П, интегрального И, дифференциального Д законов, которые управляют шириной диапазона при помощи аппаратно управляемых коэффициентов, подбирающихся методом итераций, что является достаточно длительным процессом при оценке изменяющегося во времени сигнала. Известны методы оптимизации ПИД-коэффициентов, позволяющие рассчитать значение критериев, но данные вычисления являются достаточно трудоемкими, неэффективными и требуют наличия высококлассных специалистов в области автоматического управления, метрологических измерений и аналитического контроля [1]. Погрешность при ПИД-регулировании представляет собой разность между входным сигналом E и выходным сигналом U

$$\varepsilon = E - U . \quad (1)$$

Повысить точность регулирования можно при помощи использования мультипликативно-симметричного критерия

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{X_{CГ}}{X_{CA}} \right)^2, \tag{2}$$

где $(X_{CГ}/X_{CA})^2$ – отношение произведения случайных величин переменных ΠU_i к их нормируемому эквиваленту – max$\Pi = X_{CA}$, для $i = 1,2$, так как используется $n = 2$ переменных $U_1 = E$ и $U_2 = U$, соответствует $(X_{CA})^2$.

Их физический смысл тождественен квадрату средней геометрической оценки:

$$(X_{CГ})^2 = \left(\sqrt[2]{\prod_{j=1}^{2} U_{ji}} \right)^2, \tag{3}$$

произведения переменных сигналов E и U, а также квадрату среднего арифметического:

$$(X_{CA})^2 = \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{2} U_{ji} \right)^2. \tag{4}$$

Таким образом, формула принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\left(\sqrt[2]{\prod_{j=1}^{2} U_{ji}} \right)^2}{\left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{2} U_{ji} \right)^2}. \tag{5}$$

В качестве измерительного преобразователя в обеих системах регулирования давления и температуры выступает тензомостовой датчик давления и температуры, который состоит из тензорезисторов *1 – 4*, трехжильного кабеля *5*, двуполярного источника тока *6* и коммутатора каналов *7* (рис. 1).

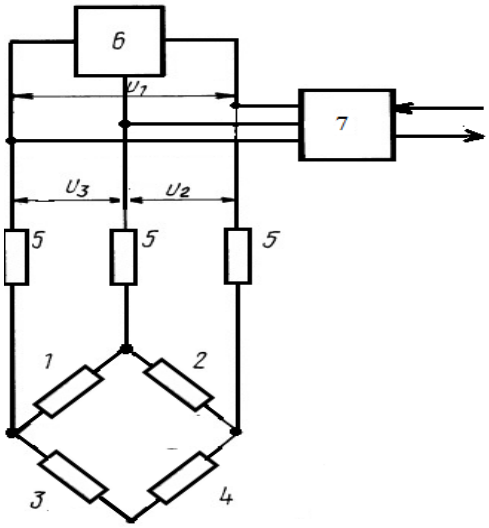
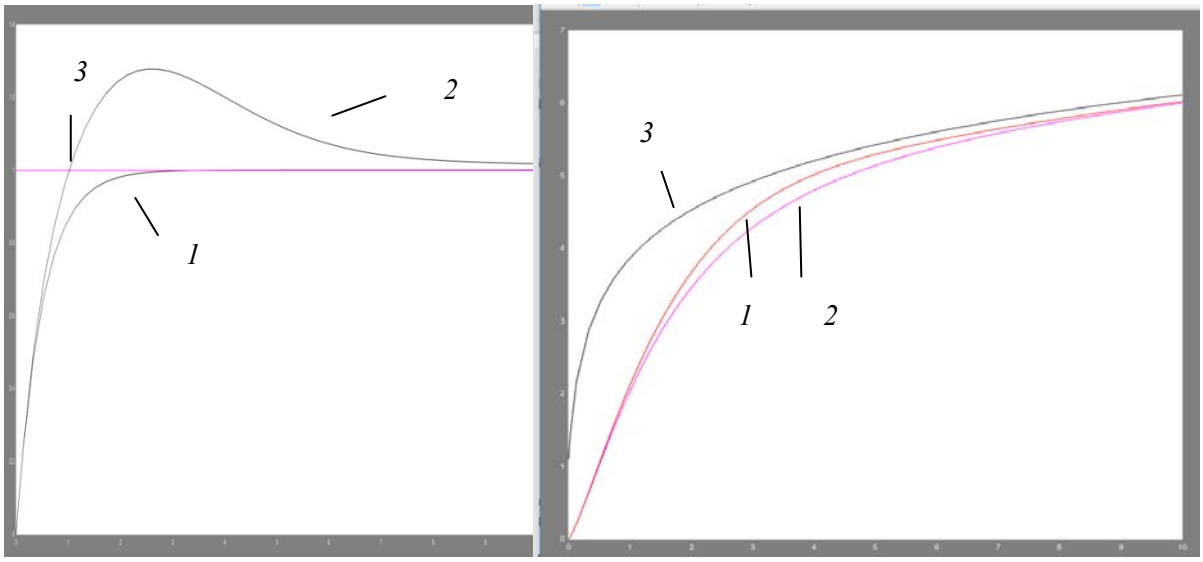


Рис. 1. Измерительный преобразователь давления и температуры

Смоделируем систему управления в программе SIMULINK и подадим на вход постоянный и переменный сигналы в синхронном режиме регулирования. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 2 [2].



а) *б*)

Рис. 2. Амплитудно-временны́е характеристики системы регулирования при постоянном напряжении (*а*) и переменном напряжеии (*б*):
1 – МСК-критерий; *2* – стандартный при k = 0,3; *3* – эталонный сигнал

Основными критериями оценки качества работы пропорционального регулирования являются погрешность и время выхода (оперативность) на установившееся значение динамической характеристики [3].

Для количественной оценки оперативность зафиксируем значение в момент t = 2 с.

1. Количественные характеристики сигналов

		Значения в момент времени t = 2 с	Эталонный сигнал	Оперативность t, с
МСК	Первый сигнал	3,5	4,1	3
	Второй сигнал	0,96	1	4
Стандартный	Первый сигнал	3,3	4,2	11
	Второй сигнал	1,27	1	37

Точность сигнала на рисунке оценивают по погрешности, которая определяется формулой

$$\varepsilon = 1 - F_i / F_{эi}\,, \tag{6}$$

где F_i – регулируемая функция, а $F_{эi}$ – желаемый эквивалент $F_{эi}$.

Оценка точности сигнала показана в табл. 2.

2. Метрологические характеристики сигналов

		Отклик	Эквивалент	Погрешность ε
МСК	Первый сигнал	3,6	4,2	0,14
	Второй сигнал	0,98	1	0,02
Стандартный	Первый сигнал	3,3	4,2	0,21
	Второй сигнал	1,25	1	0,25

Данные из табл. 1 и 2 доказывают, что наивысшая точность достигается при использовании МСК-критерия, которая в 1,4 раза ниже при измерении первого сигнала и в 12 раз ниже при измерении второго, по сравнению с классическим способом. Оперативность при использовании МСК повышается в 3,7 раза.

Таким образом, данная модель показывает, что реализация управляющего сигнала нормированной погрешностью в виде отношения произведения случайных величин переменных к их нормируемому эквиваленту, в отличие от известных решений, позволяет осуществить управление с достаточной точностью и оперативностью.

Список использованных источников

1. **Ту, Ю.** Современная теория управления / Ю. Ту. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.

2. **Пат.** РФ № 2571570, МПК G05B17/00. Способ и система автоматического управления / Коробов А. А., Глинкин Е.И., 2015, Бюл. № 35.

3. **Глинкин, Е. И**. Оптимальные меры оценки эффективности / Е. И. Глинкин // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – Тамбов, 2014. – Т. 19, Вып. 6. – С. 1863 – 1869.

4. **Фролова, М. С.** Информационная модель медицинской техники на основе объектно-ориентированного подхода / М. С. Фролова, Т. А. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. – 2015. – № 4. – С. 139 – 145.

References

1. **Tu, Y.** Moderncontroltheory. – Moscow : Mechanical Engineering, 1971. – 472 p.

2. **Pat.** RF № 2571570, IPC G05B17/00. Method and system of automatic control / Korobov A. A., Glinkin E. I., 2015, Byul. № 35.

3. **Glinkin, E. I.** Optimal measures of assessment // Bulletin of the Tambov University. A series of natural and technical sciences. – Tambov, 2014. – T. 19, V. 6. – P. 1863 – 1869.

4. **Frolova, M. S.** Information model of medical equipment on the basis of the object-oriented approach / M. S. Frolova, T. A. Frolova, I. A. Tolstukhin // Issues of modern science and practice. – 2015. – № 4. – С. 139 – 145.

УДК 004.3

Райкин Л. И.[1], Субботина М. Н.[2], Стефанова М. В.[3], Федорова Т. О.[4]
Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, Россия, г. Нижний Новгород
[1](Тел. 89036041090, e-mail: raykinl@yandex.ru),
[2](Тел. 89200126132, e-mail: mnsubbotina@gmail.com),
[3](Тел. 8-903-042-52-69, e-mail: author3@ yandex.ru),
[4](Тел. 89503525883, e-mail: fedorovatatianao@yandex.ru)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И СООРУЖЕНИЙ НА ЭТАПАХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Raikin L. I.[1], Subbotina M. N.[2], Stefanova M. V.[3], Fedorova T. O.[4]
Nizhny Novgorod State Technical University, Russia, Nizhny Novgorod
[1](Tel. 89036041090, e-mail: raykinl@yandex.ru),
[2](Tel. 89200126132, e-mail: mnsubbotina@gmail.com),
[3](Tel. 8-903-042-52-69, e-mail: author3@ yandex.ru),
[4](Tel. 89503525883, e-mail: fedorovatatianao@yandex.ru)

TECHNOLOGICAL PLATFORMS FOR CREATING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL OBJECTS ANDFACILITIES AT THE STAGES OF THEIR LIFE CYCLE

Аннотация. Информационная компонента в реальном секторе экономики сопряжена с реализацией концепции информационного моделирования сооружений – *Building Information Model* (BIM). В BIM в качестве центрального звена выступает информационная модель (ИМ) объекта (сооружения). Публикации, посвященные анализу технологических платформ для создания ИМ, структурированы частично и охватывают ограниченную часть спектра. В предлагаемой статье приведены результаты исследования существующей информации о технологических платформах для ИМ.

Ключевые слова: информационная модель, информационное моделирование, технологические платформы.

Abstract. The information component in the real sector of the economy is associated with the implementation of the concept of information modeling of buildings – Building Information Model (BIM). In BIM as the central link information model (IM) of the object (construction) is presented. Publications devoted to the analysis of technological platforms for the creation of IM are structured in part and cover a limited part of the spectrum. The proposed article presents the results of a study of existing information on technological platforms for IM.

Keywords: information model, information modeling, technological platforms.

Введение. Информационное моделирование промышленного объекта (от англ. PIM – *Plant Information Model*) и информационное моделирование или информационная модель сооружений (BIM – *Building Information Modeling* или *Building Information Model*) представляют собой процессы коллективного создания и использования информации о сооружении [1], формирующих основу для всех решений на протяжении жиз-

ненного цикла объекта/здания (от самых ранних концепций до рабочего проектирования, строительства, эксплуатации и сноса). При этом понятие «Здание» имеет самый широкий смысл, к которому может быть отнесены объекты различного назначения: гражданские, промышленные, инфраструктура города, мосты, дороги и т.д. [2]. Считается, что BIM – это числовое описание и нужным образом организованная информация об объекте, используемая как на стадии проектирования и строительства здания, так и в период его эксплуатации и даже сноса [3].

В этих процессах в качестве центрального звена выступает информационная модель (ИМ) объекта/сооружения. Совокупность информационных объектов, документов и отношений между ними принято называть электронным описанием [4]. Наличие многочисленных вендоров, предлагающих свои решения по PIM и BIM, предопределяет разнообразие технологических платформ для создания информационных моделей.

Вопросам, связанным с анализом платформ для создания ИМ промышленных объектов и сооружений, посвящен ряд публикаций [5 – 8] и др. Однако публикации, относящиеся к обзору технологических платформ для создания ИМ, разрознены, недостаточно структурированы, фрагментарны и не охватывают большую часть спектра.

В настоящей статье предпринята попытка обобщить известные исследования технологических платформ для создания информационных моделей промышленного объекта и сооружения на этапах их жизненного цикла.

Технологическая платформа *Bentley Systems* для создания информационных моделей. Рассмотрим решения для сложных перерабатывающих производств (PIM-технологии) зарубежного разработчика *Bentley Systems*.

Bentley Systems разрабатывает и предлагает программное обеспечение для проектирования, строительства и эксплуатации инфраструктуры [9]. Компания *Bentley Systems* является мировым лидером в области комплексных программных решений для проектирования, строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры, предназначенных для архитекторов, инженеров, специалистов по геоинформационным технологиям, строителей и владельцев инфраструктуры. [10]. Решения *Bentley* включают приложение *Micro Station* для информационного моделирования, средства обеспечения сотрудничества *Project Wise* для реализации комплексных проектов и производственную службу *Asset Wise* для создания «разумной» инфраструктуры. Компания предлагает широкий спектр программного обеспечения, который обслуживает многочисленные отрасли. Компания предоставляет решения для архитектуры и машиностроения, а также для строительства (табл. 1).

На рисунке 1 представлена компьютерная модель дожимной компрессорной станции в Надыме (Россия), выполненная в *Bentley Micro Station*, *Descartes* и *Plant Space* [11].

Технологическая платформа Hexagon/Intergraph для создания информационных моделей. *Hexagon/Intergraph* является поставщиком информационных технологий для промышленных и геопространственных приложений.

Подразделение *Intergraph Process*, *Power & Marine* (*PP&M*) [12] – мировой лидер в разработке программных решений для проектирования, строительства, ввода в эксплуатацию и обеспечения бесперебойного функционирования заводов непрерывного производства, энергетических объектов, кораблей, морских платформ и прочих инфраструктур.

1. Функционал ПО от *Bentley Systems*

№	Наименование программного решения	Функционал
1	*AECOsim Building Designer*	Решение для информационного моделирования, выполняемого многопрофильными проектными группами, основанное на технологии BIM
2	*Bentley AXSYS. Process*	Открытая система разработки технологических схем и функциональных схем автоматизации как на стадии **Проект**, так и на стадии выпуска рабочей документации
3	*Bentley FlowMaster*	Гидравлический анализ для открытых каналов, труб, плотин, и отверстий
4	*Bentley Hammer*	Анализ и моделирование переходных процессов
5	*Bentley Map*	Расширяемая геоинформационная система для поддержки мировой инфраструктуры
6	*Bentley MicroStation*	ПО для автоматизированного проектирования и информационного моделирования в области архитектуры, проектирования, строительства и эксплуатации
7	*Bentley PlantWise*	Набор инструментов по быстрому созданию и редактированию 3D-моделей
8	*Bentley PowerCivil for Russia*	ПО для проектирования генпланов, дорог и подземных коммуникаций
9	*Bentley ProConcrete*	Специализированное решение на базе *AutoCAD* для моделирования и проектирования железобетонных конструкций
10	*Bentley ProjectWise*	Система документооборота и электронного архива
11	*Bentley promis•e*	Комплексный набор инструментов для проектирования систем контроля и управления
12	*Bentley ProSteel*	Специализированное решение на базе *AutoCAD* для моделирования и проектирования металлических конструкций зданий и сооружений любой степени сложности
13	*Bentley Rail Track*	ПО для проектирования и обслуживания инфраструктуры железнодорожного транспорта
14	*Bentley RM Bridge*	ПО для трехмерного проектирования и расчетов конструкций мостов
15	*Bentley Sewer CAD*	ПО для расчета объема сточных вод, интенсивности входного потока и потока в трубопроводе

Продолжение табл. 1

№	Наименование программного решения	Функционал
16	*Bentley Sewer GEMS*	ПО для моделирования городских и комбинированных канализационных систем
17	*Bentley Speedikon*	Специализированное решение на базе *AutoCAD* для проектирования архитектурно-строительной части зданий и сооружений. Основано на технологии BIM (Информационная модель здания)
18	*Bentley STAAD.Pro*	Программный комплекс для расчета методом конечных элементов и проектирования стальных, бетонных, деревянных и алюминиевых конструкций по различным нормам проектирования, в том числе СНиП
19	*Bentley StormCAD*	Проектирование и моделирование систем наружного водоснабжения
20	*Bentley WaterGEMS*	Моделирование и управление распределением воды в системах водоснабжения и канализации

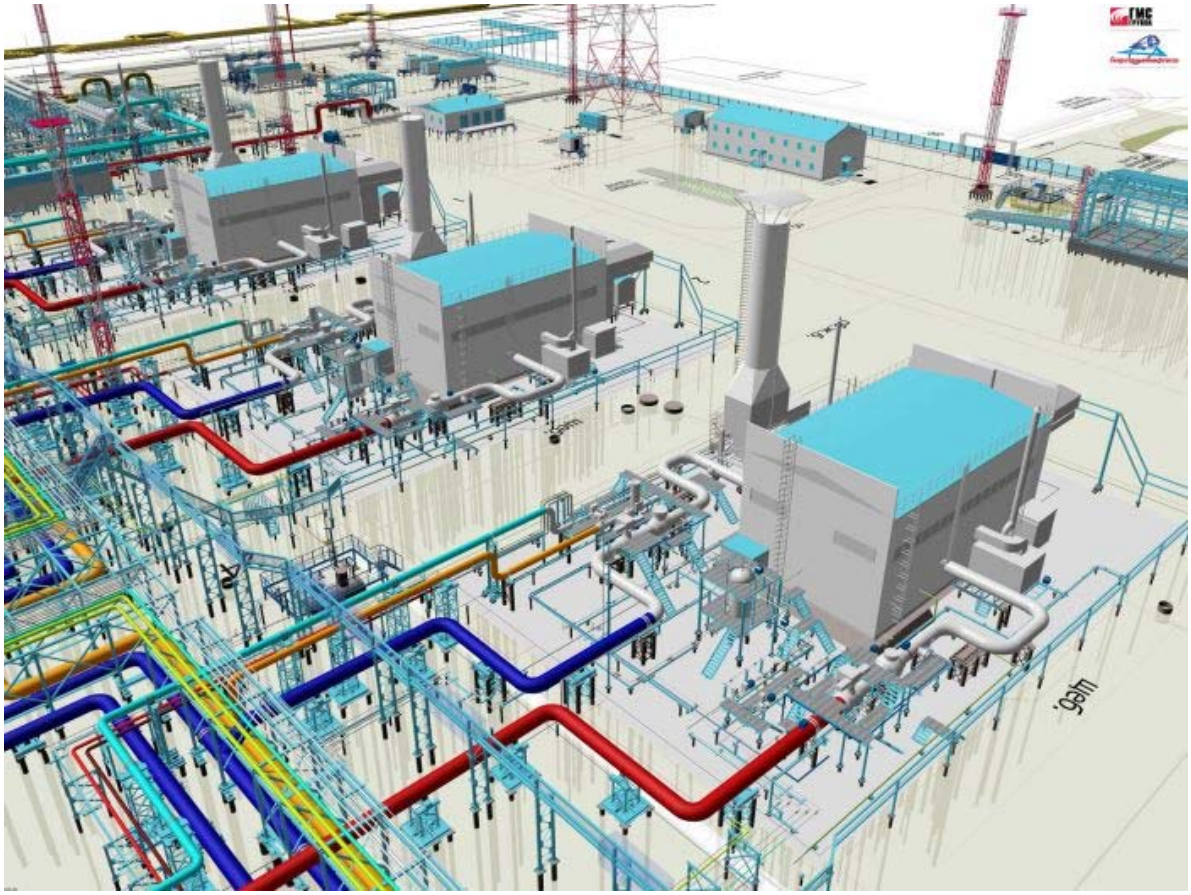


Рис. 1. Компьютерная модель дожимной компрессорной станции в Надыме (Россия). Работа выполнена в *Bentley Micro Station*, *Descartes* и *Plant Space* [11]

Программные решения на платформе *Smart Plant Enterprise* включают в себя следующие компоненты: 3D-моделирование и визуализация, управление информацией, инжиниринг и схемы, управление поставками материалов и управление проектами, расчеты, отраслевые решения и решения для эксплуатирующих организаций.

Smart Plant Enterprise предлагает широкий набор приложений [13].

Программа *Smart Plant Alliance* [14] увеличивает ценность *Smart Plant Enterprise*, включив открытую интеграцию с другими системами.

На рисунке 2 приведен пример использования системы визуализации 3D-моделей на базе *Intergraph Smart Plant Review.*

а)

б)

Рис. 2. Симуляция строительства (*а*); обнаружение коллизии (*б*)

Программа *Itergraph CAESAR II* определяет напряженно-деформированное состояние (НДС) трубопроводов и поведение конструкций по международным нормам и стандартам (рис. 3). Являясь эталоном для сравнения, программа стала мировым стандартом прочностного анализа трубопроводных систем [15].

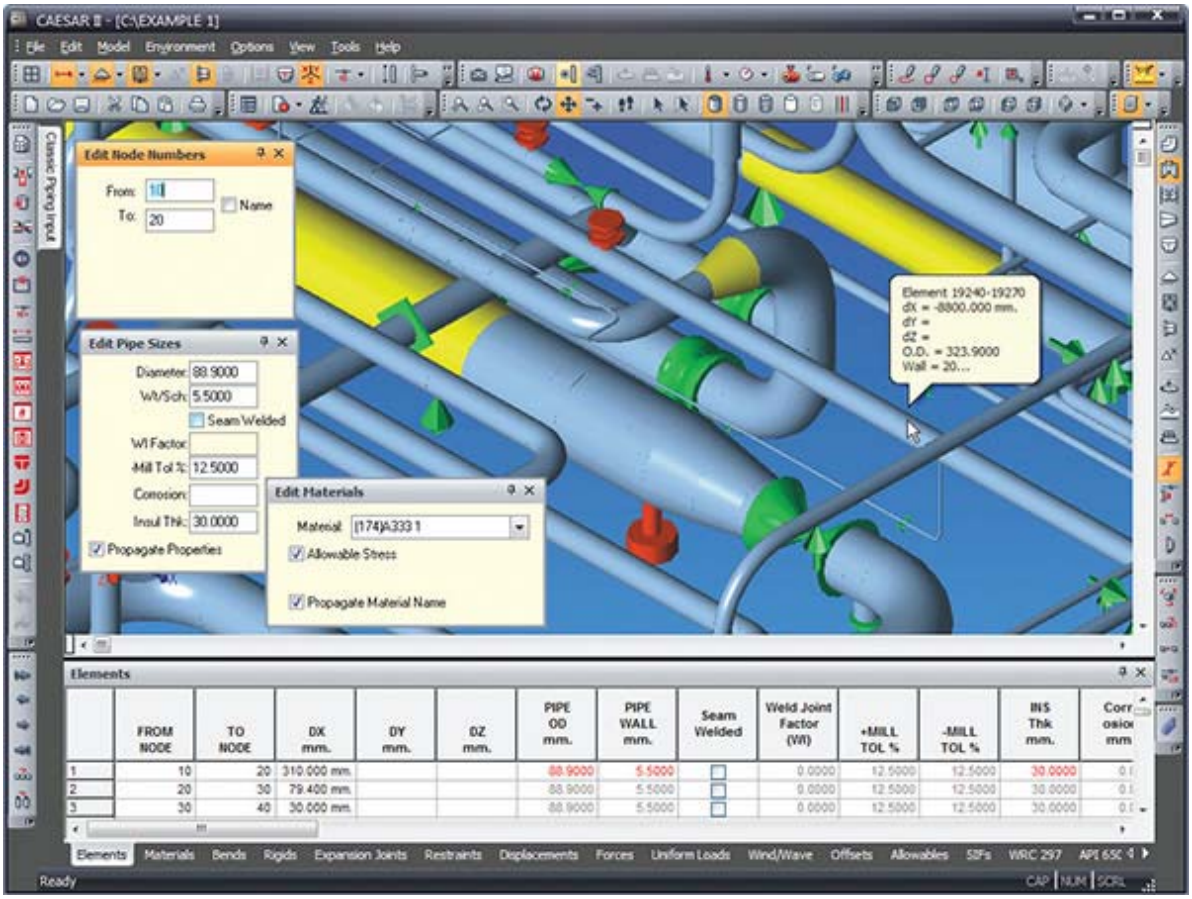


Рис. 3. Графическое представление для прочностного анализа трубопроводных систем с использованием программы *Intergraph CAESAR II*

Заключение. Проведенные исследования показали, что:

– на мировом рынке используются различные технологические платформы для создания информационных моделей;

– зарубежные технологические платформы для создания ИМ могут быть использованы на большинстве этапов информационной поддержки жизненного цикла объекта (сооружения);

– при выборе той или иной технологической платформы для создания информационной модели объекта (сооружения) необходимо оценивать их функционал и характеристики.

Список использованных источников

1. **Сайт** компании Autodesk [Электронный ресурс]. – URL : https://www.autodesk.ru/campaigns/aec-building-design-bds-new-seats/landing-page/ (дата обращения : 21.09.2018).

2. **BIM-технология** – что это? Сайт компании «НТЦ «Эталон» [Электронный ресурс]. – URL : http://www.ntc-etalon.com/aboutbim/ (дата обращения : 21.09.2018).

3. **Талапов, В.** BIM: Что под этим обычно понимают. Isicad, 1 ноября 2010 [Электронный ресурс] / В. Талапов. – URL : http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14078/ (дата обращения : 21.09.2018).

4. **Пример** внедрения. Новый этап в 75-летней истории [Электронный ресурс]. – URL : https://www.plm.automation.siemens.com/ru/about_us/success/case_study.cfm? Component=57503&ComponentTemplate=85646/ (дата : обращения 21.09.2018).

5. **Группа** по научной и промышленной политике. Сколковский институт науки и технологий [Электронный ресурс]. – URL : http://www.skoltech.ru/industriya/gruppa-po-nauchnoy-i-promyshlennoy-politike/ (дата обращения : 21.09.2018).

6. **Сайт** Научно-производственной компании «Интеграл» [Электронный ресурс]. – URL : http://integral-russia.ru/wp-content/uploads/2017/10/BIM-v-stroitelstve_2.pdf (дата обращения : 21.09.2018).

7. **BIM** – информационная модель здания: пора или не пора [Электронный ресурс]. – URL : https://scadsoft.com/download/BIM2011.pdf (дата обращения : 21.09.2018).

8. **Информационное** моделирование объектов промышленного и гражданского строительства [Электронный ресурс]. – URL : https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/metro/img/bim_brochure.pdf (дата обращения : 21.09.2018).

9. **Официальный** сайт компании CSoft [Электронный ресурс]. – URL : http://www.csoft.ru/about/vendors/bentley.html (дата обращения : 21.09.2018).

10. **Сайт** компании MONT [Электронный ресурс]. – URL : https://mont.com/ru-ru/vendor/bentley/ (дата обращения : 21.09.2018).

11. **Что происходит** с внедрением BIM в России [Электронный ресурс]. – URL : http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=15811/ (дата обращения : 21.09.2018).

12. **Сайт** Группы компаний Hexagon AB [Электронный ресурс]. – URL : http://www.intergraph.com/global/ru/ppm/default.aspx/ (дата обращения : 21.09.2018).

13. **Обзор** программных решений Intergraph [Электронный ресурс]. – URL : http://www.intergraph.com/global/ru/assets/pdf/PPM.pdf/ (дата обращения : 21.09.2018).

14. **Partners** SmartPlant Alliance Program [Электронный ресурс]. – URL : http://www. intergraph.com/ppm/partners.aspx/ (дата обращения : 21.09.2018).

15. Сайт компания «Бюро ESG» [Электронный ресурс]. – URL : http://esg.spb.ru/intergraph_caesar/ (дата обращения : 21.09.2018).

References

1. **Sajt** kompanii Autodesk. Available at: https://www.autodesk.ru/campaigns/aec-building-design-bds-new-seats/landing-page/ (accessed 21.09.2018).

2. **BIM-tekhnologiya** – chto ehto? Sajt kompanii “NTC “Ehtalon”. Available at: http://www.ntc-etalon.com/aboutbim/ (accessed 21.09.2018).

3. **Talapov, V.** BIM: CHto pod ehtim obychno ponimayut. Isicad, 1 noyabrya 2010.Available at: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14078/ (accessed 21.09.2018).

4. **Primer** vnedreniya. Novyj ehtap v 75-letnej istorii.Available at: https://www.plm.automation.siemens.com/ru/about_us/success/case_study.cfm?Component=57503&ComponentTemplate=85646/ (accessed 21.09.2018).

5. **Gruppa** po nauchnoj i promyshlennoj politike. Skolkovskij institut nauki i tekhnologij. Available at: http://www.skoltech.ru/industriya/gruppa-po-nauchnoy-i-promyshlennoy-politike/ (accessed 21.09.2018).

6. **Sajt** Nauchno-proizvodstvennoj kompanii “Integral”. Available at: http://integral-russia.ru/wp-content/uploads/2017/10/BIM-v-stroitelstve_2.pdf (accessed 21.09.2018).

7. **BIM** – informacionnaya model' zdaniya: pora ili ne pora. Available at: https://scadsoft.com/download/BIM2011.pdf (accessed 21.09.2018).

8. **Informacionnoe** modelirovanie ob»ektov promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva. Available at: https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/metro/img/bim_brochure.pdf (accessed 21.09.2018).

9. **Oficial'nyj** sajt kompanii CSoft. Available at: http://www.csoft.ru/about/vendors/bentley.html. (accessed 21.09.2018).

10. **Sajt** kompanii MONT. Available at: https://mont.com/ru-ru/vendor/bentley/ (accessed 21.09.2018).

11. **Chto** proiskhodit s vnedreniem BIM v Rossii. Available at: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=15811/ (accessed 21.09.2018).

12. **Sajt** Gruppy kompanij Hexagon AB. Available at: http://www.intergraph.com/global/ru/ppm/default.aspx/ (accessed 21.09.2018).

13. **Obzor** programmnyh reshenij Intergraph. Available at: http://www.intergraph.com/global/ru/assets/pdf/PPM.pdf/ (accessed 21.09.2018).

14. **Partners** Smart Plant Alliance Program. Available at: http://www.intergraph.com/ppm/partners.aspx/ (accessed 21.09.2018).

15. **Sajt** kompaniya “Byuro ESG”. Available at: http://esg.spb.ru/intergraph_caesar/ (accessed 21.09.2018).

УДК 004.93:681.518

Костюкова А. П.[1], Костюкова Т. П.[2]
Уфимский государственный авиационный технический университет,
Россия, г. Уфа
[1](Тел. (3472)513989, e-mail: kostyukovaN@yandex.ru),
[2](Тел. (3472)543201, e-mail: ktp@ufanet.ru)

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УСТРОЙСТВ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Kostyukova A. P.[1], Kostyukova T. P.[2]
Ufa State Aviation Technical University, Russia, Ufa
[1](Tel. (3472)513989, e-mail: kostyukovaN@yandex.ru),
[2](Tel. (3472)543201, e-mail: ktp@ufanet.ru)

THE DEVELOPMENT OF A MODIFIED METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF PULSE-DISCHARGE ELECTROTECHNOLOGY DEVICES

Аннотация. Актуальность рассматриваемого материала подтверждается широким применением электротехнологических методов обработки материалов, позволяющих осуществлять обработку с высокими значениями КПД, точности и экономической эффективности. Дальнейшее совершенствование источников питания для электротехнологии сдерживается неполными изысканиями в области моделирования. В статье предложен модифицированный метод оптимизации на основе генетических алгоритмов. При моделировании разрядно-импульсных устройств использована обобщенная феноменологическая схема замещения, представленная в виде преобразователя энергии, высоковольтного трансформатора и нагрузки, которой является, например, озонатор.

Ключевые слова: электротехнология, оптимизация, генетические алгоритмы, моделирование, стринги параметров.

Abstract. The relevance of the material is confirmed by the widespread use of electrotechnological methods of material processing, allowing processing with high values of efficiency, accuracy and economic efficiency. Further improvement of power sources for Electrotechnology constrained by incomplete research in the field of modeling. The article proposes a modified optimization method based on genetic algorithms. The generalized phenomenological equivalent circuit, represented as an energy Converter, high-voltage transformer and load, which is, for example, an ozonator, is used in the modeling of discharge-pulse devices.

Keywords: electrotechnology, optimization, genetic algorithm, modeling, string parameters.

Разрядно-импульсные электротехнологические установки являются основой значительного числа современных технологий высокого уровня, обеспечивающих высокое качество выпускаемой продукции, повышение энергетических и динамических показателей всего комплекса оборудования, а также улучшающих характеристики его эксплуатационной надежностью [1]. Однако моделирование таких устройств с учетом нестационарности параметров нагрузки не нашло должного отражения в зарубежной и отечественной литературе.

Главенствующее место при создании объектов любого назначения и степени сложности по своему влиянию на результаты проектирования занимают задачи, направленные на поиск рациональных технических решений. Для таких задач характерна весьма большая размерность варьируемых параметров, и для их разрешения необходимо проведение последовательной декомпозиции, выявление основного звена и выделение взаимосвязи и подчиненности частных задач. Анализ связей и содержания групп параметров, характеризующих описание проектируемого устройства, позволяет дать возможность определить его атрибуты как основной элемент этого описания.

Действительно, сравнительная количественная оценка различных синтезируемых разновидностей проекта возможна только при условии его конкретизации на уровне атрибутов. Поэтому выбор рациональной конструктивной схемы и принципа действия возможно осуществить, неоднократно разрешая задачи параметрической оптимизации с использованием математических моделей, обеспечивающих учет особенностей каждой рассматриваемой разновидности проекта. Воздействия управления установкой также определяются значениями своих атрибутов, и нахождение эффективного управления рассматривается как определение оптимальных значений параметров алгоритма управления. Наконец, отклонения на атрибуты также рассматриваются в качестве дополнительных параметров, т.е. системы принятия решений широкого класса установок характеризуются задачами последовательной параметрической оптимизации.

На выделенном множестве задач проектирования совокупность рабочих показателей любого технического объекта однозначно определяется вектором изменяемых параметров, наличием функциональных связей

В качестве особенностей силовых модулей автономных устройств как объектов оптимизации [2] отмечается значительное разнообразие, количество и дискретность всего ряда изменяемых параметров. Часть параметров являются неизменными во времени, а другая, представляющая внешние воздействия, рассматривается как динамическая функция времени.

Многочисленность параметров ставит проблему выбора среди них такой группы взаимно независимых параметров оптимизации, которые определяют существо решаемой задачи. Принятие обобщенных параметров оптимизации, с одной стороны, уменьшает размерность задачи, а с другой – усложняет проблему получения разновидностей проектов, удовлетворяющих введенным ограничениям.

При моделировании электромагнитных процессов в разрядно-импульсных устройствах использована обобщенная схема замещения, представленная в виде преобразователя энергии, обеспечивающего питание согласующего трансформатора, напряжением необходимой амплитуды и частоты, высоковольтного трансформатора и нагрузки, которым является, например, озонатор. В работе были исследованы три основных типа преобразователей: регулятор напряжения, образованный двумя встречно-параллельно включенными тиристорами; резонансный инвертор с закрытым входом, образованным мостовой схемой тиристоров и включенных встречно-параллельно им диодов, при этом нагрузка включена в диагональ моста, в схеме использованы разделительный конденсатор и сглаживающий дроссель; резонансный инвертор с открытым входом, образованным мостовой схемой соединения встречно-параллельно управляемых и неуправляемых вентилей, в одной диагонали которого включен согласующий трансформатор с нагрузкой, а другая диагональ образована цепью индуктивности и емкости, обеспечивающей колебательных характер тока через управляемые вентили.

При моделировании приняты следующие допущения:

– вольт-амперная характеристика вентилей представлена в виде идеальных ключей;

– трансформатор заменен Т-образной схемой замещения.

Нагрузка представлена феноменологической схемой замещения озонатора в виде последовательных конденсаторов, характеризующих электрические емкости озонатора и разрядного промежутка, соответствующего состоянию озонатора до зажигания, и электрической емкости диэлектрического барьера, включенного последовательно с источником постоянного напряжения, соответствующего напряжению на разрядном промежутке после зажигания.

Значительная часть известных методов оптимизации не применима для оптимизации параметров рассматриваемых устройств ввиду целого ряда ограничений, а именно: наличия дифференцируемой функции принадлежности, отсутствия разрывов гиперповерхности отклика, ее гладкость, определенность области допустимых значений варьируемых переменных, невозможность получения глобального экстремума и т.д. Таких недостатков лишен предлагаемый метод оптимизации, в основе которого лежат аналогии эволюционных законов природы.

Данный метод оперирует наборами стрингов – сочетанием входных переменных. В качестве элемента стринга выступают реальные значения параметров.

Генетический алгоритм [3] оперирует с набором хромосом – сочетанием входных переменных. В отличие от традиционного генетического алгоритма, где хромосомы обычно создаются в виде бинарного представления, в качестве элементарной единицы хромосомы (гена) было принято реальное значение одного из изменяемых параметров. Данное представление не требует операции кодировки гена, а также оно более характерно к нахождению глобального решения поставленной задачи. Сочетание генов составляет одну хромосому (одно сочетание входных переменных).

В работе были использованы следующие обозначения генов:

– емкость диэлектрического промежутка нагрузки $C_б$;

– индуктивность намагничивания трансформатора L_0;

– отношение индуктивности намагничивания к индуктивности рассеяния трансформатора L_0 / L_s;

– частота колебательного контура, образованного индуктивностью намагничивания и собственной емкостью обмоток трансформатора

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{тр}}} .$$

Генетический алгоритм работает следующим образом. Решение начинается с разных точек гиперповерхности входных параметров одновременно, для этого случайным образом образуется некоторое количество хромосом, равное числу выборки m. Так формируется поколение родительских хромосом. Далее для каждой хромосомы определяется значение функции принадлежности. В качестве данного критерия нами принят аддитивный коэффициент, включающий в себя коэффициент использования трансформатора, определяющийся как отношение выходной ($P_{вых}$) к входной ($S_{тр}$) мощности трансформатора $k_{тр} = P_{вых} / S_{тр}$; коэффициент, обуславливающий производительность технологической установки и определяемый отношением времени пробоя

диэлектрического промежутка ($t_{\text{проб}}$) к периоду питающего напряжения (Т); $k_{\text{н}} = t_{\text{проб}} / T$; коэффициент устойчивости переходного процесса, обеспечивающий слежение за стабильностью формы кривой напряжений на нагрузке:

$$k_{\text{у}} = \frac{\sum_{i}^{N} k_{\text{уст}_i}}{N},$$

где N – число итераций за один период;

$$k_{\text{уст}_i} = \begin{cases} 1, & \text{при} \quad \left| U_{\text{пр}_{t_i}} - U_{\text{пр}_{t_i+T}} \right| < \xi; \\ 0, & \text{при} \quad \left| U_{\text{пр}_{t_i}} - U_{\text{пр}_{t_i+T}} \right| > \xi; \end{cases}$$

и коэффициент, обеспечивающий учет диапазона регулирования λ синтезируемого преобразователя

$$k_{\text{р}} = \lambda / \pi.$$

Таким образом, критерий выживаемости имеет вид

$$k = \frac{1}{4}(k_{\text{тр}} + k_{\text{н}} + k_{\text{у}} + k_{\text{р}}).$$

Затем осуществляется операция селекции – выбора наилучших хромосом и формирования следующего поколения. Здесь действует принцип – хромосомы, имеющие больший критерий выживаемости, имеют бóльшую вероятность быть отобранными в следующее поколение. Такой вероятностный подход справедлив для прохождения в следующее поколение не только лучших хромосом, но и хромосом, обладающих меньшим значением функции принадлежности, в целях создания возможности формирования поколения, характеризуемого улучшенными свойствами при дальнейшей итерации. При модификации использованы метод рулетки [4]: номеру хромосомы, имеющему больший критерий выживаемости, отводится больший сектор круга, и значит вероятность попадания случайного числа в данный сектор выше.

Работа этой операции не позволяет сформировать хромосому, обладающую отличительными от родительской свойствами для нахождения лучшей. Основной операцией, обеспечивающей достижение данной цели, является операция скрещивания, т.е. две соседние хромосомы, используя алгоритм одноточечной рекомбинации двух хромосом со случайным выбором точки кроссинговера, обмениваются генами с некоторой вероятностью скрещивания, формируя новую хромосому.

В целях недопущения быстрой сходимости к локальному минимуму, гены хромосом заменяются на случайное число, принадлежащее интервалу варьирования конкретного гена.

Сформированные таким образом новые хромосомы участвуют в операции селекции, формируя повое поколение, в целом обладающее лучшими свойствами.

Список использованных источников

1. **Костюкова, Т. П.** Моделирование и принятие технических решений при разработке преобразователей параметров электроэнергии / Т. П. Костюкова. – Уфа, 1999. – 220 с.

2. **Костюкова, Т. П.** Оптимизация силовых модулей автономных объектов на основе стохастических методов с самообучением / Т. П. Костюкова // Успехи современной науки и образования : Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 105 – 109.

3. **David E. Goldberg.** Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addision-Wesley Publishing Co., Inc, 1989.

4. **Костюкова, А. П.** Нейросетевые методы оценки состояния систем преобразования электроэнергии / Т. П. Костюкова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2017. – С. 275 – 279.

References

1. **Kostyukova, T. P.** Modelirovanie i prinjatie tehnicheskih reshenij pri razrabotke preobrazovatelej parametrov jelektrojenergii. – Ufa., 1999. – 220 p.

2. **Kostyukova, T. P** Optimizacija silovyh modulej avtonomnyh ob′ektov na osnove stohasticheskih metodov s samoobucheniemob′ekta v reljacionnoj baze Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal “Uspehi sovremennoj nauki i obrazovanija”. – 2017. – V. 5, № 2. – P. 105 – 109.

3. **David E. Goldberg.** Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addision-Wesley Publishing Co., Inc, 1989

4. **Kostyukova, A. P.** Nejrosetevye metody ocenki sostojanija sistem preobrazovanija jelektrojenergii // Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Tambov, 2017. – P. 275 – 279.

УДК 66.081.63

Хорохорина И. В., Лазарев С. И., Кочетов В. И.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752) 63-03-70, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ ОТ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Khorokhorina I. V., Lazarev S. I., Kochetov V. I.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 63-03-70, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

MODELING OF THE ULTRAFILTRATION PROCESS FOR INDUSTRIAL SOLUTIONS PURIFICATION FROMSURFACE-ACTIVESUBSTANCES

Аннотация. Выполнен анализ ламинарного течения раствора АПАВ по поверхности и мембран, что приводит возникновению явления концентрационной поляризации (КП), которое отрицательно воздействует на производительный процесс и качество разделения растворов. Аналитически исследована концентрационная поляризация для мембран с идеальным и неидеальным коэффициентом задержания при широком диапазоне изменения диффузионного числа Пекле в зависимости от количества отфильтрованного раствора для анионных поверхностно-активных веществ.

Ключевые слова: концентрационная поляризация, коэффициент задержания, ультрафильтрация, мембрана.

Abstract. The analysis of the laminar flow of the APAS solution on the surface and membranes was carried out, which causes the appearance of the phenomenon of concentration polarization, which negatively affects the productive process and the quality of the separation of solutions. The concentration polarization for membranes with an ideal and non ideal retention factor was studied analytically with a wide range of changes in the Peclet diffusion number depending on the amount of filtered solution for anionic surfactants.

Keywords: concentration polarization, retention coefficient, ultrafiltration, membrane.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В качестве основных ПАВ используются анионные вещества, которые обеспечивают достаточный моющий эффект и пенообразование. Для промышленных растворов содержание анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ), перспективными методам очистки являются мембранные процессы разделения при ламинарной протекании ультрафильтрации. Однако, как правило, в ламинарном режиме течения раствора АПАВ на поверхности мембран возникает явление концентрационной поляризации (КП), которое отрицательно воздействует на производительный процесс и качество разделения растворов [1 – 3].

Поэтому задача исследования и определения КП конкретно для АПАВ является актуальной. Она позволит при известных паспортных характеристиках мембран минимизировать негативные влияния КП и тем самым снизить концентрацию растворенного вещества на мембране [3 – 5].

Основная цель работы состоит в аналитическом исследовании КП для мембран с идеальным и неидеальным коэффициентом задержания $К_з$ при широком диапазоне изменения диффузионного числа Пекле (Pe) в зависимости от количества отфильтрованной жидкости для АПАВ. Сопоставить аналитические решения с численными результатами решения полной системы дифференциальных уравнений, описывающие конвективный массоперенос в плоском канале и провести сравнения полученных данных с экспериментом.

Рассмотрим два случая определения КП для идеальной и неидеальной мембраны.

1. Идеальные полупроницаемые мембраны, $К_з = 1$

Согласно общепринятому подходу значения КП определяются по формуле

$$\text{КП} = e^{|V/\beta|}, \tag{1}$$

где V – трансмембранная скорость потока растворителя, м/с;

$$V_{\text{КП}} = \frac{V}{U_{\text{ср}}},$$

где $U_{\text{ср}}$ – средняя скорость раствора, м/с; β – коэффициент массоотдачи, определяющий числа Шервуда Sh

$$\beta = \frac{Sh\,D}{4h},$$

$$Sh = a(\text{Re})^{0,33}(Sc)^{0,33}\left(\frac{2h}{l}\right)^{0,33},$$

$$Sc = \frac{\nu}{D},$$

где D – коэффициент диффузии в растворе, м^2/с; ν – кинематическая вязкость раствора, м^2/с; Re – число Рейнольдса; Sc – число Шмидта; l – длинна канала, м; h – полувысота канала, м; a – константа: 1,84 – для трубчатых каналов, 2,24 – для плоских каналов.

На основе полуинтегрального метода решения уравнения конвективной диффузии получена эмпирическая формула КП для идеальной полупроницаемой мембраны:

$$\text{КП} = 1 + 2\cdot\sqrt[3]{\frac{(\text{Pe}V_{\text{КП}})^2 V_{\text{КП}}x}{3(1-V_{\text{КП}}x)}} + \frac{(\text{Pe}V_{\text{КП}})^2 V_{\text{КП}}x}{3(1-V_{\text{КП}}x)}, \tag{2}$$

где x, y – безразмерные продольные и поперечные длины канала; $y = h/h$, $x = \xi/h$; ξh – продольная и поперечная координата канала, м; $\text{Pe} = \dfrac{U_{\text{ср}}h}{D}$ – число Пекле.

Формулы (1) и (2) позволят сравнить численные результаты с экспериментом для выбора мембраны с наилучшими характеристиками.

2. Мембраны с неидеальным коэффициентом задержания, $К_з < 1$.

Согласно анализу и обобщению данных получена инженерная формула для расчетов КП в широком диапазоне числа $PeV_{\text{КП}}$ ($10 \le \text{Pe}V_{\text{КП}} \le 1000$) для мембран с неидеальным коэффициентом задержания.

$$\text{КП} = \frac{1}{1-\text{К}_з-\alpha}\left[1-\alpha-\text{К}_з\left(2\cdot\sqrt[3]{\alpha^2\frac{V_{\text{КП}}x}{1-V_{\text{КП}}x}}+\frac{1}{1-V_{\text{КП}}x}\right)^{1-\frac{1-\text{К}_з}{\alpha}}\right], \quad (3)$$

где $\alpha \approx 3/(\text{Pe}V_{\text{КП}})^2$.

При $\text{К}_з = 1$ выражение переходит в уравнение концентрации на стенке (2).

Уравнение (3) позволяет определить КП, не прибегая к громоздким вычислениям системы дифференциальных уравнений, описывающих конвективный массоперенос в плоском канале в широком диапазоне чисел $\text{Pe}V_{\text{КП}}$ и для различных значений коэффициента задержания $\text{К}_з$ растворов АПАВ, $0{,}8 \le \text{К}_з \le 1$, которые относятся к сравнительно низкомолекулярным веществам [2].

Список использованных источников

1. **Дытнерский, Ю. И.** Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1986 – 272 с.
2. **Брык, М. Т.** Ультрафильтрация / М. Т. Брык, Е. А. Цапюк. – К. : Наукова думка, 1989. – 288 с.
3. **Математическое** описание массопереноса и методика расчета локальных коэффициентов массоотдачи в межмембранном канале баромембранных рулонных элементов / С. И. Лазарев, О. А. Абоносимов, А. А. Левин, Н. Н. Игнатов, С. И. Котенев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 9. – С. 16 – 18.
4. **О методике** исследования структуры течения потока в рулонных обратноосмотических аппаратах / О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, В. И. Кочетов, Д. А. Родионов, А. А. Левин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – С. 134 – 140.
5. **Математическое** описание теплопереноса и методика определения температурных характеристик электроультрафильтрационного процесса очистки промышленных растворов / С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, К. С. Лазарев, В. Ю. Богомолов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 11. – С. 6 – 9.

References

1. **Dytnerskij, Yu. I.** Baromembrannye processy. Teoriya i raschet. – M. : Himiya, 1986. – 272 c.
2. **Bryk M. T.**, Capyuk E.A. Ul'trafil'traciya. – K. : Naukova dumka, 1989. – 288 s.
3. **Matematicheskoe** opisanie massoperenosa i metodika rascheta lokal'nyh koehfficientov massootdachi v mezhmembrannom kanale baromembrannyh rulonnyh ehlementov / Lazarev S. I., Abonosimov O. A., Levin A. A., Ignatov N. N., Kotenev S. I. // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2018. – № 9. – S. 16 – 18.
4. **O metodike** issledovaniya struktury techeniya potoka v rulonnyh obratnoosmoticheskih apparatah / Abonosimov O. A., Lazarev S. I., Kochetov V. I., Rodionov D. A., Levin A. A. // Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj di-zajn : materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Tambov : Izd-vo FGBOU VO “TGTU”, 2017. – S. 134 – 140.
5. **Matematicheskoe** opisanie teploperenosa i metodika opredeleniya temperaturnyh harakteristik ehlektroul'trafil'tracionnogo processa ochistki promyshlennyh rastvorov / S. I. Lazarev, I. V. Horohorina, K. S. Lazarev, V. Yu. Bogomolov // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2017. – № 11. – S. 6 – 9.

УДК 681.327+514.18

Ли В. Г.
Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог
(Тел. +7(8634)371794, e-mail: livg48@mail.ru)

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ВИДЕОРЯДА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТА В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Lee V. G.
Southern Federal University, Russia, Taganrog
(Tel. +7(8634)371794, e-mail: livg48@mail.ru)

GEOMETRICAL TOOLS FOR CONSTRUCTING A VIDEO SEQUENCE OF THE WORKING AREA OF THE ASTRONAUT'S EXTRAVEHICULAR ACTIVITY IN A VIRTUAL MODELING ENVIRONMENT

Аннотация. Излагается геометрическая технология моделирования различных типов и ракурсов отображения внекорабельной деятельности космонавта на поверхности МКС в виртуальной среде.

Ключевые слова: визуализация, виртуальная среда, коллизии, настройка видов.

Abstract. The geometric technology of modeling various types and angles of displaying the astronaut’s extravehicular activity on the surface of the ISS in a virtual environment is described.

Keywords: visualization, virtual environment; collisions, setting up views.

Ранее в работе [1] излагались результаты исследования эффективности алгоритма автоматического выявления точек коллизий при моделировании внекорабельной деятельности (ВКД) космонавта, а также применения технологии гибридного интеллекта в системе дистанционного управления робототехническим средствами на поверхности МКС. В работах [2, 3] аналогичные задачи предлагалось решать методами математического моделирования. Однако обеспечить масштаб реального времени в тренажно-моделирующих комплексах виртуальной реальности весьма затруднительно, поскольку необходимо одновременно визуализировать рабочую среду с высокой степенью визуальной и динамической реалистичности.

Предлагается геометрический подход с привлечением программно-аппаратных средств трехмерной компьютерной графики. На предварительном этапе подготовки информации подготавливаются библиотеки виртуальных моделей различной степени детализации: космонавта в скафандре, космической станции; упрошенные геометрические модели отдельных блоков МКС; библиотеки движений и манипуляций, визуальных спецэффектов и пр.

На этапе планирования сеансов моделирования ВКД космонавта в интерактивном режиме осуществляется конструирование маршрута движения (траектории), задаются параметры движения и ориентации, другие динамические характеристики. Затем в автоматическом режиме формируется траектория перемещения космонавта.

На этапе визуализации подключаются программные модули матричных преобразований и задаются параметры визуализации. При этом возможны два вида синтезируемых сцен: моно- и стереоизображения. В зависимости от расположения точки взгляда и ориентации оси визирования возможны следующие три режима работы визуализатора (рис. 1):

– обзор из неподвижной точки, которая может располагаться в произвольной точке пространства в системе координат виртуальной модели МКС $0_c x_c y_c z_c$ (ось визирования ориентирована в направлении начала координат перемещающейся виртуальной модели космонавта – $0_к$);

– обзор из неподвижной точки, которая располагается в произвольном месте в локальной системе координат космонавта $0_к x_к y_к z_к$ (режим «автосопровождения», ось визирования ориентирована вдоль оси $0_к x_к$);

– обзор из точки, расположенной в области глаз виртуальной модели космонавта (по умолчанию ось визирования параллельна оси $0_к x_к$).

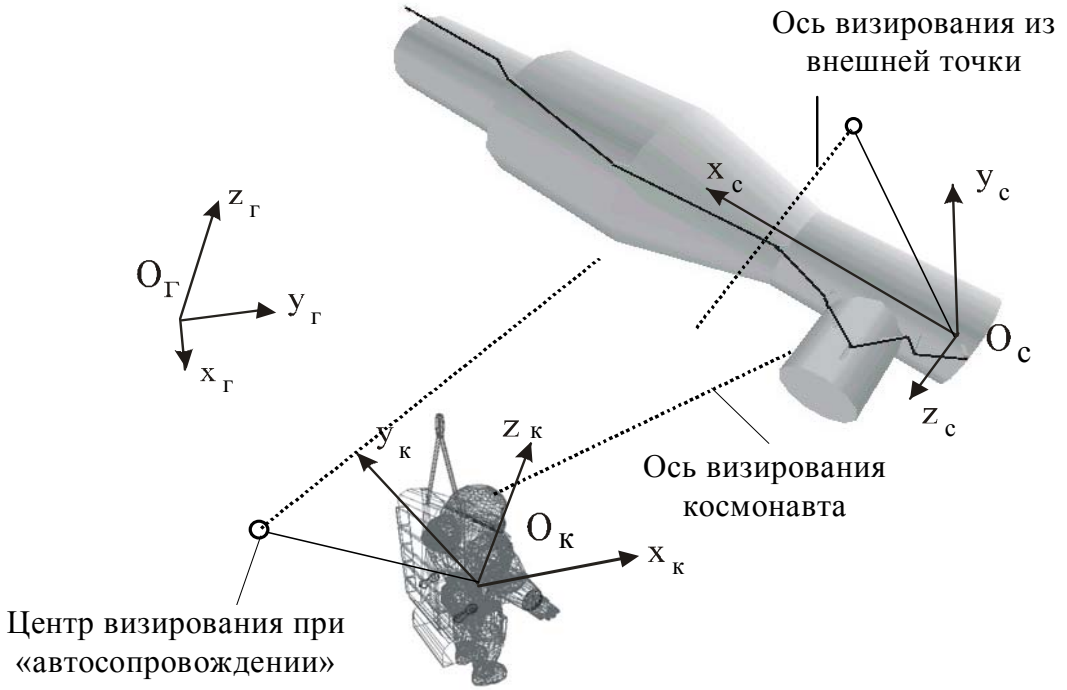


Рис. 1. Геометрическая схема локальных систем координат и осей визирования для отображения виртуальных сцен тренажа ВКД

В процессе сеанса моделирования оператор тренажа имеет возможность интерактивно изменять режимы визуализации, настройки видов изображения.

В программную структуру визуализатора включены датчики состояний объектов моделируемых сцен, отражающих параметры и характеристики объектов, которые передаются посредством соответствующих интерфейсов в экспертную систему поддержки деятельности оператора робототехнических средств МКС.

Опуская подробное описание программной среды комплекса, покажем лишь элементы пользовательского интерфейса для виртуального тренажа внекорабельной деятельности космонавта-оператора.

В программе *Demo2.up* на экране монитора синтезируется изображение одного из модулей МКС и виртуальной модели космонавта, движущегося по заранее запланированной траектории.

После запуска программы пользователь наблюдает за перемещением космонавта, причем точка взгляда (наблюдения) расположена непосредственно на уровне его глаз (взгляд глазами космонавта).

При нажатии клавиши «*A*» взгляд перемещается в фиксированную точку, положение которой можно изменять при помощи мыши. Повторное нажатие клавиши «A» возвращает точку взгляда в положение «взгляд глазами космонавта».

При нажатии клавиши «*V*» точка взгляда следует за перемещением космонавта, при этом совместное использование клавиш «←», «→», «↑», «↓», «+», «–» позволяет выбрать необходимый ракурс. Повторное нажатие клавиши «*V*» отключает данный режим.

Клавиша «*T*» – вкл./выкл. текстур.

Клавиша «*P*» – вкл./выкл. поверхностной модели.

На рисунках 2 и 3 представлены кадры визуализации рабочих моментов сеанса моделирования, соответствующие двум видам синтезируемых виртуальных сцен.

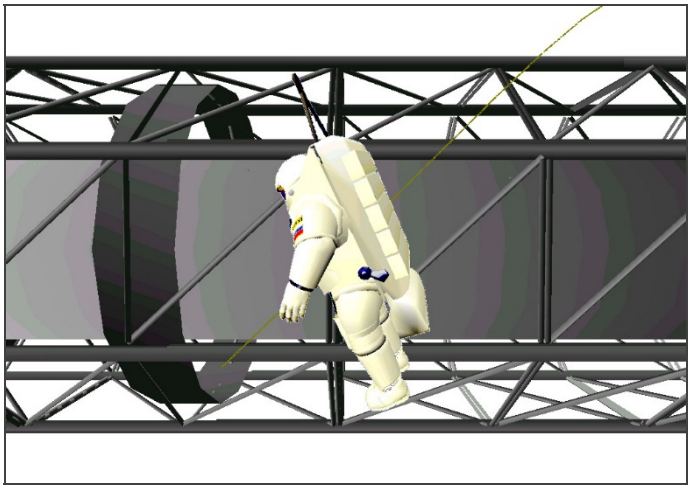


Рис. 2. Кадр моновизуализации виртуальной сцены ВКД в режиме автосопровождения

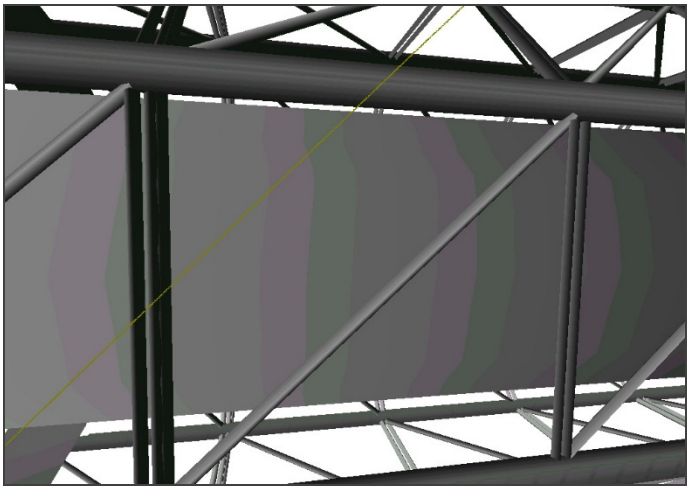


Рис. 3. Кадр моновизуализации виртуальной сцены ВКД в режиме «взгляд глазами космонавта»

Демонстрационная программа интерактивной стереоскопической визуализации траектории перемещения космонавта реализована в среде *WorldUp*. Данная программа демонстрирует движение объекта (космонавта) по заданной траектории. Объект передвигается по траектории вокруг одного из блоков МКС. Разработаны две версии программы: *Stereo.up* и *Video.up*. Программа *Stereo.up* демонстрирует работу в режиме стереоизображения, программа *Video.up* демонстрирует работу в режиме моноизображения.

Во время работы любой из демонстрационных программ существует возможность изменения точки наблюдения камеры. По нажатию клавиши «а», можно наблюдать за объектом движения из отдаленной точки, а при повторном нажатии камера будет двигаться вместе с объектом движения, при этом траектория взгляда автоматически направлена на космонавта.

Для просмотра программы в стереорежиме необходимы стереоочки и специальные настройки программы и окружения операционной среды.

Для демонстрации кинематики движений элементов виртуальной модели человека в скафандре разработана программа, показывающая возможности движения космонавта (руки, ноги).

При движении модели космонавта в виртуальном пространстве по заданной траектории необходимо непрерывное решение задачи определения фактов ее столкновения с объектами сцены (задача «коллизий»).

Алгоритм моделирования поведения объекта при столкновении с препятствиями можно построить по аналогии с решением задачи «математического бильярда». Разработанная система моделирования тестировалась на решении этой известной задачи геометрического моделирования. При решении задачи на плоскости имеем аналог плоской физической задачи отражения луча, что моделирует поведение геометрического объекта – точки. В пространственном случае решение данной задачи теоретически не отличается от предыдущей. Однако в этом случае вектор направления движения объекта после столкновения с препятствием должен лежать в одной плоскости с вектором нормали и вектором направления движения до столкновения.

На рисунке 4 представлены кадры эксперимента моделирования пространственного «математического бильярда» (три перспективные проекции) в замкнутом пространстве параллелепипеда с двумя помещенными в него препятствиями также в форме параллелепипедов. Показана траектория перемещения центра масс шарика. Модели – поверхностные.

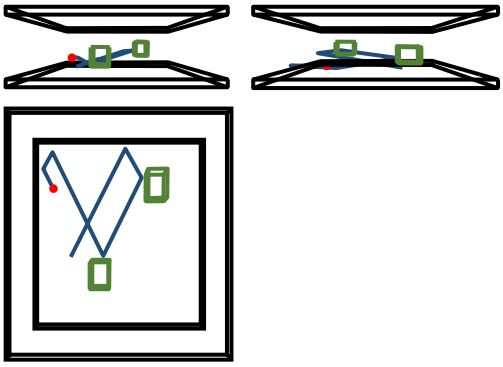


Рис. 4. Экспериментальное исследование алгоритма наличия точек коллизий в трехмерной среде «математического бильярда»

Список использованных источников

1. **Ли, В. Г.** Моделирование коллизий при движении РТС в виртуальном пространстве / В. Г. Ли ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. III Междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – Вып. 3, Т. II. – С. 127 – 131.

2. **Михайлюк, М. В.** Алгоритм определения коллизий капсул и боксов / М. В. Михайлюк, А. М. Трушин ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – Вып. 4, Т. I. – С. 159 – 163.

3. **Трушин, А. М.** Определение коллизий аппроксимирующих сфер и прямоугольных параллелепипедов в системах трехмерного моделирования / А. М. Трушин // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4. – С. 105 – 109.

References

1. **Li, V. G.** Modelirovaniye kolliziy pri dvizhenii RTS v virtualnom prostranstve // Virtualnoye modelirovaniye. prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 3 t. / pod obshch. red. V. A. Nemtinova ; FGBOU VO «TGTU». – Tambov : Izd-vo FGBOU VO “TGTU”. 2016. – Vyp. 3, T. II. – S. 127 – 131.

2. **Mikhaylyuk, M. V.** Algoritm opredeleniya kolliziy kapsul i boksov / M. V. Mikhaylyuk. A. M. Trushin // Virtualnoye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 3 t. / pod obshch. red. V. A. Nemtinova; FGBOU VO “TGTU”. – Tambov : Izd-vo FGBOU VO “TGTU”. 2017. – Vyp. 4, T. I. – S. 159 – 163.

3. **Trushin, A. M.** Opredeleniye kolliziy approksimiruyushchikh sfer i pryamougolnykh parallelepipedov v sistemakh trekhmernogo modelirovaniya // Programmnyye produkty i sistemy. – 2015. – № 4. – S. 105 – 109.

УДК 678.028

Дмитриев О. С., Худяков В. В., Дмитриев А. О.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630369, e-mail: phys@nnn.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Dmitriev O. S., Khudiakov V. V., Dmitriev A. O.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630369, e-mail: phys@nnn.tstu.ru)

SIMULATION OF MASS TRANSFER IN CURING OF POLYMER COMPOSITES

Аннотация. Рассматривается математическое моделирование процесса массопереноса при отверждении изделий из полимерных композитов, изготавливаемых методом автоклавного вакуумного формования. Предложенная математическая модель нацелена на использование экспериментально определяемых параметров и пригодна для расчета температурно-конверсионных полей отверждения изделий из композитов

Ключевые слова: математическая модель, массоперенос, процесс отверждения, полимерные композиты.

Abstract. Mathematical modeling of the mass transfer process during the curing of polymer composite parts produced using the method of autoclave vacuum molding is considered. The proposed mathematical model is aimed at using experimentally determined parameters and is suitable for calculating the temperature and conversion fields of curing composite parts.

Keywords: mathematical model, mass transfer, curing process, polymer composites.

Полимерные композиты (ПК) являются одними из наиболее перспективных полимерных материалов конструкционного назначения. Процесс отверждения ПК включает тепломассоперенос и химическую кинетику. Часто, используемой технологией для изготовления крупногабаритных композитных изделий является автоклавное вакуумное формование в технологическом пакете. Качество изделий из ПК определяется оптимальностью температурно-временнóго режима и возникает необходимость в математическом моделировании процесса тепло- и массопереноса [1].

Построение математической модели массопереноса является наиболее сложной и ответственной задачей, так как учет всех технологических особенностей процесса автоклавного вакуумного формования в технологическом пакете определяет адекватность модели и ее пригодность для расчета режима отверждения [2]. Поэтому проанализируем процесс выдавливания связующего из препрега изделия во впитывающий слой.

В начале процесса отверждения $t = 0$ технологический пакет, включающий слои препрега (волокно, пропитанное связующим), впитывающий слой, цулагу, дренажный слой, подвергается температурному воздействию по определенному режиму. При достижении определенной температуры в момент $t_р$ в автоклаве создается давление P_0 , а в технологическом пакете разряжение. В результате связующее выдавливается из

препрега и перетекает во впитывающий слой, т.е. происходит фильтрация связующего перпендикулярно направления волокон наполнителя. Кроме того, в плоскости изделия течение связующего отсутствует, при этом проекции скорости течения w_y и w_z по координатам y и z, будут равны нулю. В соответствии с уравнением неразрывности массовая скорость течения связующего из препрега во впитывающий слой имеет вид

$$\frac{dM_{\text{св}}}{dt} = \rho_{\text{св}} S w_x, \tag{1}$$

где $M_{\text{св}}$ – масса связующего, кг; S – площадь изделия, м^2; w_x – скорость фильтрации связующего по координате x, м/с; $\rho_{\text{св}}$ – плотность связующего, кг/м^3.

При фильтрации скорость течения связующего через слой армирующего наполнителя (волокно или ткань) описывается законом Дарси

$$w_x = -\frac{k_{\text{тк}}}{\mu}\left(\frac{dP}{dx} - \rho_{\text{св}} g\right), \tag{2}$$

где $k_{\text{тк}}$ – коэффициент проницаемости армирующего наполнителя (ткани, волокна), м^2; g – ускорение свободного падения, м/с^2; P – давление, Па; d – динамическая вязкость связующего, Па·с; $\rho_{\text{св}}$ – плотность связующего, кг/м^3.

Одним из параметров уравнения Дарси (2) является зависящая от температуры вязкость связующего d. В наших расчетах вязкость связующего, учитывая распределение температуры по толщине изделия, будем считать среднеинтегральной величиной

$$\overline{\mu}(t) = \frac{1}{\ell_{\text{тк}}} \int\limits_{L_2(t)-\ell_{\text{тк}}(t)}^{L_2(t)} \mu(x,t)dx. \tag{3}$$

С учетом уравнения движения (2) и среднеинтегральной вязкости связующего (3), массовая скорость течения связующего (1) из препрега примет вид

$$\frac{dM_{\text{св}}}{dt} = -\rho_{\text{св}} S \frac{P_{\text{в}} + P_0 - \rho_{\text{св}} g \cdot \left[\ell_{\text{тк}}(t) + \ell_{\text{вс}}(t)\right]}{\frac{1}{k_{\text{тк}}} \int\limits_{L_2(t)-\ell_{\text{тк}}(t)}^{L_2(t)} \mu dx + \frac{1}{k_{\text{вс}}} \int\limits_{L_2(t)}^{L_2(t)+\ell_{\text{вс}}(t)} \mu dx}. \tag{4}$$

Решение уравнения (4) позволит получить массовую скорость течения связующего из препрега и величину содержания связующего в препреге изделия. Однако на производстве необходимо изготавливать сложные изделия, и полученная модель не будет полностью описывать процесс получения таких изделий. Поэтому для дальнейшего использования модели представим уравнение (4) относительно толщины изделия, которое возможно измерять и контролировать в производственных условиях. В этом случае толщину препрега выразим в виде двух слагаемых: сжатого наполнителя $L_{\text{тк}}$ и эквивалентной толщины связующего $L_{\text{св}}$. Начальную толщину изделия представим как

$$L_2(0) = L_{\text{тк}} + L_{\text{св}}(0).$$

Скорость изменения эквивалентной толщины связующего в препреге, составляющая основу модели массопереноса, может быть получена из уравнения (4)

$$\frac{dL_{\text{св}}(t)}{dt} = -\frac{P_{\text{в}} + P_0 - \rho_{\text{св}} g \cdot [\ell_{\text{тк}}(t) + \ell_{\text{св}}(t)]}{\frac{1}{k_{\text{тк}}} \int\limits_{L_2(t)-\ell_{\text{тк}}(t)}^{L_2(t)} \mu(x,t)dx + \frac{1}{k_{\text{вс}}} \int\limits_{L_2(t)}^{L_2(t)+\ell_{\text{вс}}(t)} \mu(x,t)dx}. \quad (5)$$

Для решения дифференциального уравнения математической модели массопереноса (5) необходимо начальное условие. При его определении необходимо учитывать начальное $\gamma_{\text{н}}$, конечное $\gamma_{\text{к}}$ и мгновенное γ содержание связующего в препреге. Начальная эквивалентная толщина связующего, являющаяся начальным условием для решения уравнения (5), получена на основе изменения содержания связующего от $\gamma_{\text{н}}$ до $\gamma_{\text{к}}$:

$$L_{\text{св}}(0) = L_2(0)\frac{\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{к}}}{1 - \gamma_{\text{к}}}.$$

В этом случае расчетная толщина изделия в зависимости от времени примет вид

$$L_2(t) = L_2(0)\frac{1 - \gamma_{\text{н}}}{1 - \gamma_{\text{к}}} + L_{\text{св}}(t).$$

Течение связующего во впитывающий слой происходит только через сжатые слои препрега. Тогда скорость течения определяется как

$$w_x = \frac{dL_{\text{св}}}{dt}.$$

В слоях ниже $L_2(t) - \ell_{\text{тк}}(t)$, где уплотнение еще не произошло, течение связующего отсутствует.

Предложенная модель описывает изменение толщины плоского изделия из ПК, являющееся результатом выдавливания связующего в перпендикулярном к формообразующей оснастке направлении из препрега во впитывающий слой, и необходима для расчета остаточного содержания связующего в композите. Вместе с системой дифференциальных уравнений теплопроводности и кинетики отверждения она образует математическую модель процесса тепломассопереноса при отверждении изделий из ПК.

Большинство параметров в предложенной математической модели представляют собой функции температуры T, степени отверждения, содержания связующего или времени t, которые необходимо определять экспериментально [3]. Для их определения разработана специализированная информационно-измерительная система, позволяющая проводить исследования этих параметров в процессе отверждения [4].

Решение уравнения математической модели массопереноса совместно с уравнениями теплопереноса и химической кинетики позволит рассчитывать вязкость μ, скорость течения w, количество выдавленного из препрега связующего, текущий коэффициент наполнения и текущую толщину изделия $L(t)$ в данный момент времени.

Таким образом, разработана математическая модель массопереноса при отверждении изделий из полимерных композитов, получаемых методом вакуумного формования, пригодная для расчета температурно-конверсионных полей отверждающегося композита. Разработанная модель положена в основу алгоритмического и программного обеспечения системы компьютерного моделирования и расчета оптимальных технологических режимов отверждения изделий из ПК различной толщины [1, 4].

Список использованных источников

1. **Оптимизация** режима отверждения изделий из полимерных композитов на основе клеевых препрегов / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, С. В. Мищенко, С. О. Дмитриев // Клеи, герметики, технологии. – 2009. – № 5. – С. 17 – 24.

2. **Дмитриев, О. С.** Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 390 – 399.

3. **Дмитриев, О. С.** Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 53 – 61.

4. **Автоматизированная** система исследования процесса отверждения композиционных полимерных материалов / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, Н. П. Пучков, А. В. Шаповалов // Промышленная теплотехника. – 1989. – Т. 11, № 5. – С. 79 – 84.

References

1. **Optimizatciia** rezhima otverzhdeniia izdelii iz polimernykh kompozitov na osnove kleevykh prepregov / O. S. Dmitriev, V. N. Kirillov, S. V. Mishchenko, S. O. Dmitriev // Klei, germetiki, tekhnologii. – 2009. – № 5. – S. 17 – 24.

2. **Matematicheskoe** modelirovanie protsessa otverzhdeniya izdeliya iz polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom goryachego pressovaniya / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, S. V. Ponomarev // Vestnik Tambovskogogosudarstvennogotehnicheskogouniversiteta. – 1998. – T. 4, № 4. – S. 390 – 399.

3. **Metod** issledovaniia parametrov techeniia sviazuiushchego pri otverzhdenii kompozitov / O. S. Dmitriev, S. V. Mishchenko, A. O. Dmitriev // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2005. – T. 11, № 1. – S. 53 – 61.

4. **Avtomatizirovannaia** sistema issledovaniia protcessa otverzhdeniia kompozitcionnykh polimernykh materialov / S. V. Mishchenko, O. S. Dmitriev, N. P. Puchkov, A. V. Shapovalov // Promyshlennaia teplotekhnika. – 1989. – T. 11, № 5. – S. 79 – 84.

УДК 66.081.6

Лазарев С. И., Ковалев С. В., Коновалов Д. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630370, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА

Lazarev S. I., Kovalev S. V., Konovalov D. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. (4752)630370, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

IMPROVEMENTOF THE DESIGN OF ELECTROBARMEMBRANEAPPARATUS

Аннотация. В работе представлена конструкция электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа, которая позволяет увеличить площадь в единице объема аппарата, увеличить качество и эффективность разделения растворов. Рассчитано, что при данном конструктивном исполнении аппарата увеличена полезная рабочая площадь для разделения растворов в единице объема аппарата на 16,9% при сравнении с имеющимися аналогами.

Ключевые слова: мембрана, раствор, разделение, аппарат, процесс.

Abstract. The paper presents the design of an electrobarmembrane apparatus of a flat-chamber type, which allows increasing the area per unit volume of the apparatus, increasing the quality and efficiency of the separation of solutions. It is calculated that with this design, the effective working area for the separation of solutions per unit volume of the apparatus is increased by 16.9% when compared with existing analogues.

Keywords: membrane, solution, separation, apparatus, process.

Электробаромембранные технологии разделения и извлечения (выделения) веществ из промышленных стоков и растворов являются востребованными в настоящее время, так как позволяют получать на завершающем этапе очистки, содержащие потоки веществ, содержащие в составе кислоты и щелочи [1 – 4]. Это утверждение является актуальным из-за избирательности выделения веществ, при наложении на исследуемую систему «мембрана–раствор» разности электрических потенциалов и давлений, до и после мембраны. Потоки прикатодного и прианодного пермеата, содержащие основания и кислоты, можно отправлять на вторичную обработку и возвращать обратно в технологическую линию производства определенных компонентов (например, производство электрохимическим синтезом химикатов-добавок для полимерных материалов). Отличительной особенностью разработанной конструкции электробаромембранного аппарата является наличие схем разделения на потоки прианодного ретентата и прикатодного пермеата и прикатодного ретентата и прианодного пермеата. Наличие таких схем разделения растворов позволит в реальных процессах получать подкисленные и подщелоченные потоки технологических жидкостей. При этом актуальным остается разработка оптимизированных конструкций электробаромембранных аппаратов с увеличенной площадью разделения в единице аппарата и получении пермеата большим объемом.

При анализе отечественных и зарубежных литературных источников, занимающихся мембранными процессами разделения растворов, не обнаружено работ, в которых представлены конструкции плоскокамерных аппаратов, разработанные на данных принципах разделения, за исключением [5 – 7].

Конструкция аппарата работы [7] отличается от разработанного аппарата тем, что требует расхода конструкционного материала – капролона на изготовление чередующихся камер корпуса с тремя профилями полуэллиптической формы и дополнительных временных затрат инженера-проектировщика на подбор толщины профиля полуэллиптической формы, что, в свою очередь, влияет на прочность и жесткость фланцевого соединения аппарата. Конструирование аппаратов плоскокамерного типа, основанное на данном принципе разделения растворов с конструктивным оформлением, представлено в работах [5, 6].

При оптимизации элементов аппарата представим конструктивный вариант, обеспечивающий увеличенную эффективную площадь разделения растворов, рис. 1.

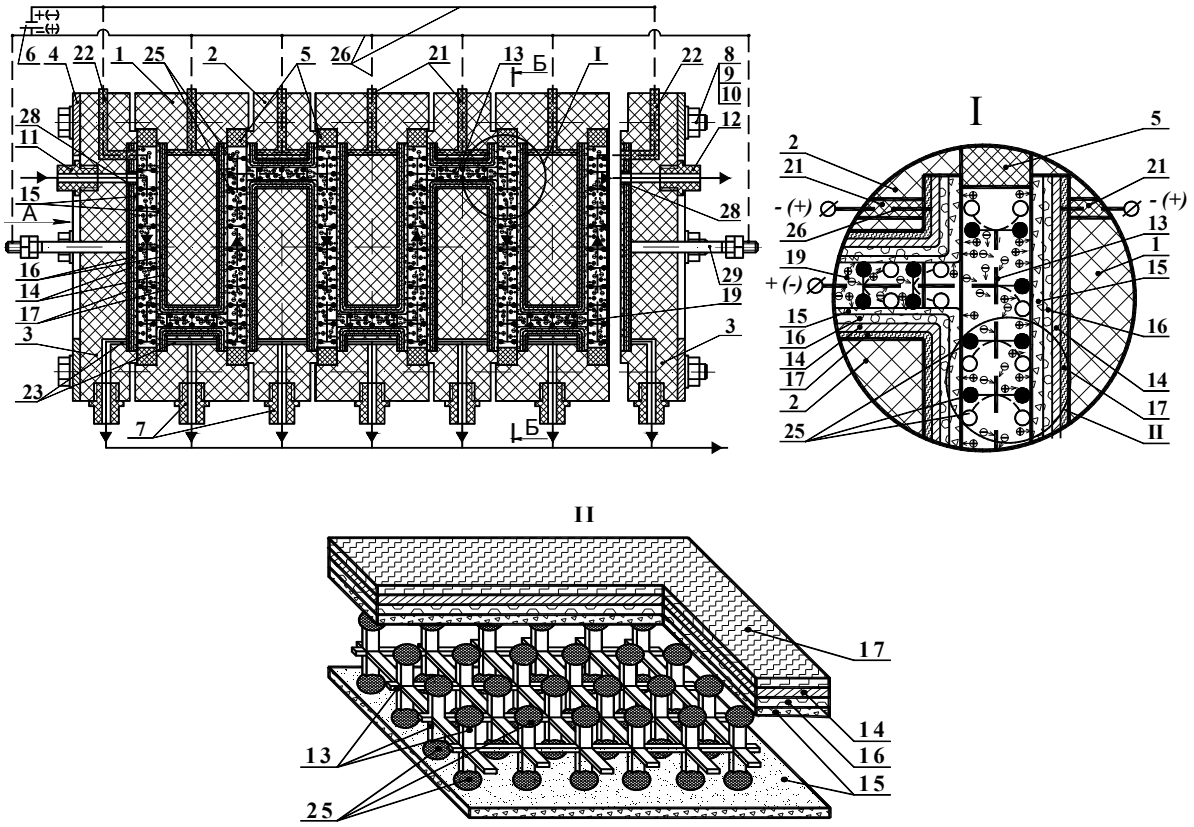


Рис. 1. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа:
1, *2* – чередующиеся диэлектрические камеры корпуса; *3* – диэлектрический фланец корпуса; *4* – металлическая пластина; *5* – прокладка; *6* – устройство для подвода постоянного электрического тока; *7* – штуцер для отвода прикатодного или прианодного пермеата; *8*, *9*, *10* – болт, шайба, гайка; *11*, *12* – штуцеры ввода и вывода разделяемого раствора; *13* – сетка-турбулизатор; *14* – монополярно-пористый электрод-пластина; *15* – мембрана (прикатодная или прианодная); *16* – пористая подложка; *17* – дренажная сетка; *19* – переточное эллиптическое окно; *21*, *22* – полимерный компаунд; *23* – канал для отвода прикатодного или прианодного пермеата; *25* – диэлектрический элемент; *26* – электрические провода; *28* – полимерная композиция; *29* – металлическая шпилька

Электробаромембранный аппарат, представленный на рис. 1, работает следующим образом. Исходный раствор под давлением, превышающим осмотическое давление растворенных в нем веществ, через штуцер *11* ввода разделяемого раствора, расположенного на диэлектрическом фланце корпуса *3* с металлической шпилькой *29*, подается, минуя полимерную композицию *28*, в первую камеру разделения, образованную мембраной *15*, прокладкой *5*, и мембраной *15*, расположенной на диэлектрической камере корпуса с «впадиной» *1*. В этот же момент времени к камерам корпуса с «впадиной» и с «выступом» *1* и *2* (рис. 2) и фланцам корпуса *3* с металлической шпилькой *29*, включением устройства *6* к аппарату подводится внешнее постоянное электрическое поле с заданной плотностью тока.

Раствор, двигаясь, перемешивается с помощью сетки-турбулизатора *13*, рис. 1, представляющей собой расположенные под углом 90 градусов в одной плоскости набор прямолинейных элементов одинаковой длины, которые соединены между собой так же как и в местах данных соединений под углом 90 градусов во взаимно перпендикулярной плоскости, к которой прикреплены прямолинейные элементы одинаковой длины, на концах которых расположены диэлектрические элементы *25*, касающиеся поверхностей мембран *15*, расположенных на диэлектрическом фланце корпуса *3* с металлической шпилькой *29* и диэлектрической камере корпуса с «впадиной» *1*, и поступает к мембранам *15*.

Из образовавшейся между прикатодными или прианодными мембранами *15* и прокладкой *5* камеры разделения, рис. 1, катионы или анионы, проникающие через прикатодную или прианодную мембраны *15*, пористые подложки из ватмана *16*, монополярные-пористые электроды-пластины *14* и дренажную сетку *17* уложенные последовательно друг на друге, проходят в пространстве между диэлектрическим фланцем корпуса *3* с металлической шпилькой *29* и монополярно-пористом электроде-пластине *14* и диэлектрической камере корпуса с «впадиной» *1* и монополярно-пористом электроде-пластине *14* по каналам 23 для отвода прикатодного или прианодного пермеата в зависимости от схемы подключения «минус» или «плюс», отводятся в виде оснований или кислот.

Оставшиеся анионы или катионы, движущиеся в камере разделения в ядре потока сетки-турбулизатора *13*, переходят через переточное эллиптическое окно *19* (рис. 1), увеличенной площади в диэлектрической камере корпуса с «впадиной» *1*, в следующую камеру разделения, образованную соединенными выступ-впадиной между собой диэлектрическими камерами корпуса *1* и *2*, в виде кислот или оснований в зависимости от схемы подключения «плюс» или «минус».

Раствор переходит из камеры в камеру по переточным эллиптическим окнам *19* увеличенной площади в чередующихся диэлектрических камерах корпуса с «впадиной» и с «выступом» *2* и *1* всего аппарата (рис. 1), где происходит аналогичное разделение, катионы или анионы отводятся с пермеатом через прикатодную или прианодную мембраны *15* по штуцерам *7* для отвода прикатодного или прианодного пермеата в зависимости от схемы подключения «минус» или «плюс», в виде оснований или кислот, а анионы или катионы отводятся с прианодным или прикатодным ретентатом последовательно в ядре потока сетки-турбулизатора *13*, через штуцер *12* вывода разделяемого раствора в виде кислот или оснований.

Исходный раствор, протекая по всем камерам разделения последовательно через весь межмембранный канал от одного диэлектрического фланца корпуса до второго, рис. 1, очищается от анионов или катионов в зависимости от схемы подключения «минус» или «плюс», причем в прикатодном или прианодном пермеате и прианодном или прикатодном ретентате содержатся различные растворенные газы, выделившиеся на электродах в результате электрохимических реакций.

Схема мембраны электробаромембранного аппарата с переточным эллиптическим окном увеличенной площади представлена на рис. 2.

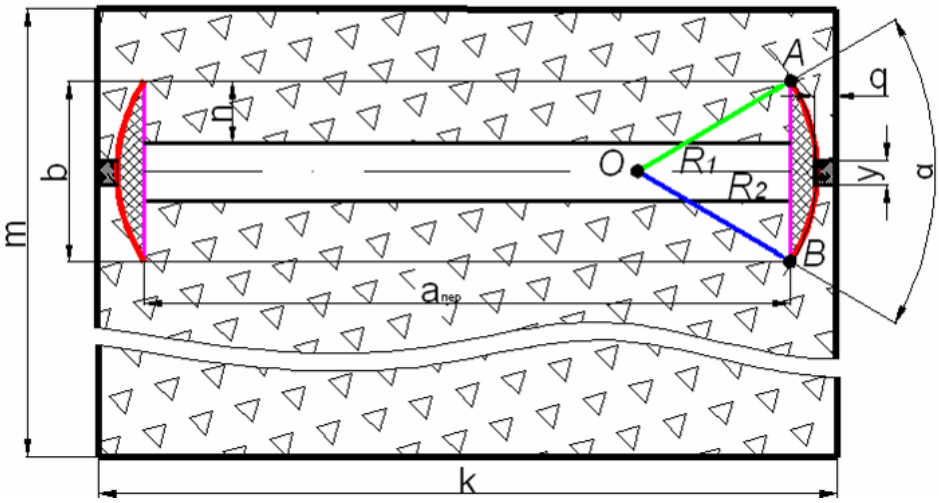


Рис. 2. Схема мембраны с переточным эллиптическим окном

Разработанная конструкция электробаромембранного аппарата, представленного в настоящей работе, позволяет по сравнению с аппаратом работ [5, 6] увеличить полезную рабочую площадь разделения в единице объема аппарата на 16,9% без учета расположения мембран на боковых фланцах корпуса аппарата и соответственно увеличить количество пермеата с потоками технологических жидкостей, содержащих подкисленные и подщелоченные растворы на выходе из аппарата.

Предложена перспективная конструкция сетки-турбулизатора раствора, находящегося в межмембранном канале электробаромембранного аппарата, которая позволяет постоянно разрушать диффузионные слои у поверхности мембран и, как следствие, снижать концентрационную поляризацию, так как элементы сетки-турбулизатора, касающиеся мембраны, являются изолированными и подвижными.

Список использованных источников

1. **Дытнерский, Ю. И.** Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1978. – 352 с.

2. **Дытнерский, Ю. И.** Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1986. – 272 с.

3. **Москвин, Л. Н.** Методы разделения и концентрирования в аналитической химии / Л. Н. Москвин, Л. Г. Царицина. – Л. : Химия, 1991. – 256 с.

4. **Горбачев, А. С.** Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатсодержащих растворов (в производстве оптических отбеливателей) : дис. ...

канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 25.12.2006 / А. С. Горбачев. – Тамбов, 2006. – 197 с.

5. **Пат.** на изобретение № RU 2403957, 20.11.2010, МПК B01D 61/42, B01D 61/46. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа / Ковалев С. В., Лазарев С. И., Чепеняк П. А., Данилов А. Ю., Лазарев К. С.

6. **Проектирование** и расчет электробаромембранных аппаратов плоскокамерного типа для очистки промышленных стоков / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, В. И. Кочетов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 5. – С. 5 – 9.

7. **Пат.** на изобретение № RU 2447930,20.04.2012, МПК B01D 61/42, B01D 61/14. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа / Ковалев С. В., Лазарев С. И., Кормильцин Г. С., Лазарев К. С., Ковалева Т. Д., Ворожейкин Ю. А., Эрлих А. В.

References

1. **Dytnerskiy, Yu. I.** Obratnyy osmos i ultrafiltratsiya / Yu. I. Dytnerskiy. – M. : Khimiya. 1978. – 352 s.

2. **Dytnerskiy, Yu. I.** Baromembrannye processy. Teoriya i raschet / Yu. I. Dytnerskij. – M. : Khimiya, 1986. – 272 s.

3. **Moskvin, L. N.** Metody razdeleniya i kontsentrirovaniya v analiticheskoy khimii / L. N. Moskvin. L. G. Tsaritsina. – L. : Khimiya. 1991. – 256 s.

4. **Gorbachev, A. S.** Kinetika ehlektrobaromembrannogo razdeleniya vodnyh sul'fatso-derzhashchih rastvorov (v proizvodstve opticheskih otbelivatelej) : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.17.08 : zashchishchena 25.12.2006 / Gorbachev Aleksandr Sergeevich. – Tambov, 2006. – 197 s.

5. **Kovalev, S. V.**, Lazarev, S. I., Chepenyak, P. A., Danilov, A. Yu., Lazarev, K. S. Elektrobaromembrannyy apparat ploskokamernogo tipa. Patent na izobreteniye № RU 2403957. 20.11.2010. MPK B01D 61/42. B01D 61/46.

6. **Proyektirovaniye** i raschet elektrobaromembrannykh apparatov ploskokamernogo tipa dlya ochistki promyshlennykh stokov / K. S. Lazarev, S. V. Kovalev, S. I. Lazarev, V .I. Kochetov // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. – 2013. – № 5. – S. 5 – 9.

7. **Kovalev, S. V.**, Lazarev, S. I., Kormiltsin, G. S., Lazarev, K. S., Kovaleva, T. D., Vorozheykin, Yu. A., Erlikh, A. V. Elektrobaromembrannyy apparat ploskokamernogo tipa. Patent na izobreteniye № RU 2447930. 20.04.2012. MPK B01D 61/42. B01D 61/14.

УДК 66.084.2:631.316.22

Новиков А. Е.[1, 2, 4], Борисенко И. Б.[3], Чамурлиев О. Г.[3], Чамурлиев Г. О.[4], Плющиков В. Г.[4]

[1]Волгоградский государственный технический университет, Россия, Волгоград,
[2]Всероссийский НИИ орошаемого земледелия, Россия, Волгоград,
[3]Волгоградский государственный аграрный университет, Россия Волгоград,
[4]Российский университет дружбы народов, Россия, Москва
(Тел. +79275137065, e-mail: novikov-ae@mail.ru)

ВОЛНОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗАКРЫТЫХ ПОЧВОГРУНТОВ

Novikov A. E.[1, 2, 4], Borisenko I. B.[3], Chamurliev O. G.[3], Chamurliev G. O.[4], Plyushchikov V. G.[4]

[1]Volgograd State Technological University, Russia, Volgograd,
[2]All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Russia, Volgograd,
[3]Volgograd State Agrarian University, Russia, Volgograd,
[4]Peoples' Friendship University of Russia, Russia, Moscow
(Tel. +7 9275137065, e-mail: novikov-ae@mail.ru)

WAVE DESTRUCTION OF CLOSED SOILS

Аннотация. При блокированном резании закрытых почвогрунтов на вибрирующей режущей кромке долота происходит формирование конуса деформации из-за циклического и скоротечного сжатия газовой фазы, которая становится носителем кинетической энергии, трансформированной в виде высокочастотных сверхзвуковых ударных волн.

Ключевые слова: разрушение, ударные волны, закрытые почвогрунты, скорость звука, режущая кромка долота, число Маха, свойства среды, время действия волны.

Annotation: With blocked cutting of closed soil on the vibrating cutting edge of the bit, a deformation cone is formed due to cyclic and transient compression of the gas phase, which becomes the carrier of kinetic energy transformed in the form of high-frequency supersonic shock waves.

Keywords: destruction, shock waves, closed soil, sound speed, bit cutting edge, Mach number, environment properties, wave action time.

Введение. Процессы разрушения почвогрунтов, характеризующиеся высокой энергоемкостью, являются неотъемлемой частью сельскохозяйственных (вспашка, мелиоративное рыхление), строительных (экскавационные мероприятия) и других работ. В земледелии на их обработку расходуется около 25% трудовых и примерно до 50% энергетических ресурсов, что обусловлено тяговым сопротивлением почвообрабатывающих орудий, а также износом их рабочих органов [1, 2]. В связи с этим исследования процессов разрушения почвогрунтов с позиций повышения их энергоэффективности и совершенствования элементной базы орудий востребованы наукой и производством.

Почвы представляют собой высококонцентрированную сплошную среду, в которой твердые включения, обладающие высокой абразивной способностью и соединенные коллоидами, образуют решетку, а пространства между включениями – межагрегатные

полости, заполнены жидкими и газовыми веществами. Вследствие этого почвы обладают свойствами хрупких, вязких и пластичных тел. Степень проявления тех или иных свойств определяется соотношением твердой, жидкой и газовой фаз, а также интенсивностью распространения деформаций (напряжений) при их разрушении [3].

Внешние воздействия на почву приводят к переориентации твердых включений в решетке, вытеснению жидкой и газовой фаз из высоконагруженных межагрегатных полостей в менее нагруженные полости. Причем с увеличением скорости нагружения почвы возрастает сопротивление жидкой и газовой фаз, а при превышении скорости нагружения скорости распространения деформаций резко увеличивается износ и тяговое сопротивление рабочих органов почвообрабатывающих орудий из-за их движения в ненарушенной среде.

Методы и материалы. Используя положение об импульсе, выдвинутое В. П. Горячкиным [4], А. Н. Гудков [5] расчетным методом определил, что время воздействия корпуса плуга на почву при скорости нагружения до 2,0 м/с составляет не более 0,1 с, а процесс разрушения открытых почвогрунтов при отсутствии блокированного резания носит ударный характер с образованием волн первого порядка (средней частоты). Вследствие этого интенсифицируются процессы сжатия и сдвига и, следовательно, местного вибрационного разрушения среды.

Необходимость разрушения закрытых почвогрунтов вызвана пропагандируемой и реализуемой химико-техногенной стратегией интенсификации земледелия, химизация и энерговооруженность которой спровоцировала стрессово-деградационные изменения в плотности и сопутствующих агрофизических (водно-физических, воздушных, тепловых, химических и др.) свойствах почвы. Причем уплотнение носит кумулятивный характер, распространяется от дневной поверхности вниз до глубины 0,4…0,7 м, а иногда и до 2,0 м, достигая значения 1,75 т/м^3.

Для разрушения закрытых почвогрунтов разработана современная элементная база энергоэффективных почвообрабатывающих орудий, называемых чизельными (рис. 1; [6]).

Рис. 1. Почвообрабатывающие рабочие органы чизельного типа

Однако физическая модель самого процесса разрушения долгое время оставалась нераскрытой [7 – 9]. Наиболее близко к объяснению этого физического процесса подошел В. И. Ветохин [10], который утверждал, что им обоснована модель крошения почвы и самоадаптация в системе «источник энергии–рабочий орган–слой почвы» с образованием промежуточного тела из уплотненной почвы, которое непрерывно изменяется и распределяет деформации наименее энергоемким образом. Однако в модели

не объясняется происхождение «источника энергии» и отсутствуют ударные волны, которые могли бы воздействовать на «промежуточное тело».

Результаты и обсуждение. При блокированном резании закрытых почвогрунтов энергия ударов существенно возрастает, но в отличие от классической вспашки, взаимодействие долота (клина) рабочего органа с почвой происходит косвенно – в основном за счет циклического сжатия газовой фазы. При принудительном потоке газа формируется конус деформации (рис. 2), внутри которого сосредоточены возмущения (упругие волны). Источником возникновения конуса деформации является вибрирующая режущая кромка долота, а разрушение (обрушение) почвогрунта происходит впереди и по бокам долота под углами, равными ≈ 45°.

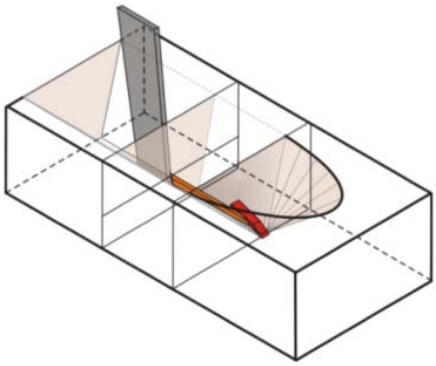


Рис. 2. Формирование конуса деформации от вибрирующей режущей кромки долота рабочего органа в элементарном объеме закрытого почвогрунта

Распространение волны в сплошной среде в общем виде описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\Delta\xi = \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial\tau^2}, \tag{1}$$

или для упругой продольной волны с учетом физико-механических свойств сплошной среды (скорость поперечных волн не рассматриваем в силу их малой величины относительно продольных волн)

$$\Delta\xi = \frac{\rho}{E}\frac{\partial^2\xi}{\partial\tau^2}, \tag{2}$$

где υ – фазовая скорость распространения упругих продольных волн; $\xi = \xi\,(x, y, z; \tau)$ – возмущение в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ; ρ – плотность среды; E – модуль упругости среды; Δ – оператор Лапласа:

$$\Delta\xi = \frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\xi}{\partial z^2}. \tag{3}$$

Решая совместно уравнения (1) и (2) для частного случая, когда ξ не зависит от пространственных координат y и z, получим

$$\upsilon = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \tag{4}$$

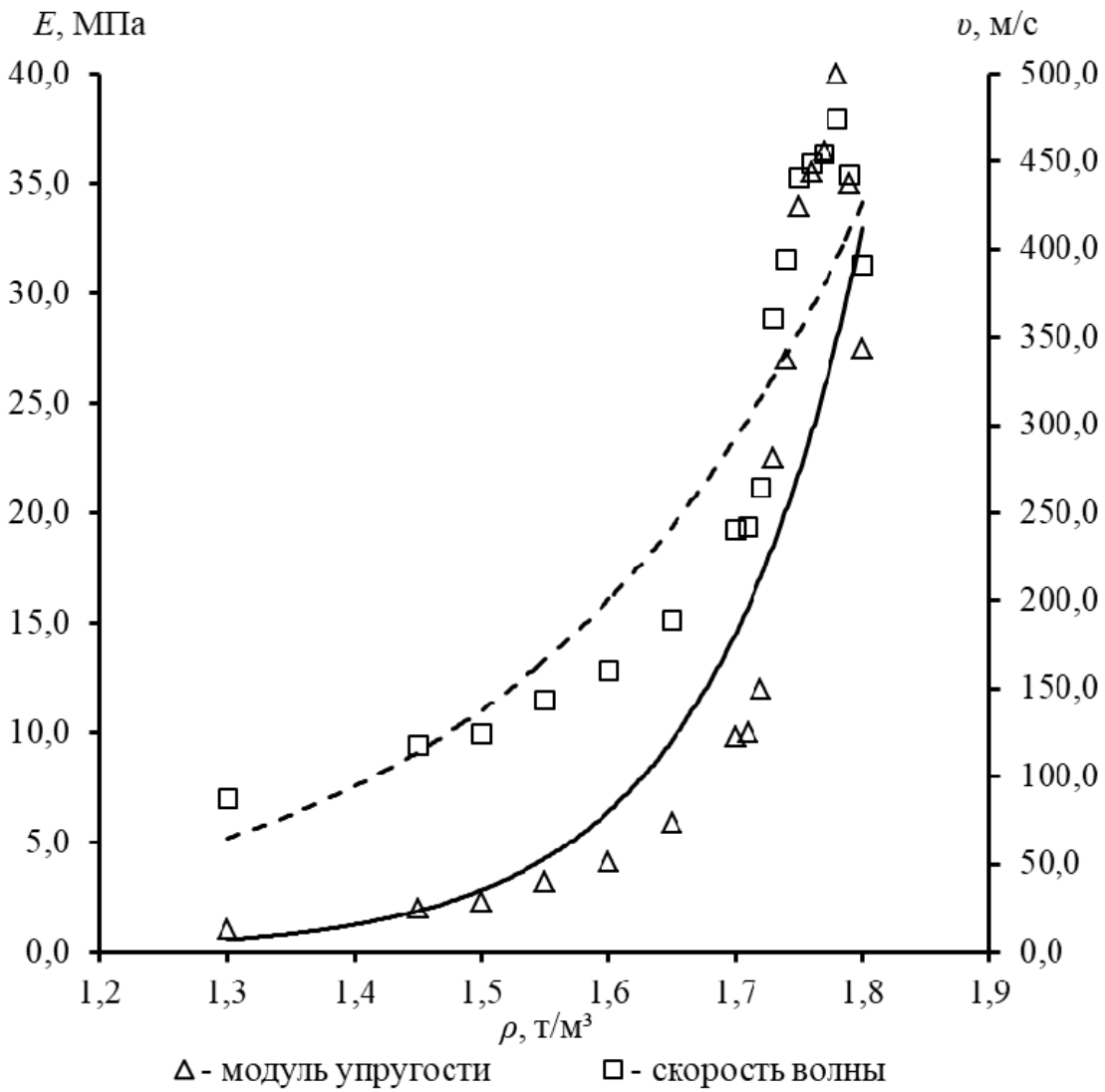


Рис. 3. Скорость распространения упругих продольных волн и модуль упругости почвогрунтов в зависимости от их плотности

По мере увеличения плотности закрытых почвогрунтов их модуль упругости повышается непропорционально, достигая значений свыше 30 МПа, при ρ = 1,75 т/м^3 (рис. 3).

Основной характеристикой течения сжимаемой газовой фазы является число Маха:

$$M = \frac{\upsilon}{\upsilon'}, \tag{5}$$

где υ' – местная скорость распространения звука, по данным [12] $\upsilon_{зв}$ = 85…180 м/с.

Плоский угол α между осью и образующей конуса деформации связан с числом Маха соотношением

$$\sin\alpha = M^{-1}. \tag{6}$$

При деформации закрытых почвогрунтов значения модуля упругости среды на вибрирующей режущей кромке долота изменяются скачкообразно, принимая экстре-

мальные величины – при ρ = 1,70 т/м^3, E = 9,8 МПа. Тогда, согласно (4) фазовая скорость распространения упругих продольных волн составит υ = 240,1 м/с, а число Маха в соответствии с (5) и максимальной местной скоростью распространения звука – M = 1,33.Это соответствует углу конуса $\alpha \approx 45°$. Так как $M > 1{,}0$, то течение газовой фазы будет сверхзвуковым с образованием в зоне действия конуса деформации ударных волн.

Время действия ударной волны рассчитывается по формуле [8, 9]

$$\tau = \frac{\pi l}{2\upsilon}, \tag{7}$$

где l – длина тела, подвергнутого удару.

Рассматривая вертикальное и наклонное под углом ≈ 45° направления распространения ударной волны при разрушении закрытых почвогрунтов на глубину 0,40 м, длина тела, подвергнутого удару, соответственно составит 0,4 и 0,57 м. Тогда при υ = 240,1 м/с, получим τ = 0,0026…0,0037 с. Это подтверждает, что волны второго порядка носят высокочастотный характер.

Заключение. Таким образом, при блокированном резании закрытых почвогрунтов на вибрирующей режущей кромке долота происходит формирование конуса деформации из-за циклического и скоротечного сжатия газовой фазы, которая становится носителем кинетической энергии, трансформированной в виде высокочастотных сверхзвуковых ударных волн и пропорциональной квадрату скорости их распространения. Углы наклона образующих конуса деформации совпадают с углами естественного откоса почвы – ≈ 45°, вследствие этого ударные волны распространяются наименее энергоемким образом.

Высокочастотный характер ударных волн приводит к тому, что с периодичностью $\tau < 0{,}0037$ с в точке с координатами (x, y, z) прерывается сцепление между твердыми включениями и по существу нивелируется внутреннее трение f почвы:

$$f = \mathrm{tg}\varphi = 0,$$

где φ – угол внутреннего трения.

С учетом того, что плоскость разрушения материалов происходит под углом:

$$\alpha_0 = \pm 45° - \varphi,$$

то угол $\alpha_0 = \pm 45°$, а разрушение почвы происходит под тем же углом естественного откоса, при этом знак ± означает направление разрушения.

Список использованных источников

1. **Pyndak, V. I.** Tribotechnical and Energy Assessment of Parts of Working Members of Cultivating Machines After Carburizing and Laser Hardening / V. I. Pyndak, A. E. Novikov // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – V. 58, № 3–4. – P. 226 – 230.

2. **Composition** and Tribological Properties of Hardened Cutting Blades of Tillage Machines under Abrasive Deterioration / A. E. Novikov, V. A. Motorin, M. I. Lamskova et al. // Journal of Friction and Wear. – 2018. – V. 39, № 2. – P. 158 – 163.

3. **Гудков, А. Н.** Теоретические основы вспашки твердых почв и обоснование конструкции плуга для обработки твердых почв [Текст] / А. Н. Гудков // Усовершенствование орудий для основной обработки почвы: материалы НТС / ВИСХОМ. – М., 1959. – Вып. 5. – С. 212 – 241.

4. **Горячкин, В. П.** Собрание сочинений [Текст] : в 3 т. / В. П. Горячкин ; под ред. Н. Д. Лучинского. – М. : Колос, 1965. – Т. 1. – С. 178 – 203.

5. **Гудков, А. Н.** Обоснование методов обработки почвы и проектирования винтовых лемешно-отвальных поверхностей как основных [Текст] / А. Н. Гудков // Земледельческая механика : сб. тр. – М. : Машиностроение, 1968. – Т. 10. – С. 76 – 84.

6. **Energy** and agrotechnical indicators in the testing of machine-tractor units with subsoiler / A. S. Ovchinnikov, A. S. Mezhevova, A. E. Novikov et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences : [online journal]. – 2017. – V. 12, № 24. – P. 7150 – 7160.

7. **Труфанов, В. В.** Глубокое чизелевание почвы [Текст] / В. В. Труфанов / ВАСХНИЛ. – М. : Агропромиздат, 1989. – 139 с.

8. **Токушев, Ж. Е.** Теория и расчет орудий для глубокого рыхления почв [Текст] / Ж. Е. Токушев. – М. : Инфра-М, 2003. – 300 с.

9. **Панов, И. М.** Физические основы механики почв [Текст] / И. М. Панов, В. И. Ветохин. – Киев : Феникс, 2008. – 265 с.

10. **Ветохин, В. И.** Системные и физико-механические основы проектирования рыхлителей почвы [Текст] : автореф. … дис. д-ра техн. Наук : 05.05.11 / В. И. Ветохин. – Глеваха, 2010. – 43 с.

11. **Pyndak, V. I.** Energy Efficiency of Mechanisms and Instruments for Deep Cultivation of Soil / V. I. Pyndak, A. E. Novikov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – V. 43, № 6. – P. 532 – 536.

12. **Нецветов, М. В.** Скорость звука и модуль упругости почвы: измерение и роль в передаче вибраций дерева на почву [Текст] / М. В. Нецветов // Грунтознавство. – 2010. – Т. 11. – № 1–2. – С. 48 – 52.

References

1. **Pyndak, V. I.** Tribotechnical and Energy Assessment of Parts of Working Members of Cultivating Machines After Carburizing and Laser Hardening / V. I. Pyndak, A. E. Novikov // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – V. 58, № 3-4. – P. 226 – 230.

2. **Composition** and Tribological Properties of Hardened Cutting Blades of Tillage Machines under Abrasive Deterioration / A. E. Novikov, V. A. Motorin, M. I. Lamskova et al. // Journal of Friction and Wear. – 2018. – V. 39, № 2. – P. 158 – 163.

3. **Gudkov, A. N.** Theoretical foundations of plowing solid soils and justification of the plow design for processing hard soils [Text] / A. N. Gudkov // Improvement of tools for the main tillage: STC materials / Research Institute of Agricultural Engineering. – M., 1959. – Is. 5. – P. 212 – 241.

4. **Goryachkin, V. P.** Collected Works [Text] : In 3 v. / V. P. Goryachkin; edited bt N. D. Luchinskiy. – M. : Kolos, 1965. – V. 1. – P. 178 – 203.

5. **Gudkov, A. N.** Justification of methods of tillage and design screw plow-dump surfaces as the main [Text] / A. N. Gudkov // Agricultural mechanics: Sat. works. – M. : Mechanical engineering, 1968. – V. 10. – P. 76 – 84.

6. **Energy a**nd agrotechnical indicators in the testing of machine-tractor units with subsoiler / A. S. Ovchinnikov, A. S. Mezhevova, A. E. Novikov et al. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences : [online journal]. – 2017. – V. 12, № 24. – P. 7150 – 7160.

7. **Troufanov, V. V.** Deep soil chewing [Text] / V. V. Troufanov / All-Union Academy of Agricultural Sciences named after Lenin. – M. : Agropromizdat, 1989. – 139 p.

8. **Tokoushev, Zh. E.** Theory and calculation of tools for deep soil loosening [Text] / Zh. E. Tokoushev. – M. : Infra-M, 2003. – 300 p.

9. **Panov, I. M.** Physical fundamentals of soil mechanics [Text] / I. M. Panov, V. I. Vetokhin. – Kiev : Feniks, 2008. – 265 p.

10. **Vetokhin, V. I.** System and physico-mechanical principles of the design of soil rippers [Text] : abstract. dis. Dr. techn. of sciences: 05.05.11 / Vladimir IvanovichVetokhin. – Glevakha, 2010. – 43 p.

11. **Pyndak, V. I.** Energy Efficiency of Mechanisms and Instruments for Deep Cultivation of Soil / V. I. Pyndak, A. E. Novikov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – V. 43, № 6. – P. 532 – 536.

12. **Netsvetov, M. V.** The speed of sound and the modulus of elasticity of the soil : measurement and role in the transmission of tree vibrations to the soil [Text] / M. V. Netsvetov // Gruntoznavstvo. – 2010. – V. 11, № 1–2. – P. 48 – 52.

УДК 519.71

Василевский К. С.[1], Оневский М. П.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
[1](Тел. (8915)8886990, e-mail: kvasilevskiy@rvsco.ru),
[2](Тел. (8905)0853938, e-mail: onev1@mail.ru)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ «ИСКУССТВЕННЫЕ ЛЕГКИЕ»

Vasilevskiy K. S.[1], Onevskiy M. P.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (8915)8886990, e-mail: kvasilevskiy@rvsco.ru),
[2](Tel. (8905)0853938, e-mail: onev1@mail.ru)

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF “ARTIFICIAL LUNGS” DEVICE

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель процесса имитации внешнего дыхания человека, реализуемого установкой «Искусственные легкие», учитывающая изменения дыхательных объемов газов в фазах вдоха-выдоха. Приведен алгоритм параметрической идентификации модели на основе спектральных операторов, позволяющий использовать его в режиме реального времени.

Ключевые слова: искусственные легкие, параметрическая идентификация, спектральный метод, модель внешнего дыхания человека.

Abstract. The article describes a mathematical model of the imitation of external human respirationin the “Artificial lungs” device, which considers the changes in volumes of respiratory gases in inhale-exhalephases. The algorithm of parametric identification of this model which is based on spectral operators allowing to use it in real-time is given.

Keywords: artificial lungs, parametric identification, spectral method, model of external human respiration.

Введение. В качестве объекта идентификации рассматривается модель процесса имитации внешнего дыхания человека, реализуемая в установке «Искусственные легкие» (ИЛ). Установка ИЛ предназначена для испытаний и сертификации средств защиты органов дыхания человека от различных факторов техногенного характера и состоит из следующих основных подсистем, функционирующих синхронно на вдохе и выдохе: имитации дыхания (имитатор дыхания); имитации потребления кислорода O_2; подачи диоксида углерода CO_2; подачи азота N_2. Каждая из этих подсистем построена на основе поршневых дозаторов газа с линейными приводами. Полагаем, что в контуре ИЛ циркулирует трехкомпонентная смесь газов, состоящая из CO_2, O_2, N_2.

Имитатор дыхания создает пульсирующий поток газовой дыхательной смеси (ГДС), аналогичный потоку, формируемому легкими человека.

Всеми процессами в установке ИЛ управляет система управления, в состав которой входят соответствующие измерительные и исполнительные устройства, блок управления, реализующий режимы функционирования, с помощью специального математического обеспечения.

Установка ИЛ должна адекватно воспроизводить внешнее дыхание человека в возможных его психофизиологических состояниях и различных состояниях окружающей среды, обеспечивать имитацию различных уровней потребления кислорода человеком при различных физических нагрузках, в широком диапазоне изменения коэффициента дыхания с использованием множества пневмотахограмм дыхания.

Для управления всеми подсистемами и системой в целом необходимо иметь достаточно точную их математическую модель.

Для идентификации линейных нестационарных систем широкое применение нашли методы, основанные на разложении сигналов и временны́х динамических характеристик исследуемых систем по ортогональным базисам с использованием ортогональных функций Уолша (Walsh) [1 – 6], блочно-импульсных функций (block pulse functions (BPFs)) [6], Лягерра (Laguerre) [4, 5], Чебышева (Chebyshev) [4, 5], Фурье (Fourier) [6], Лежандра (Legendre) [4, 5], Эрмита (Hermite) [4], гибридных функций [6] и др.

В данной статье предлагается расширить возможности использования настраиваемой модели [4] для идентификации изменяющихся во времени параметров линейной системы. Причем параметры не аппроксимируются ни степенными рядами, ни ортогональными полиномами, а получаются напрямую в виде готовых функций времени, что уменьшает затраты времени на идентификацию и облегчает их использование в процессе функционирования системы управления. Алгоритм идентификации построен на использовании аппарата проекционно-матричных операторов элементарных звеньев системы типа «вход-выход». В качестве ортонормированного базиса в данной работе принят базис системы функций Уолша ввиду простоты компьютерной реализации, достаточной точности аппроксимации функций и незначительного объема занимаемой памяти ЭВМ, что способствует их использованию в системах реального времени.

Теоретические основы. Рассмотрим задачу параметрической идентификации математических моделей подсистем ИЛ. Поскольку исследуемые подсистемы имеют однотипную структуру, представим обобщенную структурную схему параметрической идентификации типовой подсистемы с помощью модели с настраиваемыми параметрами в виде рис. 1.

Полагая типовую подсистему линейной нестационарной, считаем, что ее модель можно представить в виде последовательного соединения инерционного, усилительного и интегрирующего звеньев (см. рис. 1). Причем вид пневмотахограммы дыхания имитируется в модели изменением коэффициента усиления $k(t)$, а инерционные свойства – фиксированным значением постоянной времени Td инерционного звена.

Задача идентификации параметров состоит в том, чтобы по информации о сигналах на входе и выходе объекта и модели ($u(t)$, $y(t)$, $y^M(t)$) получить значение функции $k(t)$ и постоянную времени Td, обеспечивающие наибольшее приближение выходного сигнала модели $y^M(t)$ к реальному выходному сигналу объекта $y(t)$ в соответствии с выбранным критерием оптимизации $F(\varepsilon(t))$, определяемым сигналом ошибки $\varepsilon(t) = y(t) - y^M(t)$, и осуществить таким образом настройку модели.

Воспользуемся спектральным методом представления сигналов $y(t)$ и $y^M(t)$ в виде разложения по ортогональным базисам системы функций Уолша $\{\varphi_i(t)\}_{i=1}^{l}$ на интервале [0, T], полагая, что они принадлежат гильбертову пространству $L2$ [0, T].

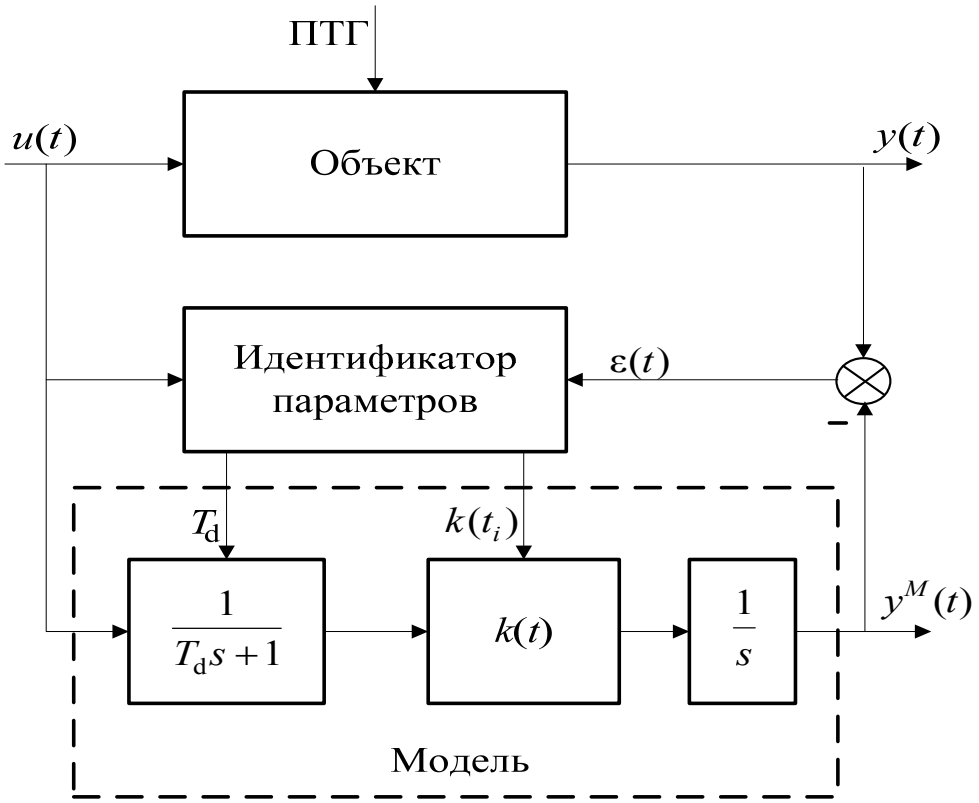


Рис. 1. Структурная схема системы идентификации с помощью модели с настраиваемыми параметрами:
$u(t)$ – входной сигнал; $y(t)$, $y^M(t)$ – выходные сигналы объекта и модели;
ПТГ – пневмотахограмма дыхания; Td, $k(t_i)$ – настраиваемые параметры

Пусть $\Phi(t)$ – матрица Адамара–Уолша размерностью $l \times l$. Тогда

$$y(t) \approx \Phi(t)\mathbf{C}^y,\ y^M(t) \approx \Phi(t)\mathbf{C}^{y^M}, \tag{1}$$

где $\mathbf{C}^y = [c_1^y, c_2^y, ..., c_l^y]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{C}^{y^M} = [c_1^{y^M}, c_2^{y^M}, ..., c_l^{y^M}]^{\mathrm{T}}$ – коэффициенты разложения сигналов $y(t)$, $y^M(t)$ по базисным функциям.

Сигнал ошибки $\varepsilon(t)$ можно приближенно определить по формуле

$$\varepsilon(t) = y(t) - y^M(t) \approx \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{C}^y - \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{C}^{y^{\mathrm{M}}} = \mathbf{\Phi}(t)\left(\mathbf{C}^y - \mathbf{C}^{y^{\mathrm{M}}}\right), \tag{2}$$

где $\varepsilon(t) \approx 0$ тогда и только тогда, когда $\mathbf{C}^y = \mathbf{C}^{y^M}$, так как $\Phi(t)$ не зависит от всех остальных входных сигналов в силу ортогональности $\Phi(t)$.

Для идентификации параметров модели $k(t)$ и Td необходимо сформировать показатель качества, отражающий зависимость $\mathbf{C}^{y^M} = \mathbf{C}^{y^M}(k(t), T_d)$. Чтобы получить данную зависимость в явном виде, рассмотрим принципы организации идентификатора параметров.

Идентификатор параметров построен на основе использования аппарата проекционно-матричных операторов, описывающих процессы в настраиваемой модели (рис. 2).

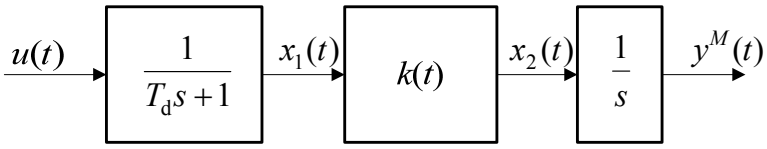


Рис. 2. Настраиваемая модель

Сначала запишем соотношения «вход–выход» для каждого элементарного звена модели для построения структуры данной модели:

$$x_1(t) = \frac{1}{T_d}\int_0^t u(\tau)d(\tau) - \frac{1}{T_d}\int_0^t x_1(\tau)d(\tau) + x_1(0);$$

$$x_2(t) = k(t)x_1(t);$$

$$y^M(t) = \int_0^t x_2(\tau)d\tau + y^M(0).$$

Представим сигналы $u(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$, $y^M(t)$ в виде разложения по ортогональным базисам системы функций Уолша $\{\varphi_i(t)\}_{i=1}^{l}$ на интервале [0, T]:

$$u(t) \approx \Phi(t)\mathrm{Cu};\ x_1(t) = \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{C}^{x_1};\ x_2(t) = \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{C}^{x_2};\ y^M(t) \approx \Phi(t)\ \mathbf{C}^{y^M}, \tag{3}$$

где $\mathbf{C}^u = [c_1^u, c_2^u, ..., c_l^u]^{\mathrm{T}}$; $\mathbf{C}^{x_1} = [c_1^{x_1}, c_2^{x_1}, ..., c_l^{x_1}]^{\mathrm{T}}$; $\mathbf{C}^{x_2} = [c_1^{x_2}, c_2^{x_2}, ..., c_l^{x_2}]^{\mathrm{T}}$; $\mathbf{C}^{y^M} = [c_1^{y^M}, c_2^{y^M}, ..., c_l^{y^M}]^{\mathrm{T}}$, – коэффициенты разложения соответствующих сигналов по базисным функциям. Тогда, согласно методу проекционно-матричных операторов [4], векторы коэффициентов разложений входных и выходных сигналов каждого из элементов модели по базису $\{\varphi_i(t)\}_{i=1}^{l}$ будут связаны следующими соотношениями:

$$\begin{cases} \mathbf{C}^{x_1} = (T_{\mathrm{d}}\mathbf{I} + \mathbf{A}_{\mathrm{int}})^{-1}\mathbf{A}_{\mathrm{int}}\mathbf{C}^u + (T_{\mathrm{d}}\mathbf{I} + \mathbf{A}_{\mathrm{int}})^{-1}x_1(0)\mathbf{\Phi}_N; \\ \mathbf{C}^{x_2} = \mathbf{A}_{mul}(k(t))\mathbf{C}^{x_1}; \\ \mathbf{C}^{y^M} = \mathbf{A}_{\mathrm{int}}\mathbf{C}^{x_2} + y^M(0)\mathbf{\Phi}_N, \end{cases} \tag{4}$$

где $\mathbf{A}_{\mathrm{int}}$ – проекционно-матричный оператор интегрирования в базисе $\{\varphi_i(t)\}_{i=1}^{l}$ ($l\times l$-матрица); $\mathbf{A}_{mul}(k(t))$ – проекционно-матричный оператор умножения на функцию $k(t)$ в базисе $\{\varphi_i(t)\}_{i=1}^{l}$ ($l\times l$-матрица); $k(t) = [k(t_1), k(t_2), ..., k(t_l)]^{\mathrm{T}}$ – вектор значений коэффициента усиления; Td – постоянная времени инерционного звена (скаляр); I – единичная $l\times l$-матрица;

$$\mathbf{\Phi}_N = \left[\int_0^T \varphi_1(t)dt, ..., \int_0^T \varphi_l(t)dt\right]^{\mathrm{T}}.$$

Матричные операторы $\mathbf{A}_{\mathrm{int}}$, $\mathbf{A}_{mul}(k(t))$ в базисе функций Уолша можно вычислить, используя алгоритмы, приведенные в работах [4, 5].

Положим начальные условия для модели (4) нулевыми, т.е. $x_1(0)=0$, $y^M(0)=0$, и введем обозначения:

$$\mathbf{A}_1=\left(T_d\mathbf{I}+\mathbf{A}_{\text{int}}\right)^{-1}\mathbf{A}_{\text{int}};\ \mathbf{A}_2=\mathbf{A}_{mul}(k(t));\ \mathbf{A}_3=\mathbf{A}_{\text{int}}. \tag{5}$$

На рисунке 3 представлена операторная форма представления модели с учетом введенных обозначений.

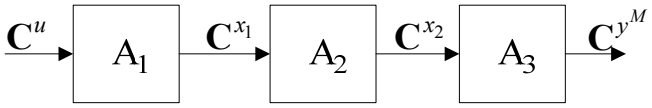


Рис. 3. Операторная форма модели

Проекционно-матричный оператор настраиваемой модели, зависящий от искомых параметров, имеет вид

$$\mathbf{A}^M=\mathbf{A}_3\mathbf{A}_2\mathbf{A}_1=\mathbf{A}_{\text{int}}\cdot\mathbf{A}_{mul}(k(t))\cdot\left(T_d\mathbf{I}+\mathbf{A}_{\text{int}}\right)^{-1}\mathbf{A}_{\text{int}}. \tag{6}$$

Таким образом, векторы спектральных характеристик входного и выходного сигналов модели по базису системы функций Уолша при нулевых начальных условиях связаны соотношением

$$\mathbf{C}^{y^M}(T_d,k(t))=\mathbf{A}^M(T_d,k(t))\mathbf{C}^u. \tag{7}$$

С учетом такого операторного представления настраиваемой модели меру близости реального выходного сигнала объекта и выходного сигнала модели ввиду идентичности спектров их входных сигналов Cu, можно записать в терминах матричных операторов

$$J(T_{\text{d}},k(t))=\left\|\mathbf{C}^y-\mathbf{C}^{y^M}(T_d,k(t))\right\|\to\min_{T_{\text{d}},k(t)}. \tag{8}$$

В качестве нормы близости (8) используем евклидову норму

$$J(T_d,k(t))=\sqrt{\sum_{i=1}^{l}\left(c_i^y-c_i^{y^M}\right)^2}\to\min_{T_d,k(t)}. \tag{9}$$

Выражение (9) используем в качестве критерия оптимизации, минимизация которого обеспечит настройку модели по экспериментальным данным, полученным на конечном промежутке [0, T].

Алгоритм идентификации. На рисунке 4 приведена блок-схема алгоритма идентификации параметров типовой подсистемы ИЛ. Поскольку подсистемы ИЛ осуществляют подачу газов в имитатор дыхания и сброс рассчитываемого объема ГДС на фазе вдоха, алгоритм идентификации функционирует циклично. Информация о $u(t)$, $y(t)$, $y^M(t)$, накопленная на фазе предыдущего вдоха, передается в идентификатор параметров (рис. 1). На фазе выдоха вступает в работу алгоритм идентификации, в результате чего идентифицированные параметры поступают в модель и используются системой управления ИЛ на следующем вдохе.

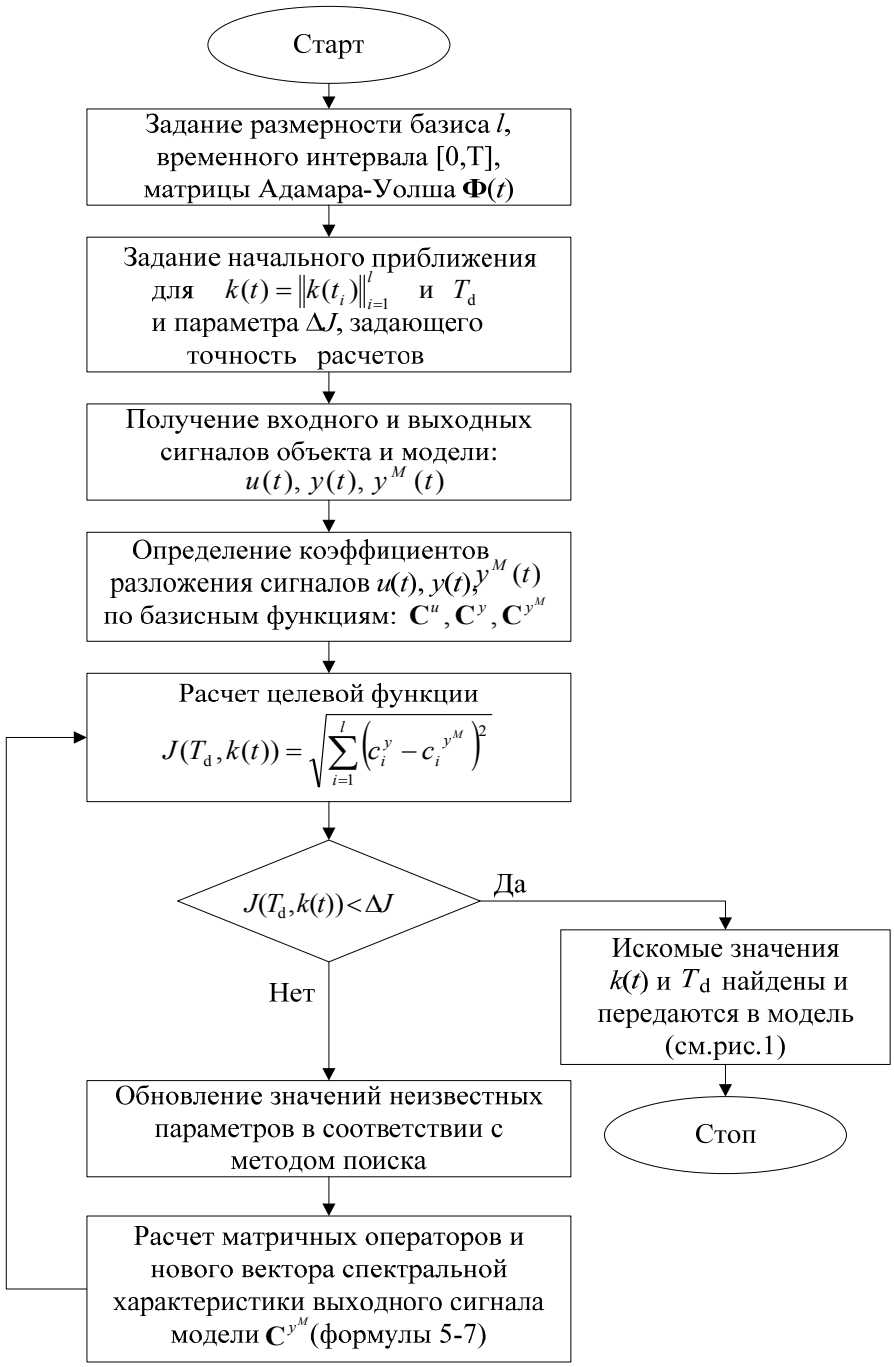


Рис. 4. Блок-схема алгоритма идентификации

Экспериментальные исследования. Рассмотрим реализацию предложенного алгоритма на примере подсистемы имитации потребления кислорода.

Примем, что данная подсистема, осуществляющая сброс в атмосферу рассчитанного объема ГДС на фазе вдоха, функционирует в следующем режиме: глубина дыхания $V_Д$ =1,75 дм^3, частота дыхания n = 20 мин$^{-1}$, легочная вентиляция $W_л$ = 35 дм^3/мин, коэффициент дыхания $K_д = 0{,}88$. При этом в ИЛ реализуются синусоидальная, треугольная и трапецеидальная пневмотахограммы.

Следует отметить, что все вычисления были выполнены с использованием программного обеспечения MATLAB. Совместная идентификация параметров $k(t)$ и Td

производилась на интервале [0,T] (T = 1,5 с) с использованием квазиньютоновского метода линейного поиска.

Ошибка оценки фиксированной величины постоянной времени *Td* в результате серии вычислительных экспериментов при различных исходных данных не превысила 5%, т.е. *Td* ≅ 0,01 ± 0,0005, однако, с увеличением размерности базиса *l* > 16 точность определения *Td* снижается, так как уменьшается чувствительность показателя качества $J(T_d, k(t))$ по *Td.*

В качестве примера на рис. 5 представлены графики входного сигнала $u(t) = l(t)$ и выходных сигналов объекта $y(t) = V_{\text{ГДС}}(t)$ и модели $y^M(t) = V^M_{\text{ГДС}}(t)$ при реализации синусоидальной пневмотахограммы дыхания. На рисунке 6 изображены графики идентифицированного коэффициента *k*(*t*) для различных размерностей базиса *l*. Анализ результатов исследования показал, что для различных форм пневмотахограмм с увеличением размерности базиса *l* точность определения переменного коэффициента *k*(*t*), в отличие от *Td*, увеличивается.

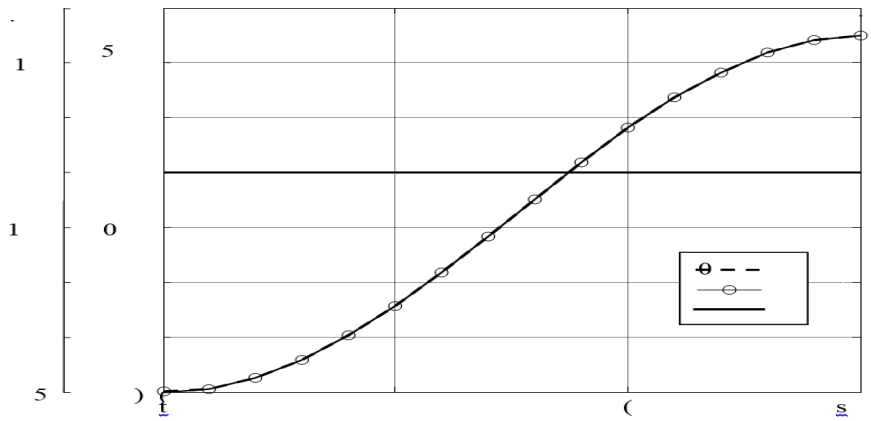


Рис. 5. Графики входного сигнала и выходных сигналов объекта и модели (синусоидальная пневмотахограмма):

1 – $V_{\text{ГДС}}(t)$; *2* – $V^M_{\text{ГДС}}(t)$; *3* – $u(t) = l(t)$

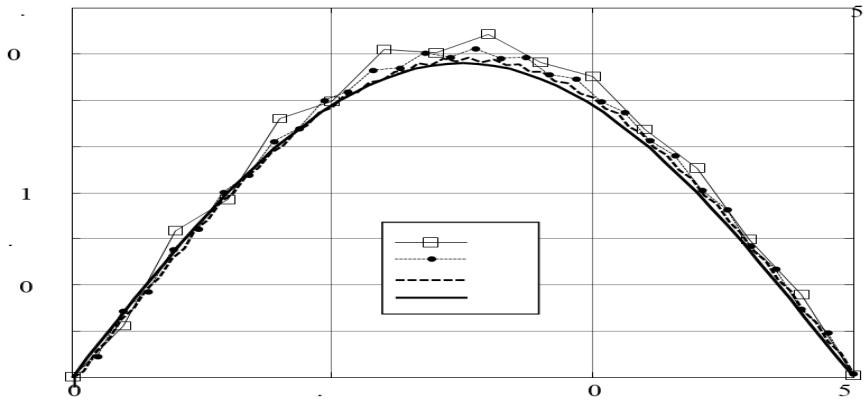


Рис. 6. Результаты идентификации коэффициента усиления *k*(*t*) для различных размерностей базиса *l* (зондирующий сигнал *u*(*t*) = *l*(*t*), реализуется синусоидальная пневмотахограмма дыхания):

1 – *l* =16; *2* – *l* = 32; *3* – *l* = 64; *4* – эталонная функция *k*(*t*)

Поскольку разработанный алгоритм должен работать в составе системы управления ИЛ в реальном времени, важно, насколько выходной сигнал модели $V_{\text{ГДС}}^{M}(t)$ соответствует реальному выходному сигналу объекта $V_{\text{ГДС}}(t)$. Судя по графику рис. 5, эти сигналы практически совпадают. Важно также, чтобы время выполнения алгоритма не превышало длительности фазы выдоха.

Средние абсолютные погрешности $E_{l,N}$ вычисляются по формуле (10)

$$E_{l,N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|y(t_i) - y^{M}(t_i)\right|. \tag{10}$$

При N = 1 ошибка $E_{l,N}$ включает в себя средние точки подынтервалов [$\alpha + ih$, $\alpha + (i + 1)h$], i = 1, 2, …, l в основном интервале [α, β], при N = 10 ошибка $E_{l,N}$ включает десять произвольных точек $ti = \alpha + ih$, i = 0, 1, …, 9 основного интервала [α, β], где $h = (\beta - \alpha)/10$.

Средние интегральные квадратические ошибки E_{MISE} вычисляются по формуле (11):

$$E_{MISE} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T}\left[y(t) - y^{M}(t)\right]^2 dt. \tag{11}$$

Показатель качества $J(T_d, k(t))$ идентификации, определяемый спектрами выходных сигналов объекта и модели, вычисляется по формуле (9).

Экспериментально было получено время выполнения алгоритма для различных размерностей базиса, для различных зондирующих сигналов и различных пневмотахограмм дыхания.

Исходя из полученных данных, делаем вывод, что наилучшее соответствие выходного сигнала модели выходному сигналу объекта достигается при использовании синусоидального зондирующего сигнала с линейно возрастающей амплитудой $u(t) = 0{,}1t\sin(1{,}5t)$. С точки зрения минимизации ошибок и возможности использования алгоритма в реальном масштабе времени, целесообразно выбрать размерность ортогонального базиса l = 16.

Заключение. Рассмотрена математическая модель процесса имитации внешнего дыхания человека, реализуемого установкой «Искусственные легкие», учитывающая изменения дыхательных объемов газов в фазах вдоха-выдоха. Разработан алгоритм параметрической идентификации модели на основе спектральных операторов, позволяющий использовать его в режиме реального времени.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была показана принципиальная возможность использования разработанного алгоритма идентификации с помощью модели с настраиваемыми параметрами в контуре системы управления искусственными легкими.

Список использованных источников

1. **Beauchamp, K. G.** Applications of Walsh and Related Functions – With an Introduction to Sequency Theory, Academic Press, 1984.

2. **Beer, T.** Walsh Transforms, American Journal of Physics. – May 1981. – V. 49, Is. 5.

3. **Беспалов, М. С.** Новая нумерация матриц Уолша / М. С. Беспалов // Проблемы передачи информации. – 2009. – Т. 45, № 4.

4. **Пупков, К. А.** Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация САУ МГТУ им. Н. Э. Баумана / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – 2004.

5. **Солодовников, В. В.** Спектральные методы расчета и проектирования систем управления / В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. – М. : Машиностроение, 1986. – 440 с.

6. **Deb, A.**, Roychoudhury S., Sarkar G. Analysis and Identification of Time-Invariant Systems, Time-Varying Systems, and Multi-Delay Systems using Orthogonal Hybrid Functions. Theory and Algorithms with MATLAB. Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – V. 46. – Springer International Publishing, Switzerland.

References

1. **Beauchamp, K. G.** Applications of Walsh and Related Functions – With an Introduction to Sequency Theory, Academic Press, 1984.

2. **Beer, T.** Walsh Transforms, American Journal of Physics. – May 1981. – V. 49, Is. 5.

3. **Bespalov, M. S.** Novaya numeraciya matric Uolsha // Problemy peredachi informacii. – 2009. – T. 45, № 4.

4. **Pupkov K. A.**, Egupov N. D. Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Statisticheskaya dinamika i identifikaciya SAU MGTU im. N. E. Baumana, 2004.

5. **Solodovnikov V. V.**, Dmitriev A. N., Egupov N. D. Spektral'nye metody rascheta i proektirovaniya sistem upravleniya M.: Mashinostroenie, 1986. – 440 s.

6. **Deb, A.**, Roychoudhury S., Sarkar G. Analysis and Identification of Time-Invariant Systems, Time-Varying Systems, and Multi-Delay Systems using Orthogonal Hybrid Functions. Theory and Algorithms with MATLAB. Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – V. 46. – Springer International Publishing, Switzerland.

УДК: 66.081.6

Лазарев С. И., Родионов Д. А., Ковалев С. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752) 63-03-70, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА РУЛОННОГО ТИПА

Lazarev S. I., Rodionov D. A., Kovalev S. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 63-03-70, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru)

INDUSTRIAL DESIGN OF THE ELECTROBARMEMBRANNY DEVICE OF ROLLED TYPE

Аннотация. В работе усовершенствована конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа, позволяющая увеличить производительность, качество разделения растворов, а также снизить гидравлическое сопротивление в канале для отвода прианодного и прикатодного пермеата.

Ключевые слова: раствор, разделение, аппарат, мембрана.

Abstract. The article describes the design of the electrobarmembrane device of rolled t ype to increase the efficiency, quality of division of solutions is improved, and also to reduce hydraulic resistance in the channel for withdrawal of the anode and cathode permeate.

Keywords: solution, division, device, membrane.

Процессы мембранного разделения растворов используются во многих отраслях промышленности: пищевой, металлургической, микробиологической, химической и др. Их применение оправдано тем, что они позволяют при определенном конструктивном исполнении конструкций мембранных аппаратов проводить разделение, концентрирование и очистку технологических растворов, стоков [1 – 3]. Применение перспективных конструкций электрохимических мембранных аппаратов в технологических схемах разделения растворов и промывных вод после стадий отмывки, например, целевых продуктов, обосновано возрастанием объемов производства некоторых органических соединений, используемых в промышленности. Эти методы сочетают в себе достоинства мембранных и электромембранных процессов, например, направленное выделение определенных компонентов из растворов и задержка при этом других [4 – 6].

Известные электробаромембранные аппараты имеют недостатки, а именно – существенное гидравлическое сопротивление в канале для отвода ретентата, прианодного, прикатодного пермеата, низкую производительность и качество разделения растворов [7].

На рисунке 1 представлена разработанная конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа с низким гидравлическим сопротивлением.

Мембранные аппараты рулонного типа предназначены для разделения растворов под действием градиента давления, как правило, состоят из корпуса, перфорированной раствороотводящей трубки с обернутыми вокруг нее несколькими многослойными листами мембран. Недостатками таких конструкций является низкая эффективность разделения растворов, особенно при разделении многокомпонентных смесей электролитов, при отделении электролитов от неэлектролитов.

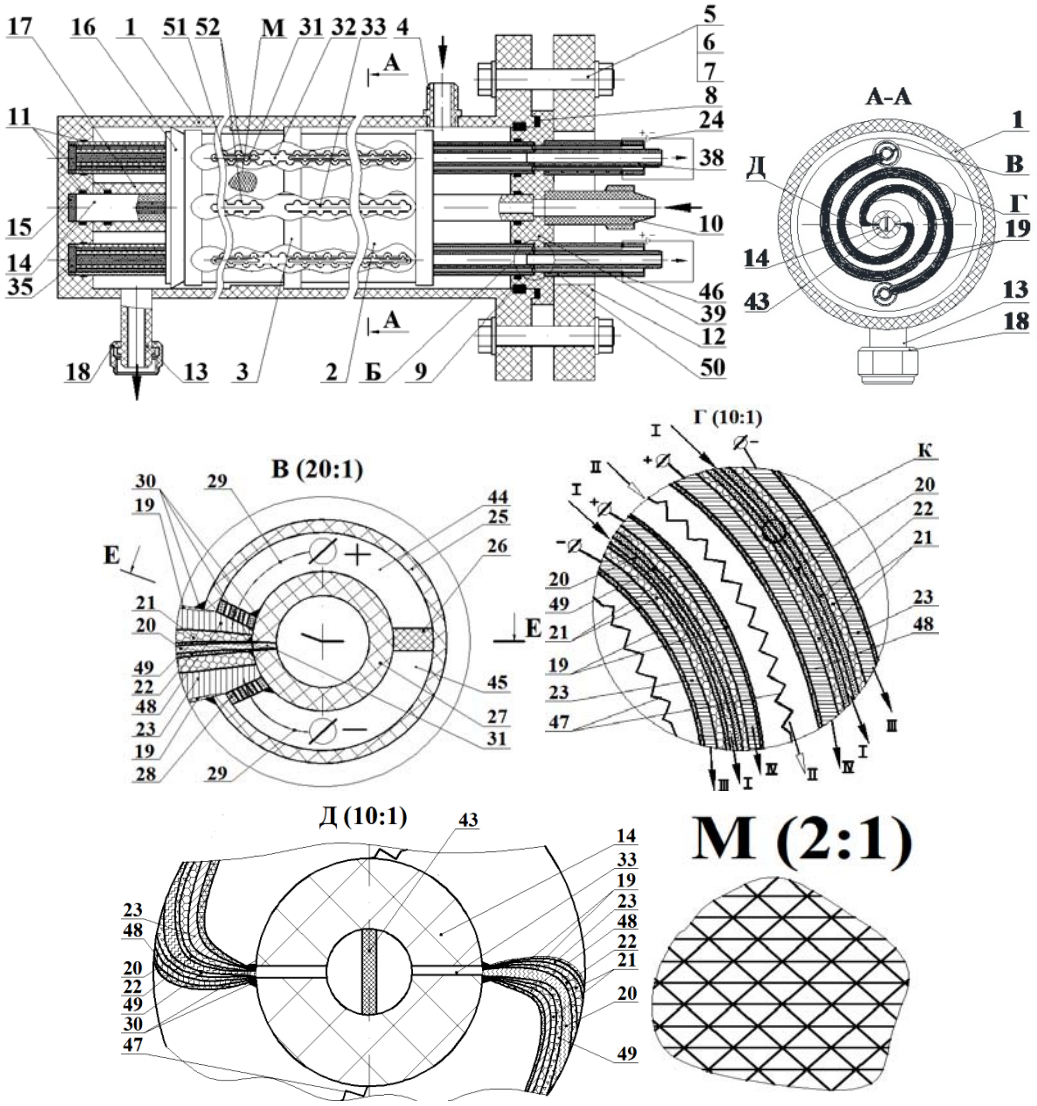


Рис. 1. Электробаромембранный аппарат рулонного типа:
1 – цилиндрическая обечайка; *2* – рулонный элемент; *3* – резиновая манжета; *4* – штуцер для ввода охлаждающей воды; *5 – 7* – болты; гайки; шайбы; *8* – уплотнительная прокладка; *9* – герметизирующая прокладка; *10* – штуцер подачи исходного раствора; *11* – посадочных прокладок; *12* – отверстий прижимного фланца; *13* – штуцер для выхода охлаждающей воды; *14* – перфорированная трубка; *15* – торцевая прокладка; *16* – антителескопическая решетка; *17* – втулка; *18* – гайка; *19* – пленка; *20* – сетка турбулизатора; *21* – подложка; *22* – прикатодная мембрана; *23* – дренажная сетка, являющаяся катодом; *24* – устройство для подвода электрического тока; *25* – внешняя трубка; *26* – неперфорированная перегородка; *27* – внутренняя трубка; *28* – полимерные перфорированные перегородки; *29* – электрические провода; *30* – клеевая композиция; *31* – эллиптическая большая щель; *32* – эллиптическая малая щель; *33* – эллиптические проточки; *34* – отверстия; *35* – малая торцевая прокладка; *36* – штуцер для отвода прикатодного пермеата; *37* – штуцер для отвода прианодного пермеата; *38* – штуцер для отвода ретентата; *39* – крышка; *40* – фиксирующая прокладка; *41* – отверстия в фиксирующей прокладке; *42* – кольца резиновые; *43* – перегородка; *44* – коллекторы для отвода прианодного пермеата; *45* – коллекторы для отвода прикатодного пермеата; *46* – герметизирующая заливка; *47* – сетки-турбулизаторы охлаждающей воды; *48* – дренажные сетки, являющиеся анодом; *49* – прианодные мембраны; *50* – внешняя отводная трубка; *51* – большие полуокружности; *52* – малые полуокружности

Снижение гидравлического сопротивления в канале для отвода ретентата и прианодного, прикатодного пермеата и увеличение производительности и качества разделения растворов при конструктивном исполнении электробаромембранного аппарата рулонного типа, показанного на рис. 1, по сравнению с аппаратом-прототипом, достигается за счет того, что перфорированная трубка *14* выполнена с перфорацией в виде эллиптических проточек *33*, по периметру которых расположены полуокружности *52*, выполненные на расстоянии 5 мм друг от друга. А также из-за того, что увеличен в 2 раза диаметр малых и больших трубок, за счет изменения формы внешней и внутренней трубки перфорированной большой и малой щелью, выполненных в виде эллиптических проточек, по периметру которых расположены большие и малые полуокружности. Разработанный аппарат выполнен без изменения габаритных размеров электробаромембранного аппарата прототипа [7], площадь каналов увеличена на 20%, как следствие, увеличилась производительность и повысилось качество разделенных растворов.

Список использованных источников

1. **Дытнерский, Ю. И.** Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1986. – 272 с.

2. **Мулдер, М.** Введение в мембранную технологию / М. Мулдер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 513 с.

3. **Свитцов, А. А.** Введение в мембранную технологию / А. А. Свитцов. – М. : ДеЛипринт, 2007. – 208 с.

4. **Горбачев, А. С.** Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатсодержащих растворов (в производстве оптических отбеливателей) : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 25.12.2006 / А. С. Горбачев. – Тамбов, 2006. – 197 с.

5. **Лазарев, С. И.** Научные основы электрохимических и баромембранных методов очистки, выделения и получения органических веществ из промышленных стоков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.03 : защищена 21.01.2002 / С. И. Лазарев. – Тамбов, 2001. – 543 с.

6. **Карлин, Ю. В.** Влияние электрического поля на ионный транспорт через обратноосмотические мембраны : дис. канд. хим. наук : 05.17.08 / Ю. В. Карлин. – М, 1984. – 181 с.

7. **Пат.** на изобретение № RU 2634010 C2, 23.10.2017, МПК B01D 61/46, B01D 63/10 Электробаромембранный аппарат рулонного типа / Лазарев С. И., Абоносимов О. А., Ковалев С. И., Полянский К. К., Лазарев К. С., Шестаков К. В.

References

1. **Dytnerskij, Yu. I.** Baromembrannye processy. Teoriya i raschet / Yu. I. Dytnerskij. – M. : Himiya, 1986. – 272 s.

2. **Mulder, M.** Vvedenie v membrannuyu tekhnologiyu : per. s angl. / M. Mulder. – M. : Mir, 1999. – 513 s.

3. **Svitcov, A. A.** Vvedenie v membrannuyu tekhnologiyu / A. A. Svitcov. – M. : DeLi print, 2007. – 208 s.

4. **Gorbachev, A. S.** Kinetika ehlektrobaromembrannogo razdeleniya vodnyh sul'fatsoderzhashchih rastvorov (v proizvodstve opticheskih otbelivatelej) : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.17.08 : zashchishchena 25.12.2006 / Gorbachev Aleksandr Sergeevich. – Tambov, 2006. – 197 s.

5. **Lazarev, S. I.** Nauchnye osnovy ehlektrohimicheskih i baromembrannyh metodov ochistki, vydeleniya i polucheniya organicheskih veshchestv iz promyshlennyh stokov : dis. ... d-ratekhn. nauk : 05.17.03 : zashchishchena 21.01.2002 / Lazarev Sergej Ivanovich. – Tambov, 2001. – 543 s.

6. **Karlin, Yu. V.** Vliyanie ehlektricheskogo polya na ionnyj transport cherez obratnoosmoticheskie membrany : dis. kand. him. nauk : 05.17.08 / Karlin Yurij Vladimirovich. – M, 1984. – 181 s.

7. **Lazarev S. I.,** Abonosimov O. A., Kovalev S. I., Polyanskij K. K., Lazarev K. S., Shestakov K. V. Ehlektrobaromembrannyj apparat rulonnogo tipa. Patent na izobretenie № RU 2634010 C2, 23.10.2017, MPK B01D 61/46, B01D 63/10.

66.067.5

Морозов Н. А., Гаврилов А. А., Морозова И. А.
Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург
(Тел. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОЧИЩАЕМОГО МАТЕРИАЛА В ЦЕНТРИФУГАХ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СДВИГОМ ПОТОКА

Morozov N. A., Gavrilov A. A., Morozova I. A.
Orenburg State University, Russia, Orenburg
(Tel. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru)

MODELING OF THE DEFORMATION OF THE TREATED MATERIAL IN CENTRIFUGES WITH ADJUSTABLE SHEAR FLOW

Аннотация. В данном исследовании создана модель деформации очищаемого материала между конусами центрифуги, имеющей дополнительный сдвиг потока. Получены выражения для определения сил вязкости, касательных напряжений, возникающих в материале, найден момент вязкого трения, передающийся на внешний конус. В модели была использована цилиндрическая система определения координат точек материала. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования дополнительного сдвига для определения вязкости очищаемого материала непосредственно в рабочей зоне разделения.

Ключевые слова: центрифуга, сдвиг потока, вязкость, очищаемый материал, напряжения, момент вязкого трения.

Abstract. In this study, a model of deformation of the material to be cleaned between the cones of a centrifuge with an additional flow shift is created. Expressions for determination of viscosity forces, tangential stresses arising in the material are obtained, the viscous friction moment transmitted to the outer cone is found. The model used a cylindrical system for determining the coordinates of the material points. The results obtained indicate the possibility of using an additional shear to determine the viscosity of the material to be cleaned directly in the working zone of separation.

Keywords: centrifuge, shear flow, viscosity, clean material, tension, the moment of viscous friction.

Внедрение в центрифугах регулируемого сдвига потока приводит к возникновению дополнительной деформации очищаемого материала. В зависимости от реологической модели очищаемого продукта дополнительная деформация может привести к снижению его вязкости, а, следовательно, повышению качества очистки [1 – 5]. Кроме этого, по величине данной деформации можно будет судить о вязкости очищаемого продукта непосредственно в рабочей зоне разделения центрифуги [6 – 8].

Задачей данного исследования являлось моделирование деформации очищаемого материала в межконусном пространстве центрифуги.

Для обеспечения дополнительного сдвига потока материалы конуса вращаются с разными угловыми скоростями. Можно принять, что один из конусов неподвижен, а второй вращается с угловой скоростью, равной разности угловых скоростей конусов.

Рассмотрим элементарный параллелепипед $ABCEE_1C_1B_1A_1$ материала в межконусном пространстве, имеющий размеры сторон (рис. 1):

$$AB = dr \cdot \cos(\alpha); \quad AE = dz / \cos(\alpha); \quad AA' = r \cdot d\varphi, \tag{1}$$

где α – угол наклона образующей конуса к оси вращения, рад.

Определим сдвигающие силы вязкого трения F_1 и F_2, действущие на площадки AEE_1A_1 и BCC_1B_1 Остальные силы не показаны, так как не будут создавать момента относительно оси вращения центрифуги:

$$F_1 = -\tau \cdot r \cdot d\varphi \cdot dz / \cos(\alpha), \tag{2}$$

$$F_2 = (\tau + d\tau) \cdot (r + dr) \cdot d\varphi \cdot dz / \cos(\alpha), \tag{3}$$

где τ – напряжение на площадке AEE_1A_1, Па; $\tau + d\tau$ – напряжение на площадке BCC_1B_1, Па.

Определим элементарный момент и запишем уравнение равновесного состояния материала:

$$dM = M_z(\overline{F}_1) + M_z(\overline{F}_2) = F_1 \cdot r + F_2 \cdot (r + dr) = 0, \tag{4}$$

$$dM = (2 \cdot \tau \cdot r \cdot dr + r^2 \cdot d\tau) d\varphi \cdot dz / \cos(\alpha) = 0. \tag{5}$$

После интегрирования уравнения (5):

$$\tau = \frac{C}{r^2}, \tag{6}$$

где C – постоянная интегрирования.

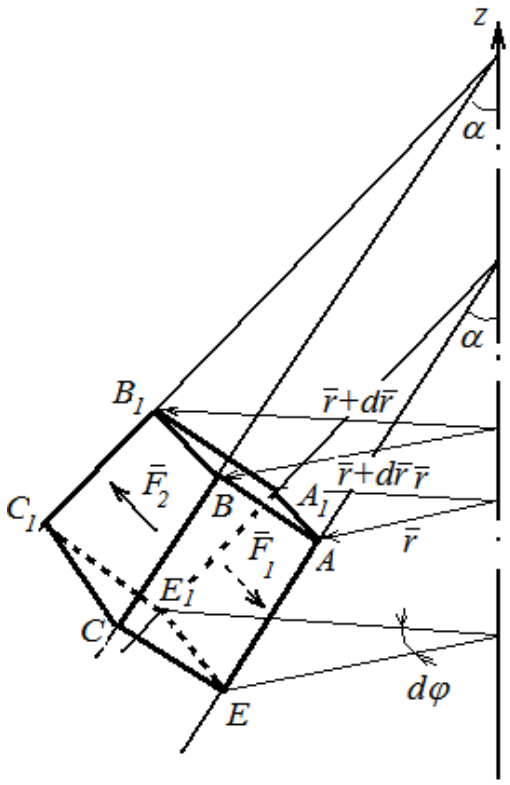


Рис. 1. Деформация материала

Градиент скорости сдвига материала в направлении, перпендикулярном образующей конуса:

$$D = dv_{\varphi} / (dr \cdot \cos(\alpha)), \tag{7}$$

где v_{φ} – окружная скорость смещения площадок отномительно друг друга, м/с.

В общем виде зависимость касательных напряжений от градиента скорости сдвига можно представить формулой

$$\tau = \mu_A \cdot D, \tag{8}$$

где μ_A – динамическая вязкость, Па·с.

Тогда

$$dv_{\varphi} = \frac{C \cdot \cos(\alpha)}{\mu_A \cdot r^2} dr. \tag{9}$$

Интегрируем (9)

$$dv_{\varphi}(r_2) - dv_{\varphi}(r_1) = \frac{C \cdot \cos(\alpha)}{\mu_A} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \tag{10}$$

Граничными условиями являются условия прилипания жидкости к конусам. На поверхности внутреннего конуса $v_{\varphi}(r = r_1) = 0$, на поверхности наружнего конуса $v_{\varphi}(r = r_2) = \Delta\omega \cdot r_2$ ($\Delta\omega$ – разность угловых скоростей конусов). Тогда

$$C = \frac{\mu_A \cdot \Delta\omega \cdot r_1 \cdot r_2^2}{(r_2 - r_1)\cos(\alpha)}. \tag{11}$$

Касательное напряжение на поверхности внешнего конуса будет равно

$$\tau = \frac{\mu_A \cdot \Delta\omega \cdot r_1}{(r_2 - r_1)\cos(\alpha)} = \frac{\mu_A \cdot \Delta\omega \cdot r_1}{h}, \tag{12}$$

где h – величина межконусного зазора, м.

Момент вязкого трения, передаваемый на элементарную кольцевую поверхность dS_2 внешнего конуса через слой материала:

$$dM = \tau r_2 dS_2. \tag{13}$$

Площадь элементарного кольца поверхности внешнего конуса:

$$dS_2 = \frac{2\pi \cdot r_2}{\sin(\alpha)} \cdot dr_2. \tag{14}$$

Тогда, учитывая равенство $r_1 = r_2 - h / \cos(\alpha)$, получим

$$dM = 2\pi \frac{\mu_A \cdot \Delta\omega}{h \cdot \sin(\alpha)} r_2^2 \left(r_2 - \frac{h}{\cos(\alpha)} \right) dr_2. \tag{15}$$

Момент вязкого трения, передаваемый на внешний конус:

$$M = \int_{r_{2B}}^{r_{2H}} dM_{B.TP2} = 2\pi \frac{\mu_A \cdot \Delta\omega}{h \cdot \sin(\alpha)} \left(r_{2H}^3 \left(\frac{r_{2H}}{4} - \frac{h}{3 \cdot \cos(\alpha)} \right) - r_{2B}^3 \left(\frac{r_{2B}}{4} - \frac{h}{3 \cdot \cos(\alpha)} \right) \right), \quad (16)$$

где r_{2H} и r_{2B} – соответственно наружный и внутренний радиусы внешнего конуса, м.

Формулу (16) можно представить в виде

$$M = \zeta \cdot \mu_A \cdot \Delta\omega, \quad (17)$$

где ζ – постоянный коэффициент, зависящий от размеров центрифуги, м^3.

Как видно из формулы (17), момент вязкого трения прямо пропорционален динамической вязкости. Поэтому, зная его и разность угловых скоростей конусов, можно определить вязкость очищаемого материала непосредственно в рабочей зоне разделения.

Список использованных источников

1. **Карташов, Л. П.** Центробежные реосепараторы / Л. П. Карташов, В. В. Назаров. – Екатеринбург : УрО РАН, 1997. – 86 с.

2. **Гольдин, А. М.** Гидродинамические основы процессов тонкослойного сепарирования / А. М. Гольдин, В. А. Карамзин. – М. : Агропромиздат, 1985. – 264 с.

3. **Назаров, В. В**. Реоцентрифуга / В. В. Назаров, Н. А. Морозов // Сборник докладов шестой Российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2003. – С. 146 – 148.

4. **Морозов, Н. А.** Совершенствование центробежной очистки автомобильных эксплуатационных материалов от механических примесей: дис. … канд. техн. наук : 05.22.10 / Н. А. Морозов. – Оренбург, 2006. – 194 с.

5. **Морозов, Н. А.** Метод центробежной очистки автомобильных эксплуатационных материалов от механических примесей / Н. А. Морозов, В. В. Назаров // Вестник ОГУ. Приложение «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – 2005. – № 12(50). – С. 95 – 101.

6. **Морозов, Н. А.** Теоретические предпосылки к измерению динамической вязкости продуктов на реоцентрифуге / Н. А. Морозов, В. В. Назаров // Сборник докладов седьмой Российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2005. – С. 193 – 197.

7. **Морозов, Н. А.** Измерение вязкости жидкостей на реоцентрифуге / Н. А. Морозов // Материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2005. – Ч. 2. – С. 240–241.

8. **Морозов, Н. А.** Оценка погрешности измерения вязкости автомобильных эксплуатационных материалов на реоцентрифуге / Н. А. Морозов // Сборник докладов десятой Международной научно-практическая конференция «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – Оренбург : Руссервис, 2011. – С. 210 – 212.

References

1. **Kartashov, L. P.** Centrobezhnye reoseparatory / L. P. Kartashov, V. V. Nazarov. – Ekaterinburg : UrO RAN, 1997. – 86 s.

2. **Gol'din, A. M.** Gidrodinamicheskie osnovy processov tonkoslojnogo separirovaniya / A. M. Gol'din, V. A. Karamzin. – M. : Agropromizdat, 1985. – 264 s.

3. **Nazarov, V. V.** Reocentrifuga / V. V. Nazarov, N. A. Morozov // Sbornik dokladov shestoj Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii “Progressivnye tekhnologii v transport-nyh sistemah”. – Orenburg : GOU OGU, 2003. – S. 146 – 148.

4. **Morozov, N. A.** Sovershenstvovanie centrobezhnoj ochistki avtomobil'nyh ehks-pluatacionnyh materialov ot mekhanicheskih primesej : dis. … kand. tekhn. Nauk : 05.22.10 / Morozov Nikolaj Anatol'evich. – Orenburg, 2006. – 194 s.

5. **Morozov, N. A.** Metod centrobezhnoj ochistki avtomobil'nyh ehksplua-tacionnyh materialov ot mekhanicheskih primesej / N. A. Morozov, V. V. Nazarov // Vestnik OGU. Prilozhenie «Progressivnye tekhnologii v transportnyh sistemah”. – 2005. – № 12(50). – S. 95 – 101.

6. **Morozov, N. A.** Teoreticheskie predposylki k izmereniyu dinamicheskoj vyazko-sti produktov na reocentrifuge / N. A. Morozov, V. V. Nazarov // Sbornik dokladov sed'moj Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii “Progressivnye tekhnologii v transportnyh sis-temah”. – Orenburg : IPK GOU OGU, 2005. – S. 193 – 197.

7. **Morozov, N. A.** Izmerenie vyazkosti zhidkostej na reocentrifuge / N. A. Morozov // Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh i specialistov Orenburgskoj oblasti. – Chast' 2. – Orenburg : IPK GOU OGU, 2005. – S. 240–241.

8. **Morozov, N. A.** Ocenka pogreshnosti izmereniya vyazkosti avtomobil'nyh ehks-pluatacionnyh materialov na reocentrifuge / N. A. Morozov // Sbornik dokladov desyatoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskaya konferenciya “Progressivnye tekhnologii v trans-portnyh sistemah”. – Orenburg : Russervis, 2011. – S. 210 – 212.

66.067.5

Морозов Н. А., Морозова И. А., Гаврилов А. А.
Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург
(Тел. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В ЦЕНТРИФУГАХ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СДВИГОМ ПОТОКА

Morozov N. A., Morozova I. A., Gavrilov A. A.
Orenburg State University, Russia, Orenburg
(Tel. 89619174792, e-mail: moroz.off.nick@yandex.ru)

SIMULATION OF MOTION OF SOLID PARTICLES IN CENTRIFUGES WITH ADJUSTABLE SHEAR FLOW

Аннотация. В данном исследовании моделировалось движение частиц твердой фазы в рабочей зоне центрифуги, имеющей дополнительный сдвиг потока. Определялись траектории движения частиц при различных начальных условиях осаждения и оценивалось влияние дополнительного сдвига потока на движение твердых частиц. Проводилось сравнение влияния условий центробежной очистки на траектории частиц твердой фазы при различных числах Гольдина.

Ключевые слова: центрифуга, сдвиг потока, твердая фаза, жидкая фаза, скорость частицы, траектория.

Abstract. In this study, the movement of solid particles in the working area of the centrifuge with an additional flow shift was simulated. The trajectories of particles under different initial deposition conditions were determined and the effect of additional flow shift on the motion of solid particles was estimated. A comparison was made of the influence of the centrifugal cleaning conditions on the trajectory of solid particles with different numbers of Goldin.

Keywords: centrifuge, flow shift, solid phase, liquid phase, particle velocity, trajectory.

Совершенствование центрифуг постоянно ставит новые цели и задачи по моделированию движения частиц в рабочей зоне разделения. Введение дополнительного сдвига потока жидкой фазы в рабочей зоне разделения влияет на осаждение частиц [1 – 5].

Задачей данного исследования является изучение влияния дополнительного сдвига потока жидкой фазы на траектории движения осаждаемых частиц твердой фазы.

Рассмотрим осаждение единичной частицы дисперсной фазы в потоке между двумя коническими тарелками, вращающимися с различными угловыми скоростями (рис. 1).

Дифференциальное уравнение движения осаждаемой частицы твердой фазы в зазоре между конусами имеет вид [6]

$$\frac{dx}{v_{Cm}\cdot\cos(\alpha)}=\frac{d\rho}{v_{\rho 0}-v_{Cm}\cdot\sin(\alpha)}, \qquad (1)$$

где x, ρ – координаты частицы, м; $v_{\rho 0}$ – начальная скорость частицы вдоль образующей конуса, м/с; v_{Cm} – скорость Стокса, м/с; α – угол наклона образующей конуса к вертикали, рад.

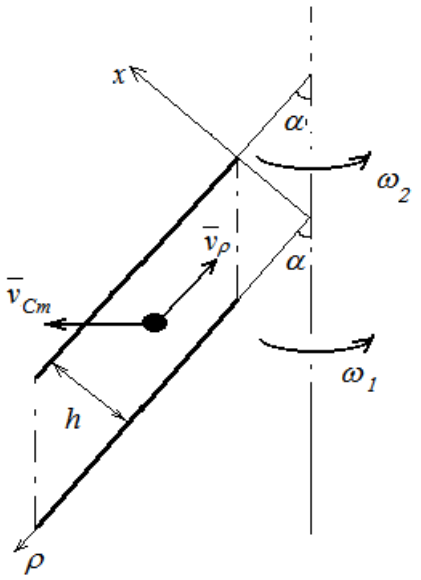


Рис. 1. Частица твердой фазы в межконусном пространстве

Скорость Стокса для осаждения в переменном поле центробежных сил [7]:

$$v_{Cm} = \frac{d^2(\rho_T - \rho_Ж)\cdot\omega^2(\chi)\cdot\rho\cdot\sin(\alpha)}{18\cdot\mu_A}, \tag{2}$$

где d – диаметр частицы твердой фазы, м; $\rho_T, \rho_Ж$ – плотности твердой и жидкой фазы, кг/м^3; μ_A – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с; $\omega(\chi)$ – переменная угловая скорость вращения жидкой фазы, 1/с.

Из уравнения (1)

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{v_{\rho 0}}{v_{Cm}\cdot\cos(\alpha)} - \mathrm{tg}(\alpha). \tag{3}$$

Величина $\frac{d\rho}{dx}$ намного превосходит $\mathrm{tg}(\alpha)$, следовательно, тангенсом пренебрегаем.

Перейдем к безразмерным величинам, используя линейную теорию Е. М. Гольдина [8]:

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{9Q\cdot N(\chi)\cdot\mu_A}{\pi\cdot h\cdot N_0\cdot d^2\cdot(\rho_T - \rho_Ж)\cdot\omega^2(\chi)\cdot\rho^2\cdot\sin^2(\alpha)\cdot\cos(\alpha)}, \tag{4}$$

где χ – безразмерная координата в направлении, перпендикулярном образующей конуса; Q – производительность центрифуги, м^3/ч.

Вспомогательные функции:

$$N(\chi,\lambda) = -\frac{\left[\sinh(\lambda\cdot(1-\chi))\cdot\sin(\lambda\cdot\chi) + \sinh(\lambda\cdot\chi)\cdot\sin(\lambda\cdot(1-\chi))\right]}{\cosh(\lambda)+\cos(\lambda)}, \tag{5}$$

$$N_0(\lambda) = -\frac{\sinh(\lambda)-\sin(\lambda)}{\lambda\left(\cosh(\lambda)+\cos(\lambda)\right)}, \tag{6}$$

где λ – критериальный параметр Гольдина.

Параметр Гольдина представляет собой отношение сил Кориолиса к силам вязкости:

$$\lambda = h \cdot \sqrt{\frac{\omega(\chi) \cdot \sin(\alpha)}{\nu}}, \tag{7}$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м^2/с; h – величина межконусного зазора, м.

Вследствие малости зазора между конусами можно принять линейное распределение угловой скорости по его ширине:

$$3\rho^2 d\rho = \frac{27Q \cdot N(\chi) \cdot \mu_A}{\pi \cdot N_0 \cdot d^2 \cdot (\rho_T - \rho_Ж) \cdot (\omega_1 - (\omega_1 - \omega_2) \cdot \chi)^2 \cdot \sin^2(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} d\chi. \tag{8}$$

Рассмотрим осаждение частиц твердой фазы в ньютоновской жидкости. Обозначим в уравнении (8) произведение членов, не зависящих от χ, через постоянную θ

$$\theta = \frac{27Q \cdot \mu}{\pi \cdot N_0 \cdot d^2 \cdot (\rho_T - \rho_Ж) \cdot \sin^2(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}. \tag{9}$$

Проинтегрируем левую часть уравнения (8) в пределах от ρ_0 до ρ, а правую – от χ_0 до χ.

$$\rho^3 - \rho_0^3 = \theta(\psi(\chi)|_\chi - \psi(\chi)|_{\chi_0}), \tag{10}$$

где $\psi(\chi) = \int -\frac{[\sinh(\lambda \cdot (1-\chi)) \cdot \sin(\lambda \cdot \chi) + \sinh(\lambda \cdot \chi) \cdot \sin(\lambda \cdot (1-\chi))]}{(\cosh(\lambda) + \cos(\lambda))(\omega_1 - (\omega_1 - \omega_2) \cdot \chi)^2} d\chi$.

Рассмотрим случай осаждения предельной частицы. Предельная частица имеет размер, который обеспечивает ее осаждение на выходе из межконусного пространства независимо от ее начальной координаты χ_0. Учитывая, что на выходе из межконусного пространства $\rho = \rho_1$, $\chi = 1$, $\psi(1) = 1$, из уравнения (10) будем иметь

$$\theta = \frac{\rho_1^3 - \rho_0^3}{(1 - \psi(\chi)|_{\chi_0})}. \tag{11}$$

Следовательно, траектории предельных частиц твердой фазы будут описываться уравнением

$$\frac{\rho^3 - \rho_0^3}{\rho_1^3 - \rho_0^3} = \frac{(\psi(\chi)|_\chi - \psi(\chi)|_{\chi_0})}{(1 - \psi(\chi)|_{\chi_0})}. \tag{12}$$

На рисунке 2 представлены траектории предельных частиц твердой фазы, полученные по формуле (12), для различных сдвигов потока и значений чисел Гольдина $\lambda = 6$ и $\lambda = 11$. Как видно из рисунка, при малых числах Гольдина сдвиг потока жидкой фазы практически не влияет на траектории осаждения частиц твердой фазы. При бóльших числах Гольдина влияние сдвига начинает прослеживаться только при бóльших разностях угловых скоростей вращения конусов ($\Delta\omega > 0{,}25\omega_1$). Причем значительно изменяются траектории только тех частиц, которые находятся на расстояниях, близких к поверхности внутреннего конуса. Траектории остальных частиц практически не меняются.

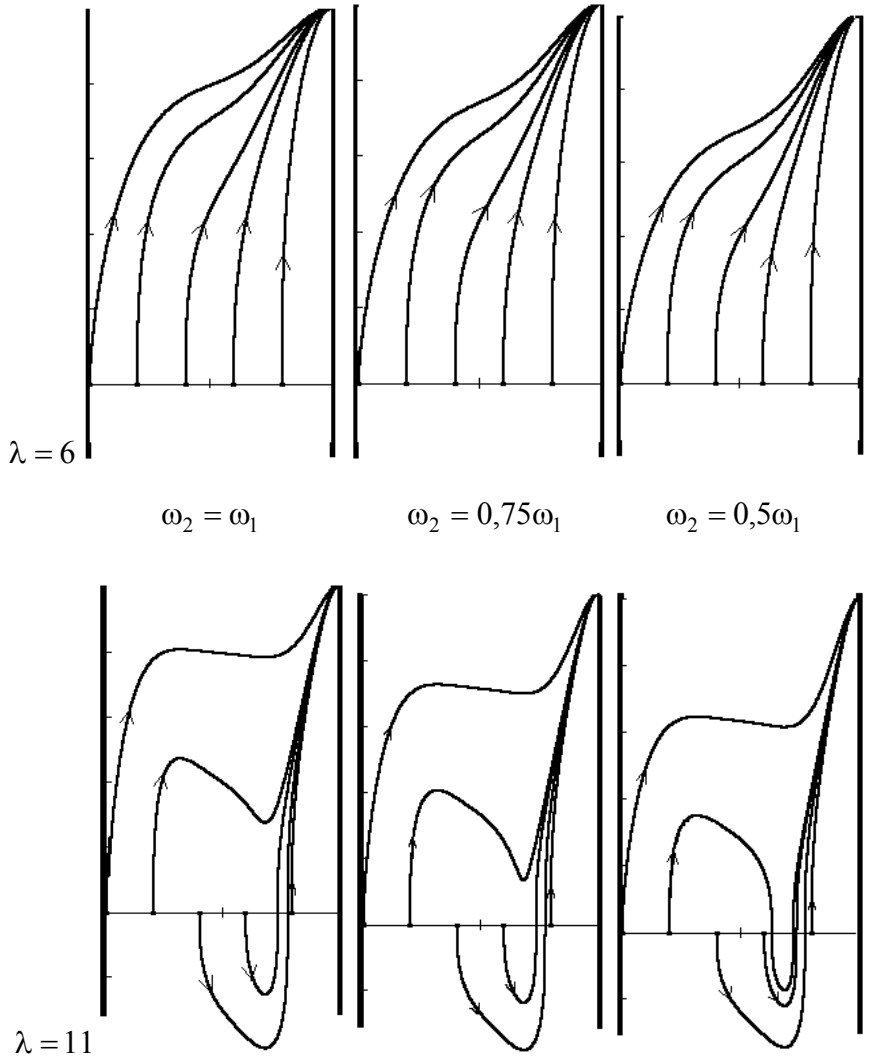


Рис.2. Траектории предельных частиц твердой фазы

Список использованных источников

1. **Назаров, В. В**. Реоцентрифуга / В. В. Назаров, Н. А. Морозов // Сборник докладов шестой Российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2003. – С. 146 – 148.

2. **Карташов, Л. П.** Центробежные реосепараторы / Л. П. Карташов, В. В. Назаров. – Екатеринбург : УрО РАН, 1997. – 86 с.

3. **Морозов, Н. А.** Исследование процесса осаждения частиц в реоцентрифуге / Н. А. Морозов // Сборник докладов седьмой Российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2005. – С. 188 – 192

4. **Морозов, Н. А.** Метод центробежной очистки автомобильных эксплуатационных материалов от механических примесей / Н. А. Морозов, В. В. Назаров // Вестник ОГУ. Приложение «Прогрессивные технологии в транспортных системах». – 2005. – № 12(50) – С. 95 – 101.

5. **Морозов, Н. А.** Кинематические характеристики частиц материала в рабочей зоне реоцентрифуги / Н. А. Морозов // Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 55-летию Оренбургского государственного университета

«Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации». – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2010. – С. 61 – 65.

6. **Морозов, Н. А.** Совершенствование центробежной очистки автомобильных эксплуатационных материалов от механических примесей : дис. … канд. техн. наук : 05.22.10 / Н. А. Морозов. – Оренбург, 2006. – 194 с.

7. **Лукьянов, Н. Я.** Теория и расчет молочных сепараторов / Н. Я. Лукьянов. – М. : Пищепромиздат, 1977. – 103 с.

8. **Гольдин, А. М.** Гидродинамические основы процессов тонкослойного сепарирования / А. М. Гольдин, В. А. Карамзин. – М. : Агропромиздат, 1985. – 264 с.

References

1. **Nazarov, V. V.** Reocentrifuga / V. V. Nazarov, N. A. Morozov // Sbornik dokladov shestoj Rossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Progressivny`e texnologii v transportny`x sistemax» Orenburgskij gosudarstvenny`j universitet. – Orenburg : GOU OGU, 2003. – S. 146 – 148.

2. **Kartashov, L. P.** Centrobezhny`e reoseparatory` / L. P. Kartashov, V. V. Nazarov. – Ekaterinburg: UrO RAN, 1997. – 86 s.

3. **Morozov, N. A.** Issledovanie processa osazhdeniya chasticz v reocentrifuge / N. A. Morozov // Sbornik dokladov sed`moj Rossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii “Progressivny`e texnologii v transportny`x sistemax” – Orenburg : IPK GOU OGU, 2005. – S. 188 – 192.

4. **Morozov, N. A.** Metod centrobezhnoj ochistki avtomobil`ny`x e`kspluatacionny`x materialov ot mexanicheskix primesej / N. A. Morozov, V. V. Nazarov // Vestnik OGU. Prilozhenie “Progressivny`e texnologii v transportny`x sistemax”. – 2005. – № 12(50) – S. 95 – 101.

5. **Morozov, N. A.** Kinematicheskie xarakteristiki chasticz materiala v rabochej zone reocentrifugi / N. A. Morozov // Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashhyonnoj 55-letiyu Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta “Nauka i obrazovanie: fundamental`ny`e osnovy`, texnologii, innovacii”. – Orenburg : GOU OGU, 2010. – S. 61 – 65

6. **Morozov, N. A.** Sovershenstvovanie centrobezhnoj ochistki avtomobil`ny`x e`kspluatacionny`x materialov ot mexanicheskix primesej : dis. … kand. texn. Nauk : 05.22.10 / Morozov Nikolaj Anatol`evich. – Orenburg, 2006. – 194 s.

7. **Luk`yanov, N. Ya.** Teoriya i raschet molochny`x separatorov / N. Ya. Luk`yanov. – M. : Pishhepromizdat, 1977. – 103 s.

8. **Gol`din, A. M.** Gidrodinamicheskie osnovy` processov tonkoslojnogo separirovaniya / A. M. Gol`din, V. A. Karamzin. – M. : Agropromizdat, 1985. – 264 s.

УДК 378.14:004.9

Минаев С. Г., Грудинин Н. С., Телепина А. А., Ищенко Д. А.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89807815810, e-mail: minaev777333@gmail.com)

УСТРОЙСТВА ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Minaev S. G., Grudinin N. S., Telepina A. A., Ishchenko D. A.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. 89807815810, e-mail: minaev777333@gmail.com)

AUGMENTED REALITY DEVICES IN PRODUCTION

Аннотация. Показано исследование удобства и эффективности использования устройств дополненной реальности при сборке агрегатов, а также различия в производительности сборки между использованием бумажной инструкции и инструкции расширенной реальности.

Ключевые слова: дополненная реальность, виртуальный объект, очки дополненной реальности.

Abstract. The study shows the convenience and efficiency of using augmented reality devices when assembling units, as well as differences in assembly performance between using paper instructions and augmented reality instructions.

Keywords: augmented reality, virtual object, augmented reality glasses.

Дополненная реальность – термин дополненной реальности также может скрываться под буквами AR – Augmented reality. Эта технология позволяет существенно расширить область данных, воспринимаемых человеком. Такое расширение сознания достигается за счет переноса в реальный мир цифровой информации. Процесс формирования дополненной реальности происходит за счет камеры смартфона, веб-камеры или прочего устройства, которое может обрабатывать видеосигнал. Специальная программа дополнит картинку необходимыми виртуальными объектами. В качестве элементов AR-технологии могут выступать видео- и аудио- материалы, 3D-модели, а также текстовый контент.

Основным различием между технологией дополненной реальности и виртуальным аналогом является соотношение информации, полученной из реального мира и обработанной компьютером [1 – 5]. Виртуальная реальность пытается всецело поглотить настоящий мир, а дополненная лишь расширяет понимание о происходящем в нем процессах.

Среди наиболее распространенных примеров дополнения воспринимаемой реальности – параллельная лицевой цветная линия, показывающая нахождение ближайшего полевого игрока к воротам при телевизионном показе футбольных матчей, стрелки с указанием расстояния от места штрафного удара до ворот, «нарисованная» траектория полета шайбы во время хоккейного матча, смешение реальных и вымышленных объектов в кинофильмах и компьютерных или гаджетных играх и т.п.

На сегодняшний день среди устройств дополненной реальности можно выделить портативные устройства, стационарные и проекционные системы, очки и линзы дополненной реальности.

Портативные устройства – это самый бюджетный способ соприкоснуться с дополненной реальностью. К ним относят мобильные телефон и планшетные компьютеры. Главное требование к устройству – это наличие качественной камеры с высоким разрешением.

Стационарные системы – это широкоформатные экраны, оборудованные камерами с высоким разрешением, которые располагаются на одном месте. Такие системы не очень удобны в подвижной работе, зато демонстрируют более реалистичную визуализацию.

В отличие от стационарных систем дополненной реальности проекционные системы накладывают изображение на любую поверхность, и для их работы не требуется отдельный экран.

Наиболее широко используются очки дополненной реальности, надев которые, человек видит виртуальные объекты, наложенные на окружающую действительность.

Линзы для дополненной реальности все еще остаются предметом исследований технологических гигантов, включая Samsung, Google и Microsoft. Идея заключается в том, чтобы превратить обычные линзы в прозрачный электронный экран, содержащий систему управления, миниатюрную камеру, антенну, светодиоды и другие оптоэлектронные компоненты. В частности, компания Samsung уже подала патент на «умные» контактные линзы.

Дополнительная реальность уже охватывают множество сфер: инструменты для автоматизации процессов и повышения производительности, обучение сотрудников, сокращение брака продукции, повышение эффективности логистических процессов, обеспечение безопасности труда.

Например, с помощью дополненной реальности рабочие могут оперативно получать доступ к инструкциям и руководствам по любой детали (рис. 1). Информацию они получают в виде наглядной трехмерной анимации, видео, аудио, фотографиях, картинках или графиках. Такой подход позволяет снизить требования к квалификации специалистов и уменьшить время на изучение и просмотр рабочих инструкций. Причем сама система способна распознать форму детали и ее номер и вовремя подсказать, если техник предпринял ошибочные действия по ее монтажу.

Рис. 1. Доступ к инструкции AR

Профессиональные сборщики способны решать нестандартные проблемы, с которыми не справятся машины; следовательно, их значение в сложной сборке важно и сегодня. Задача состоит в том, чтобы сбор информации для каждой задачи укладывался в заданное время. Дополненная реальность (AR) предоставляет новые возможности для повышения производительности сборки. Быстрое развитие небольших недорогих технологий, таких как карманные компьютеры, дисплеи и камеры с достаточной вычислительной мощностью и долговечными батареями, позволили использовать легкие мобильные AR-системы. Проводились исследования удобства использования дополненной реальности в сборке промышленными работниками, которые фокусировались на сборке силового агрегата трактора Valtra Plc. Эксперимент проводился в Tampere University of Technology. Задача состояла в том, чтобы собрать детали в правильном порядке в правильном положении и как можно скорее. Мастера выполнили две задачи сборки: одну – с бумажными инструкциями и другую – с инструкциями AR, которые проецировались на объектив на головном дисплее. Время выполнения обеих задач было измерено.

Экспериментальные результаты показали, что их система помогла людям справиться с задачами сборки лучше с использованием дополненной реальности. Также система может сократить время завершения сборки и количество бесполезных движений рук.

Три учебных материала сравнивались с системой AR: печатное руководство пользователя, компьютерная инструкция, использующая монитор, и головной дисплей. Задача сборки была основана на блоках, состоящих из 56 процедурных шагов. Работники должны были вставить деталь в текущий узел в определенном положении и ориентироваться в соответствии с инструкцией. Результаты исследований: печатное руководство 14 мин 24 с; компьютерная инструкция с использованием монитора на мониторе 11 мин 25 с; компьютерная инструкция с использованием головного устройства 11 мин 8 с; устройства дополненной реальности 10 мин 39 с. Значительная разница была по частоте ошибок. Пользователи с системой AR в ходе задачи в среднем в десять раз меньше ошибок. Также измерение умственных усилий показало снижение умственных усилий в случае AP.

Таким образом, показано исследование удобства и эффективности использования устройств дополненной реальности при сборке агрегатов, а также различия в производительности сборки между использованием бумажной инструкции и инструкции расширенной реальности. С помощью бумажных инструкций сборка заняла около получаса, и с инструкциями, основанными на дополненной реальности, производительность была примерно на пять минут быстрее. Прорыв этого проекта может облегчить проблему, связанную с передачей информации между технологом и сборщиком на этапе сборки.

Список использованных источников

1. **Фролов, С. В.** Методы решения глобальной задачи управления для распределенных иерархических систем с интервальной неопределенностью / С. В. Фролов, Т. А. Фролова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 4(189). – С. 232 – 245.

2. **Фролова, Т. А.** Решение интервальных математических моделей технологических процессов / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование».

3. **Фролова, Т. А.** Архитектура системы поддержки принятия решений оценки эффективности инвестиционных проектов / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – С. 221 – 215.

4. **Фролова, Т. А.** Mathematical model with uncertain parameters for the burning process / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2, т. I. – С. 249 – 252.

5. **Фролова, Т. А**. Совершенствование механизма прогнозирования продаж продукции машиностроительного предприятия : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / Т. А. Фролова, И. И. Данилкина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2, т. I. – С. 231 – 235.

References

1. **Frolov, S. V.** Methods for solving a global control problem for distributed hierarchical systems with interval uncertainty / S. V. Frolov, T. A. Frolova // News SFU. Technical sciences. – 2017. – № 4(189). – C. 232 – 245.

2. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D. S. Inhabitants of Tula. Solution of interval mathematical models of technological processes Electronic scientific and technical issuing “Science and education”. Al. № FS 77-48211. State registration № 0421200025. Engineering education, #09, сент. 2012, http://technomag.edu.ru/doc/454499.html

3. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D. S. Arkhitektur's Inhabitants of Tula of system of support of decision-making of assessment of efficiency of investment projects // Virtual modeling, prototyping and industrial design. Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2015. – P. 221 – 215.

4. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D. S. Inhabitants of Tula of Mathematical model with uncertain parameters for the burning process // Virtual modeling, prototyping and industrial design Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2016. – Release 2, V. I. – P. 249 – 252.

5. **Frolova, T. A.**, Danilkina, I. I. Improvement of the mechanism of forecasting of sales of production of machine-building enterprise. Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2016. – Release 2, V. I. – C. 231 – 235.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н., Родина А. А.,
Фидаров В. Х., Скоморохова А. И.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВЯЗИ С ЦИФРОВОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ (СТРУЙНОЙ) СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ВО ВНУТРЕННИХ ЦЕПЯХ ЗУБОРЕЗНЫХ СТАНКОВ

Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A.,
Fidarov V. H., Skomorokhova A. I.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov,
(tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

HYDRAULIC CONNECTIONS WITH A DIGITAL PNEUMATIC (JET) CONTROL SYSTEM IN THE INTERNAL CIRCUITS OF GEAR CUTTING MACHINES

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения в качестве управляющего устройства шаговым гидравлическим двигателем цифровой системы, построенной на струйных элементах и предназначенной для изменения передаточного отношения в широких пределах гидравлических внутренних цепей зубообрабатывающих станков с исполнительными силовыми шаговыми гидродвигателями.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The article considers the possibility of using as a control device stepper hydraulic motor digital system built on jet elements and designed to change the transmission ratio within a wide range of hydraulic internal circuits of gear machines with executive power stepper motors.

Keywords: optimum design, metal-cutting machine, hydraulic stepper drive, hydraulic generator pulses.

Одним из возможных способов повышения точности металлорежущих станков при одновременном росте их эксплуатационной надежности является сокращение протяженности кинематических цепей, составленных из механических звеньев. Это достигается благодаря применению высокоточных приводов, обеспечивающих возможность прямого непосредственного соединения двигателя нагрузкой (заготовкой и инструментом), исключая при этом коробки скоростей, коробки передач, промежуточные механические передачи и редукторы. Наиболее наглядно потребность в этом проявляется в зубообрабатывающих станках, имеющих сложные разветвленные многозвенные механические цепи значительной протяженности, где необходимо обеспечить жесткую кинематическую связь для создания взаимосвязанных движений заготовки и инструмента. Наличие значительного числа подвижных звеньев в механических цепях вносит кинематические и геометрические погрешности, которые переносятся на обрабатываемые изделия.

Повышение точности станков может быть достигнуто за счет сокращения протяженности механических кинематических цепей благодаря применению гидравлических

связей в виде гидравлического шагового привода [1, 2]. Такой привод, где в качестве исполнительного силового узла применяются шаговые гидродвигатели с механической редукцией шага различного исполнения, в том числе волновые, может обрабатывать дискретные управляющие сигналы с высокой точностью и большим усилием по мощности. Это является важным условием для построения разомкнутых систем с дискретными управляющими устройствами и обеспечивает их использование в качестве исполнительного органа во внутренних цепях зубообрабатывающих станков.

Применение гидравлических шаговых приводов во внутренних (формообразующих) цепях зубообрабатывающих станков сдерживается отсутствием быстропереналаживаемых систем управления, функционально аналогичных электронным коммутатором.

Требования достижения высокой точности обработки шагов при дискретном угловом перемещении выходного вала шагового гидродвигателя и одновременно необходимая скорость перемещения приводят к необходимости обеспечивать высокую частоту переключения такой системы, к которой предъявляются высокие требования по надежности и долговечности (отсутствие пропуска управляющих импульсов, большого ресурса по циклам срабатывания).

Для обеспечения регулирования передаточного отношения в достаточных для практики пределах и возможности нарезания зубчатых колес произвольно заданным числом зубьев. Одним из путей решения является использование средств струйной техники.

Для реализации системы управления шаговыми гидродвигателями, размещенными во внутренних цепях станков (цепи деления, обката, винторезные, затылования) для привода инструмента и заготовки, рассмотрена, апробирована и доведена до практической реализации цифровая система, построенная на струйных элементах системы «Волга», обладающих хорошими показателями по быстродействию, широким диапазоном функциональных возможностей, необходимым запасом мощности.

Цифровая система управления, реализованная на элементах «Волга», делает возможным синхронную работу шаговых гидродвигателей привода заготовки и изделия [3].

Построение системы управления гидравлической связи на основе шагового гидропривода осуществляется на основе модульного принципа, который позволяет компоновать любую систему из функционального и конструктивного завершенных модулей (блоков), взятых в таком сочетании, что позволяет обеспечить требуемые характеристики. При проектировании логической части цифровой системы управления используется метод канонического синтеза, который позволяет применить для описания отдельных составляющих блоков этой системы модели автоматов Мили и Мура. При построении системы управления необходимо учитывать особенность управления многошаговым гидравлическим двигателем, работа которого зависит от числа последовательности гидравлических импульсов, распределяемых по силовым рабочим камерам шагового гидродвигателя, когда каждому управляющему импульсу соответствует определенный угол поворота выходного вала шагового гидродвигателя. Скорость вращения и угол поворота выходного вала пропорциональны соответственно частоте следования и количеству поданных управляющих импульсов.

При использовании во внутренних кинематических цепях шаговых гидродвигателей функциональная связь между заготовкой и инструментом осуществляется благодаря тому, что расход рабочей жидкости преобразуется и распределяется в определенную последовательность гидравлических импульсов, каждому из которых соответствует определенный угол поворота выходных валов шаговых гидродвигателей, кинематически связанных с конечными (делительными) передачами исполнительных органов станка (заготовкой и инструментом). При этом угол поворота пропорционален количеству импульсов, а скорость вращения пропорциональна частоте их следования. Используя свойство частного регулирования скоростей исполнительных органов шагового гидропривода, возможно применить его во внутренней цепи зубодолбежного станка для нарезания некруглых колес [4, 5].

Принципиальная схема такой гидравлической кинематической связи с исполнительными гидравлическими шаговыми двигателями со струйной системой управления представлена на рис. 1.

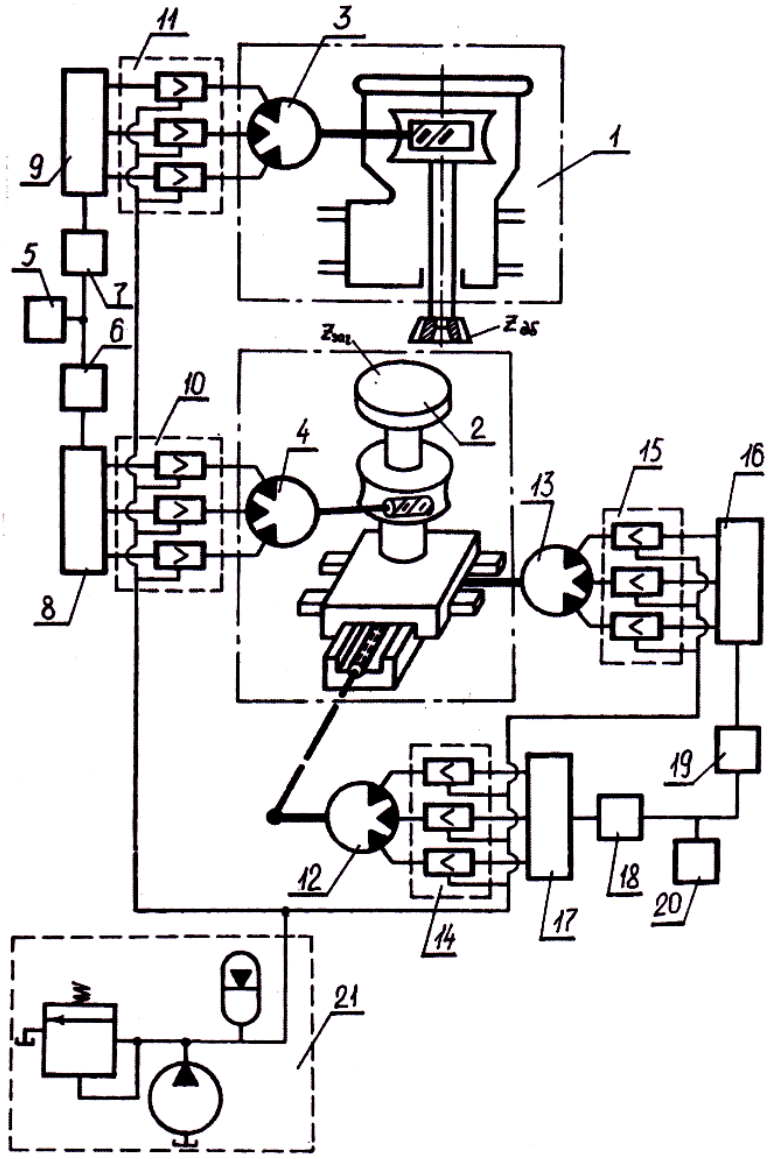


Рис. 1. Структурная схема зубодолбежного станка

В основе метода обработки лежит метод обката, заключающийся в качении некруглой центроиды колеса по круглой центроиде долбяка. Нарезание некруглого колеса по методу обката производится обычным стандартным зуборезным долбяком.

Гидравлическая связь, осуществляющая процесс обкатки, включает в себя исполнительные шаговые гидродвигатели и струйную (пневматическую) систему управления и реализуется тремя взаимосвязанными движениями: вращением заготовки некруглого колеса, установленного на столе от шагового гидродвигателя *3* через червячную передачу; вращением зуборезного долбяка от шагового гидродвигателя *3* через червячную передачу; поступательным перемещением стола с заготовкой *2* в продольном и поперечном направлении от шаговых гидродвигателей *13* и *12* соответственно через винтовые передачи.

При этом при одном равномерном движении (вращение долбяка) два других движения являются неравномерными, а отношения скоростей этих движений непостоянны.

Передаточное отношение между исполнительными органами гидравлической связи между заготовкой и инструментом зависит от соотношения частот гидравлических импульсов, подаваемых к гидравлическим шаговым двигателям привода шпинделя и стола с заготовкой.

Необходимая частота следования управляющих импульсов и распределения их по силовым каналам и рабочим камерам шаговых гидродвигателей обеспечивается пневматической (струйной) системой управления.

Гидравлическая внутренняя связь на основе шагового привода содержит узел инструмента *1*, узел заготовки *2*, гидравлические шаговые двигатели *3* и *4* привода продольного и поперечного перемещения стола с заготовкой, пневматические генераторы *5* и *20* опорной частоты, струйные делительные устройства *6* и *7*, *18* и *19*, устройства распределения *8* и *9*, *16* и *17* управляющих импульсов, пневмогидравлические преобразователи усилители *10* и *11*, *14* и *15*, насосную установку *21*.

Пневматические генераторы *5* и *20* опорной частоты непрерывно вырабатывают пневматические импульсы, которые поступают на входы струйных делительных устройств, в зависимости от требуемого передаточного отношения, которое представляет собой отношение угловых скоростей долбяка и заготовки и определяется количеством управляющих импульсов, поступающих к шаговым гидродвигателям *3* и *4* вращения долбяка и заготовки, а также к шаговым гидродвигателям *12* и *13* привода перемещения стола с заготовкой в продольном и поперечном направлениях для обеспечения движения заготовки по центроиде. Делительные устройства пропускают определенные, либо четные, либо нечетные номера импульсов, вырабатываемых генераторами *5* и *20* опорной частоты. Пропускаемые импульсы поступают на входы устройств распределения *8* и *9*, *16* и *17* управляющих импульсов по каналам и рабочим камерам шаговых гидродвигателей, а с устройств распределения – на дискретные пневмогидравлические преобразователи – усилители *10* и *11*, *14* и *15*, выходы которых подключают напорную и сливную магистрали насосной установки *21* к рабочим камерам шаговых гидродвигателей *3* и *4* привода вращения долбяка и заготовки, а также гидравлических шаговых двигателей *12* и *13* привода перемещения стола с заготовкой в продольном и попереч-

ном направлениях, чем обеспечивается движение заготовки по центроиде при нарезании некруглых зубчатых колес.

Цифровая струйная система управления шаговым гидродвигателем при применении ее в зубообрабатывающих станках позволит осуществить регулирование передаточного отношения цепей деления (обката), винторезных и т.п. и обеспечить настройку станков на обработку изделий с произвольно заданными параметрами (чисел зубьев, шага резьбы).

Благодаря использованию гидравлических связей на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях станков существенно упрощается кинематика станка, снижается металлоемкость и масса станка.

За счет исключения из кинематических цепей всех механических передач, кроме делительных червячных передач привода заготовки и инструмента и ходовых винтов, уменьшается накопленная погрешность изделия, так как погрешность гидравлической связи не зависит от расстояния между коммутирующим (управляющим) устройством и исполнительным шаговым гидродвигателем, значительно сокращается протяженность кинематической цепи между инструментом и изделием. Применение цифровой струйной системы управления позволит повысить мобильность гидравлических связей при осуществлении регулирования передаточного отношения, внутренних цепей станков.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Гидравлические связи на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 10. – С. 28 – 36.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков с гидравлическими формообразующими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина // СТИН. – 2014. – № 5. – С. 2 – 8.

4. **Колодин, А. Н.** Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями : монография / А. Н. Колодин, В. А. Ванин, А. А. Родина. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 с.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

References

1. **Vanin, V. A.** Hydraulic connection on the basis of the hydraulic stepper in the internal (formative) chains of metal cutting machines with complex movements of formation / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2014. – № 10. – P. 28 – 36.

2. **Vanin, V. A.** Machines with a hydraulic internal (formative) relationships based on the walking hydraulic drive for processing spiral surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with hydraulic forming ties / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // STIN. – 2014. – № 5. – P. 2 – 8.

4. **Kolodin, A. N.** Relieving the forming machines with hydraulic connections : Monograph. / A. N. Kolodin, V. A.Vanin, A. A. Rodina. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 p.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н., Родина А. А., Фидаров В. Х.,
Казанков А. А., Воронина М. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ (СТРУЙНОЙ) СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМИ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A., Fidarov V. H.,
Kazankov A. A., Voronina M. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

THE USE OF A PNEUMATIC (JET) SYSTEM TO CONTROL INTERNAL HYDRAULIC CONNECTIONS OF GEAR CUTTING MACHINES

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения в качестве управляющего устройства шаговым гидравлическим двигателем цифровой системы, построенной на струйных элементах и предназначенной для изменения передаточного отношения в широких пределах гидравлических внутренних цепей зубообрабатывающих станков с исполнительными силовыми шаговыми гидродвигателями.

Ключевые слова: струйная система управления, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The article considers the possibility of using a hydraulic stepper motor as a control device of a digital system built on jet elements and designed to change the transmission ratio within a wide range of hydraulic internal circuits gear machines with executive power stepper motors.

Keywords: jet control system, metal-cutting machine, hydraulic stepper motor, hydraulic generator pulses.

Одним из путей повышения точности металлорежущих станков при одновременном росте их эксплуатационной надежности является сокращение протяженности кинематических цепей благодаря применению приводов, обеспечивающих возможность непосредственного соединения исполнительного двигателя с нагрузкой (заготовкой и инструментом), исключая при этом промежуточные механические передачи, коробки скоростей, редукторы, коробки подач.

Наиболее наглядно эта потребность проявляется в резьбо- и зубообрабатывающих станках, имеющих в своем составе сложные разветвленные многозвенные кинематические внутренние цепи значительной протяженности, в которых необходимо обеспечить жесткую кинематическую связь для создания точного взаимосвязанного формообразующего движения между заготовкой и инструментом.

Одним из возможных решений сокращения протяженности кинематической цепи с целью повышения точности, жесткости станка, уменьшения металлоемкости и массы станка, может быть применение гидравлических связей, выполненных в виде гидравлического шагового привода.

В качестве исполнительных силовых органов в гидравлических связях используются гидравлические шаговые двигатели, преобразующие последовательность гидравлических импульсов управления в дискретные угловые или линейные перемещения, при этом скорость вращения и суммарный угол поворота выходного вала шагового гидродвигателя пропорциональны соответственно частоте и количеству поданных управляющих импульсов; при отсутствии входных сигналов звено удерживается в зафиксированном положении [1, 5].

Использование дискретных устройств позволяет существенно упростить систему управления, получить достаточную точность и быстродействие при разомкнутой системе управления за счет однозначного соответствия между числом и частотой управляющих импульсов, числом и частотой отработки дискретных перемещений (угловых или линейных) на выходе исполнительных органов.

Применение гидравлических связей на основе шагового гидропривода во внутренних цепях станков сдерживается отсутствием быстропереналаживаемых систем управления, функционально аналогичных электронным коммутаторам, обеспечивающих требования высокой точности (малой цены шага), высокие требования по надежности (отсутствие пропуска импульсов).

Одним из возможных путей решения этих задач может быть использование средств струйной техники.

Система управления (СУ) гидравлическими шаговыми двигателями (ГШД), размещенными в гидравлической цепи обката (деления) зубодолбежного станка, для привода заготовки и инструмента, реализована на элементной базе системы «Волга», обеспечивает регулирование передаточного отношения и возможность нарезания зубчатых колес с произвольно заданным числом зубьев [2 – 4].

Структурная схема СУ представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема пневматической (струйной) СУ

Параметры работы системы, т.е. информация о передаточном отношении цепи деления, шаге, направлении вращения выходных валов ГШД задается на пульте управления *1*. Информация с пульта управления поступает в управляющее устройство *2*, обеспечивающее выработку в определенной последовательности импульсов управления шаговыми гидродвигателями исполнительных устройств *4*, расположенными в узлах привода заготовки и долбяка. Для согласования ГШД со струйной СУ служит блок пневмогидравлических дискретных преобразователей-усилителей (ПГДП) *3*. Пневматические элементы системы управления питаются от воздушного компрессора *5*, а гидравлическая часть от насосной станции *6*.

Ниже в качестве примера рассмотрена структурная схема зубодолбежного станка для нарезания шевронных колес (рис. 1), цепь деления которого построена с использованием гидравлических связей на основе шагового гидравлического привода, управляемого цифровой пневматической (струйной) системой управления.

Станок включает в себя пневматический генератор тактовых импульсов *1*, сигналы от которого поступают в пневматические управляющие устройства *2* и *3*. Управляющие устройства *2* и *3* распределяют тактовые импульсы по каналам управления гидравлическими шаговыми двигателями *6* и *12*. Преобразование пневматических сигналов низкого давления в гидравлические импульсы высокого давления, необходимые для управления ГШД, происходит в блоках пневмогидравлических дискретных преобразователей-усилителей *4* и *5*.

Блок инструментов *10* получает возвратно-поступательное движение $П_2$ от электродвигателя *Д* через звено настройки i_v. Вращательное движение $В_2$ инструментов осуществляется гидравлическим шаговым двигателем *6*, кинематически связанным с инструментами посредством червячных передач *7*.

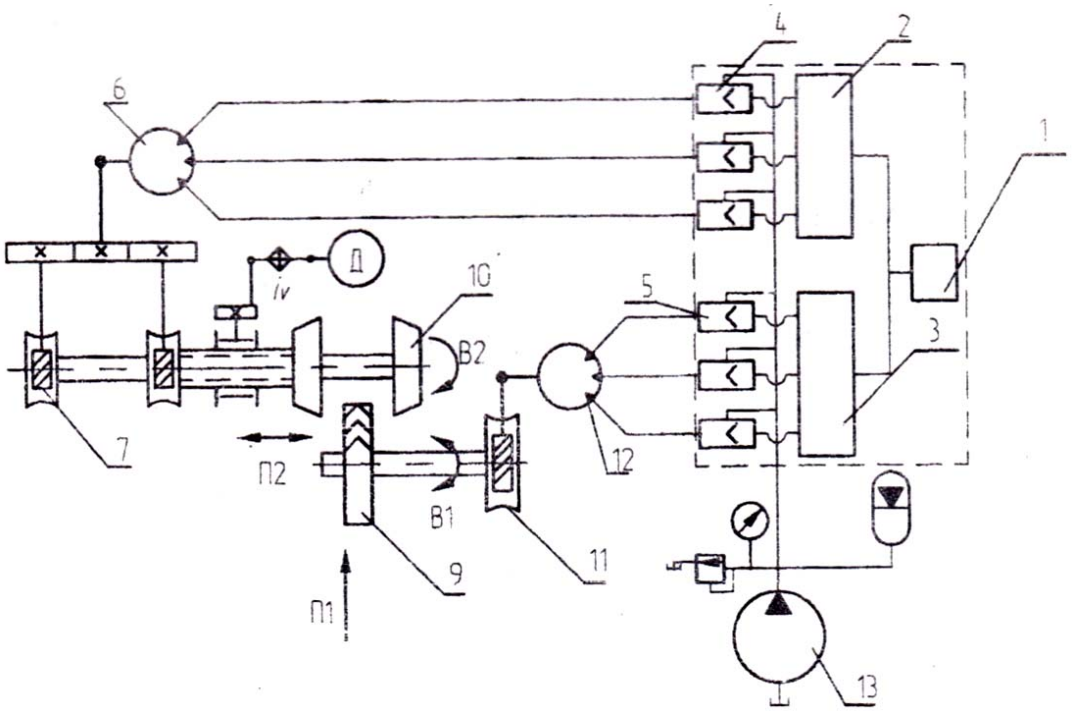


Рис. 2. Структурная схема зубодолбежного станка с внутренними гидравлическими связями и пневматической (струйной) системой управления

Вращение B_1 заготовки *9* осуществляется гидравлическим шаговым двигателем *12*, кинематически связанным с заготовкой посредством червячной передачи *11*.

Рабочая жидкость к гидравлическим шаговым двигателям поступает от насосной станции *13*.

Практическая целесообразность применения гидравлических связей на основе шагового гидропривода со струйной системой управления во внутренних цепях металлорежущих станков заключается в следующем:

– сокращается протяженность кинематических цепей за счет уменьшения до возможного минимума количества промежуточных звеньев, составляющих внутреннюю кинематическую цепь, что существенно упрощает кинематику станка;

– улучшается технологичность конструкции станка, обеспечивая более рациональную компоновку при сложном пространственном расположении рабочих органов станка;

– уменьшается металлоемкость и масса станка;

– струйная система управления шаговыми гидродвигателями позволяет осуществить регулирование передаточного отношения цепей обката (деления) зубообрабатывающих станков на обработку изделий с произвольно заданным числом зубьев.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Гидравлические связи на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 10. – С. 28 – 36.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков с гидравлическими формообразующими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина // СТИН. – 2014. – № 5. – С. 2 – 8.

4. **Колодин, А. Н.** Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями : монография / А. Н. Колодин, В. А. Ванин, А. А. Родина. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 с.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

References

1. **Vanin, V. A.** Hydraulic connection on the basis of the hydraulic stepper in the internal (formative) chains of metal cutting machines with complex movements of formation / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2014. – № 10. – P. 28 – 36.

2. **Vanin, V. A.** Machines with a hydraulic internal (formative) relationships based on the walking hydraulic drive for processing spiral surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with hydraulic forming ties / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // STIN. – 2014. – № 5. – P. 2 – 8.

4. **Kolodin, A. N.** Relieving the forming machines with hydraulic connections : Monograph. / A. N. Kolodin, V. A.Vanin, A. A. Rodina. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing. – 2015. – 169 p.

5. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – № 34(12). – P. 763 – 768.

УДК 621.914.7: 621.833

Ванин В. А., Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВНУТРЕННИХ (ФОРМООБРАЗУЮЩИХ) ЦЕПЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ШАГОВОГО ГИДРОПРИВОДА

Vanin V. A., Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

REALIZATION OF CONSTRUCTION OF HYDRAULIC INTERNAL (FORMING FORMING) CHAINS OF METAL CUTTING MACHINES ON THE BASIS OF THE STEP HYDRAULIC DRIVE

Аннотация. Рассмотрена возможность построения внутренних (формообразующих) кинематических цепей станков различного технологического назначения в виде унифицированных гидравлических связей на основе шагового гидропривода с целью повышения точности, снижения металлоемкости. Приведены примеры структурных схем станков с гидравлическими связями, построенных по агрегатно-модульному принципу.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The possibility of building internal (shaping) kinematic chains of machine tools of various technological purposes in the form of unified hydraulic connections based on stepper hydraulic drive with the aim of increasing accuracy and reducing metal consumption is considered. The examples of structural schemes of machines with hydraulic connections, built according to the aggregate-modular principle are given.

Keywords: optimum building, metal-cutting machine, hydraulic stepper motor, hydraulic generator pulses.

Одной из актуальных задач при решении проблемы управления точностью обработки, при оценке точности станка на стадии проектирования, при установлении отдельных параметров, определяющих точность обработки, является выбор наиболее эффективного по критерию точности варианта построения внутренних (формообразующих) цепей станков, которые обеспечивают жесткую функциональную связь для создания точных взаимосвязанных формообразующих движений заготовки и инструмента, выявление доминирующих факторов в балансе точности, составление баланса точности формообразующих цепей и станка в целом.

При создании новой модели металлорежущего станка или модернизации существующей модели актуальной становится задача проектирования и построения внутренних (формообразующих) цепей станков, представляющих собой часть общей структуры станка, рациональной по функциональной точности, многозвенности, металлоемкости [1 – 4].

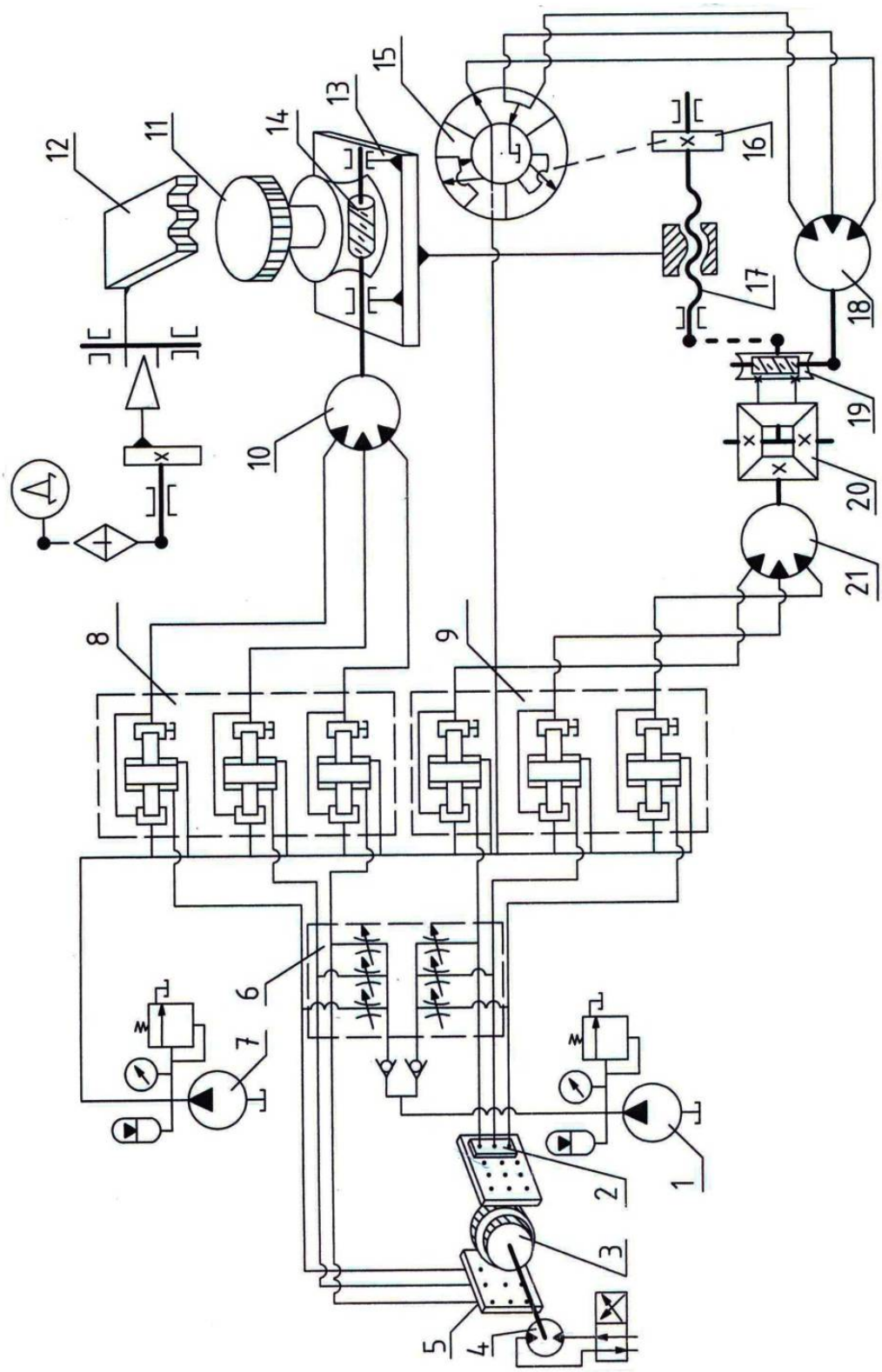


Рис. 1. Структурная схема зубострогального станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес зуборезной гребенкой

На рисунке 1 представлена структурная схема зубострогального станка с внутренними гидравлическими связями для нарезания зубьев цилиндрических зубчатых колес зуборезной гребенкой [3] с системой управления от блоков гидрораспределителей, построенной на базе двухкромочного золотника, с торцовым распределителем рабочей жидкости [5].

Станок включает в себя инструмент *12*, который совершает возвратно-поступательное движение от электродвигателя *Д* через звено настройки i_v, заготовку *11*, которая получает вращение от шагового гидродвигателя *10* посредством червячной передачи *14*, связанной с круглым столом.

Поступательное перемещение прямоугольного стола *13* вместе с круглым столом и заготовкой *11* осуществляется шаговым гидродвигателем *21*, выходной вал которого через суммирующий механизм *20* в виде дифференциала с коническими колесами кинематически связан посредством ходового винта *17* с прямоугольным столом *13*.

Для получения круглым столом с заготовкой сложного движения формообразования, вызванного тем, что движение обката составлено из разнородных движений: поступательное перемещение прямоугольного стола и вращательного движения круглого стола, а также тем, что стол является общим исполнительным звеном, одновременно принадлежащим группам деления и обката, соединение групп осуществляется через суммирующий механизм (дифференциал) *20*.

Дополнительное движение осуществляется шаговым гидродвигателем *18*, кинематически связанным с ходовым винтом продольной подачи прямоугольного стола *13* посредством червячной передачи *19* и управляемым генератором гидравлических импульсов *15*, золотниковая втулка с рабочим щелями которого получает вращение от приводного зубчатого колеса *16*, закрепленного на ходовом винте продольного перемещения прямоугольного стола.

Управление шаговым гидродвигателями *10* и *21* приводов вращения круглого стола с заготовкой *11* и продольного перемещения прямоугольного стола *13* осуществляется от блоков *8* и *9* гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости, выполненных на базе двухкромочного золотника.

Настройка цепи формообразования, связывающей между собой в необходимом соотношении на требуемое передаточное отношение вращение круглого стола с заготовкой и продольное перемещение прямоугольного стола, производится генератором гидравлических импульсов, который представляет собой устройство, выполненное в виде набора кодирующих дисков *3*, закрепленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора *4*.

Количество таких кодирующих дисков в генераторе определяет общее число передаточных отношений гидравлической связи.

Генератор гидравлических импульсов формирует гидравлические импульсы давления и распределяет их по рабочим камерам шаговых гидродвигателей путем периодического в определенной последовательности открытия и закрытия рабочих щелей.

Наружная поверхность каждого из кодирующих дисков выполнена таким образом, что его выступы либо перекрывают сопло, либо оставляют его открытым, при этом один выступ диска может перекрывать только лишь одну щель.

При таком расположении щелей относительно выступов вращающегося кодирующего диска через две оставшиеся не перекрытыми щели рабочая жидкость поступает на слив, а одна щель всегда перекрывается выступом диска. Поверхность кодирующего диска и рабочая щель (сопло) образует управляемый дроссель, а пространство между соплом и постоянным дросселем образует междроссельную камеру, давление в которой зависит от величины зазора между соплом и поверхностью выступов кодирующего диска.

В момент, когда выступ вращающегося диска генератора гидравлических импульсов находится напротив рабочей щели и перекрывает ее, происходит скачкообразное повышение управляющего давления в междроссельный камере, в результате чего происходит переключение гидрораспределителя. При отсутствии управляющего сигнала (импульса давления) распределитель находится в левом положении под действием давления питания. Рабочая жидкость для получения управляющих импульсов для гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости поступает от насосной установки *1* через блок управляемых дросселей *6*. Генератор гидравлических импульсов обеспечивает постоянное для данной настройки отношение частот гидравлических импульсов давления, а следовательно, частот вращения выходных валов, гидравлических шаговых двигателей приводов вращения круглого стола с заготовкой и продольного перемещения прямоугольного стола.

Передаточное отношение между исполнительными шаговыми двигателями *10* и *21* гидравлической связи зависит от соотношения частот гидравлических импульсов, формируемых генератором гидравлических импульсов и подаваемых к исполнительным силовым шаговым двигателям, которые приводят во вращение заготовку и ее поступательное перемещение для обеспечения жесткой кинематической связи, и определяется количеством гидравлических импульсов, подаваемых за один оборот блока кодирующих дисков генератора гидравлических импульсов.

Изменение передаточного отношения цепи обката (деления) производится перемещением ползушек *2* корпусе генератора гидравлических импульсов относительно периферии кодирующего диска с различным числом выступов, осуществляя при этом коммутацию потоков рабочей жидкости по силовым каналам, в зависимости от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент выступом вращающегося диска генератора импульсов.

Давление питания на вход каждого из гидрораспределителей подается через регулируемый дроссель блока дросселей от насосной установки *7*, а затем, в зависимости от положения торцовых гидрораспределителей, по одному из каналов поступает в рабочие камеры шаговых гидродвигателей *10* и *21* приводов вращения круглого стола с заготовкой.

Применения агрегатно-модульного принципа построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков позволяет:

– существенно сократить время и трудоемкость проектирования и изготовления кинематических цепей, так как имеется возможность использования готовых агрегатов и модулей;

– значительно повысить надежность работы модульной внутренней связи благодаря предварительной обработке конструкции модулей и наиболее полного их соответствия выполняемой технологической задаче (точности, цепи, количества формообразующих движений и др.);

– расширять производственные возможности модульной системы путем ее постоянного наращивания на ранее разработанной элементной базе;

– улучшить условия эксплуатации и ремонтопригодности создаваемых модульных систем гидравлических связей путем уменьшения разнообразия цепей и их элементов.

Используя возможности шагового гидропривода, осуществляется частотное регулирование скорости силового исполнительного шагового гидродвигателя и высокие компоновочные качества гидравлического шагового привода, представляется возможным применить гидравлические связи для построения на основе агрегатно-модульного принципа внутренних цепей металлорежущих станков, где требуется обеспечить точную функциональную связь между заготовкой и инструментом.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Технология машиностроения. – 2015. – № 5(155). – С. 18 – 26.

2. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

3. **Ванин, В. А.** Шаговый гидропривод в формообразующих цепях резьбонарезных станков : монография / В. А. Ванин, А. Н. Колодин. – Deutschland: “LAP Lambert Academic Publishing”, 2016. – 117 с.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series : Materials Science and Engineering (327). – 2018.

References

1. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with complex shaping movements with internal hydraulic connections / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Mechanical Engineering Technology. – 2015. – № 5(155). – P. 18 – 26.

2. **Vanin, V. A.** Machines with hydraulic internal (formative) links based on stepper hydraulic drive for machining of helical surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Reference. Engineering journal with applications. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

3. **Vanin, V. A.** Stepping hydraulic drive in the forming chains of thread-cutting machines : monograph. / V. A. Vanin, A. N. Kolodin. – Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 117 p.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series : Materials Science and Engineering (327). – 2018.

УДК 66.067.1

Лазарев С. И., Игнатов Н. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г.Тамбов
[1](Тел. 89065964549, e-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru),
[2](Тел. 89537048852, e-mail: system_52@mail.ru)

ПОЛУЭМПЕРИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ОПИСАНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАДЕРЖАНИЯ В ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССАХ РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ

Lazarev S. I., Ignatov N. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. 89065964549, e-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru),
[2](Tel. 89537048852, e-mail: system_52@mail.ru)

A SEMI-EMPIRICAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF ADETENTIONFACTOR IN ELECTROBARMEMBRANE PROCESS OF SOLUTION SEPARATION

Аннотация. В мембранных процессах обработки растворов используется метод разделения жидких или газовых смесей с помощью полупроницаемых мембран, где качество разделения оценивается коэффициентом задержания. В работе описан полуэмперический подход определения коэффициента задержания, основанный на коэффициентах проницаемости и пористости мембран.

Ключевые слова: полупроницаемая мембрана, метод, проницаемость, разделение, коэффициент задержания.

Abstract. The method of separation of liquid or gas mixtures by means of semipermeable membranes is used in membrane processes of solution treatment, where the quality of separation is estimated by the retention coefficient. The paper describes a semi-empirical approach for determining the retention coefficient based on the permeability and porosity of membranes.

Keywords: semi-permeable membrane, method, permeability, separation, detentionfactor.

Коэффициент задержания является важнейшей характеристикой, определяющей качество разделения баромембранных и электробаромембранных процессов. В работе рассмотрен полуэмпирический подход определения коэффициента задержания для баромембранных, электробаромембранных процессов разделения технологических растворов и промышленных стоков [1 – 3]. Фактор разделения для бинарной смеси определяется как отношение [4]

$$F = \frac{P_i}{P_j}, \tag{1}$$

где P_i и P_j – коэффициенты проницаемости различных компонентов.

Модельная формула для мембранного разделения жидкостей:

$$F = \frac{P_{\text{н.к.к}}}{P_{\text{в.к.к}}}, \tag{2}$$

где F – фактор (коэффициент) мембранного разделения водного раствора; $P_{\text{н.к.к}}$ – коэффициент проницаемости низкокипящего компонента (воды), $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}^2\text{с} \cdot \text{Па}}$; $P_{\text{в.к.к}}$ – коэффициент проницаемости высококипящего компонента (растворенного вещества), $\frac{\text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Па}}$

Принимаем, что коэффициент проницаемости растворенного вещества не зависит от трансмембранного давления. Для мембранного разделения коэффициент разделения можно записать через отношение концентраций:

$$F = \frac{C_{\text{исх}}}{C_{\text{п}}}, \tag{3}$$

где $C_{\text{исх}}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м^3; $C_{\text{п}}$ – концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м^3.

Для мембранной технологии с циклом процессов, происходящих на обеих сторонах поверхностях мембраны, коэффициент разделения можно записать как

$$F = \frac{C_{\text{п.а}}}{C_{\text{п.и}}} = \frac{C_{\text{исх}} E_{\text{п}}}{(1 - E_{\text{а.с}}) C_{\text{п}}}, \tag{4}$$

где $C_{\text{п.а}} = \frac{C_{\text{исх}}}{(1 - E_{\text{а.с}})}$ – концентрация растворенного вещества у поверхности активного слоя мембраны, кг/м^3; $C_{\text{п.и}}$ – концентрация растворенного вещества у поверхности подложки мембраны, кг/м^3

$$C_{\text{п.и}} = \frac{C_{\text{исх}}}{E_{\text{п.и}}}, \tag{5}$$

где $E_{\text{а.с}}$ – пористость активного слоя, %

Пористость активного слоя полупроницаемых мембран, $E_{\text{а.с}} = 2\ldots5\%$; $E_{\text{п.и}} = E_{\text{общ}} - E_{\text{а.с}}$ – пористость подложки, %; $E_{\text{общ}}$ – общая пористость полупроницаемых мембран, которая в среднем составляет 75%.

В общем виде формула для определения концентрации растворенного вещества в примеси выглядит следующим образом:

$$\frac{C_{\text{м}} E_n}{(1 - E_{\text{а.с}}) C_n} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{дан}}} \Rightarrow \frac{(1 - E_{\text{а.с}}) C_n}{C_{\text{м}} E_n} = \frac{P_{\text{дан}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}},$$

$$C_n = \frac{E_n C_{\text{н}}}{(1 - E_{\text{а.с}})} \frac{P_{\text{дан}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{E_n k C_{\text{исх}}}{(1 - E_{\text{а.с}})} \frac{P_{\text{дан}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}. \tag{6}$$

Для расчета коэффициента задержания обычно используют формулу [5 – 8]

$$\text{к} = 1 - \frac{c_{\text{п}}}{c_{\text{исх}}}. \quad (7)$$

Подставив коэффициенты и проведя преобразования, получаем

$$\text{к} = \frac{E_n k}{(1 - E_{\text{а.с}})} \frac{P_{\text{дан}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (8)$$

Данный подход определения коэффициента задержания применим для аппаратов рулонного, трубчатого и плоскокамерного типов. Для повышения величины коэффициента задержания применяют турбулезацию потока при помощи поперечного перемешивания, а также для предотвращения соприкосновения проницаемых элементов применяют сетку-сепаратор. Разделяемый поток движется в осевом направлении по межмембранным каналам, а пермеат – по спирали и по дренажному материалу, далее поступает в пермеатоотводящую трубку.

Список использованных источников:

1. **Дытнерский, Ю. И.** Мембранные процессы разделения жидких смесей / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия,1975. – 232 с.

2. **Агеев, Е. П.** Основы математического описания проницаемости кристаллизующихся полимерных мембран / Е. П. Агеев, А. В. Вершубский // Высокомолекулярные соединения. – 1983. – Т. 30, № 9. – С. 647 – 650.

3. **Дытнерский, Ю.И.** Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1975. – 252 с.

4. **Рейтлингер, С. А.** Проницаемость полимерных материалов / С. А. Рейтлингер. – М. : Химия, 1974. – 272 с.

5. **Хванг, С. Т.** Мембранные процессы разделения / С. Т. Хванг, К. Каммермермейер ; под ред. Ю. И. Дытнерского ; пер с англ. – М. : Химия, 1981. – 464 с.

6. **Волгин, В. Д.** Математическое описание процесса обратного осмоса / В. Д. Волгин, Е. Д. Максимов, В. И. Новиков // Химия и технология воды. – 1989. – Т. 2, № 3. – С. 222 – 225.

7. **Байков, В. И.** Ультрафильтрация в плоском канале с одной проницаемой поверхностью / В. И. Байков, П. К. Звонец // ИФЖ. – 1999. – Т. 72, № 1. – С. 32 – 37.

8. **Эман, М. И.** Разделение обратным осмосом / М. И. Эман // Химия и технология воды. – 1980. – Т. 2, № 2. – С. 107 – 111.

References

1. **Dytnerskij, Yu. I.** Membrannye process razdeleniya zhidkih smesej / Yu. I. Dytnerskij. – M. : Himiya, 1975. – 232 s.

2. **Ageev, E. P.** Osnovy matematicheskogo opisaniya pronicaemosti kristallizuyushchihsya polimernyh membran / E. P. Ageev, A. V. Vershubskij // Vysokomolekulyarnye soedineniya. – 1983. – T. 30, № 9. – S. 647 – 650.

3. **Dytnerskij, Yu. I.** Baromembrannye processy.Teoriya i raschet / Yu. I. Dytnerskij. – M. : Himiya, 1975. – 252 s.

4. **Rejtlinger, S. A.** Pronicaemost' polimernyh materialov / C. A. Rejtlinger. – M. : Himiya, 1974. – 272 s.

5. **Hvang, S. T.** Membrannye process razdeleniya; per s angl. / S. T. Hvang, K. Kammermermejer pod red. Yu. I. Dytnerskogo. – M. : Himiya, 1981. – 464 s.

6. **Volgin, V. D.** Matematicheskoe opisanie processa obratnogo osmosa / V. D. Volgin, E. D. Maksimov, V. I. Novikov // Himiya i tekhnologiyavody. – 1989. – T. 2, № 3. – S. 222 – 225.

7. **Bajkov, V. I.** Ul'trafil'traciya v ploskomkanale s odnojpronicaemoj poverhnost'yu / V. I. Bajkov, P. K. Zvonec // IFZH. – 1999. – T. 72, № 1. – S. 32 – 37.

8. **Ehman, M. I.** Razdelenie obratnym osmosom / M. I. EHman // Himiya i tekhnologiya vody. – 1980. – T. 2, № 2. – S. 107 – 111.

УДК 631.361.83

Лебедь Н. И., Аверина М. Б.
Волгоградский государственный технический университет, Россия, г. Волгоград
(Тел. (937)5380259, e-mail: nik8872@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ С РЕЖУЩИМ АППАРАТОМ ЛОМТИКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Lebed N. I., Averina M. B.
Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd
(Tel. (937) 5380259, e-mail: nik8872@yandex.ru)

MODELING OF THE INTERACTION OF FRUIT AND VEGETABLE RAW MATERIALS WITH A CUTTING DEVICE OF A SLICE SHREDDER

Аннотация. Представлены общий вид и описание работы ломтикового измельчителя плодоовощного сырья, а также режущего аппарата (зигзагообразной ножевой стенки с развернутым расположением ножей). Проведены теоретические исследования, характеризующие геометрическое описание взаимодействия плодоовощного сырья с предлагаемым режущим аппаратом.

Ключевые слова: измельчение, резание, яблоки, картофель, клубни, плоды.

Abstract. A general view and description of the operation of a slice shredder of fruit and vegetable raw materials, as well as a cutting apparatus (zigzag knife wall with an expanded arrangement of knives) are presented. Theoretical studies characterizing the geometric description of the interaction of fruits and vegetables with the proposed cutting apparatus have been carried out.

Keywords: chopping, cutting, apples, potatoes, tubers, fruits.

Для снижения энергетических затрат операции резания яблок и клубней картофеля на ломтики нами предлагается измельчитель (рис. 1).

Измельчитель работает следующим образом [4]. Обрабатываемый материал через загрузочную горловину *4* поступает в камеру измельчения *3*. Посредством передачи крутящего момента приводным валом *8* от мотора-редуктора *7* на кривошип *9*, через шатун *11* ножевая стенка *12* перемещается по направляющим (на рисунке не показаны) внутри корпуса *2* навстречу неподвижному противорежущему подпору *18*. Плодоовощной материал проникает сквозь ножевую стенку *12*, измельчаясь на ломтики необходимой толщины, удаляется через выгрузное окно *5* в выгрузную емкость *6*. При этом выступы противорежущего подпора *18* входят во впадины ножевой стенки, что приводит к полному измельчению всего материала, находящегося в камере измельчения *3* и повышению производительности.

С учетом предыдущих исследований [1, 2, 3, 5], направленных на минимизацию энергетических затрат операции резания плодоовощного сырья на ломтики, была поставлена задача дальнейшего совершенствования технических средств за счет максимального снижения сил трения продукта о ножи.

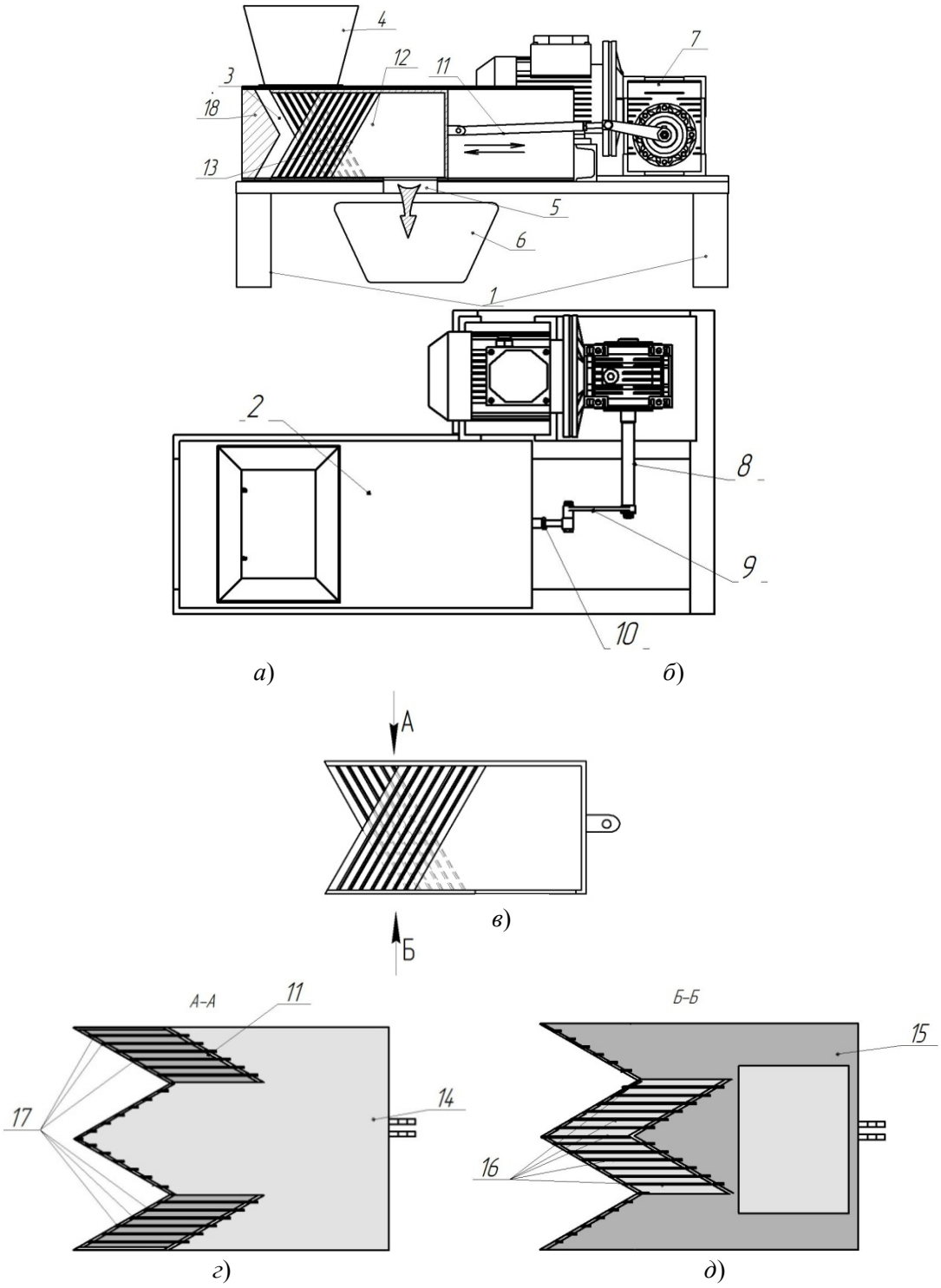


Рис. 1. Ломтиковый измельчитель плодовоовощного сырья:

а – ломтиковый измельчитель плодовоовощного сырья, общий вид;
б – ломтиковый измельчитель плодовоовощного сырья, вид сверху;
в – ножевая стенка, вид сбоку; *г* – ножевая стенка, вид сверху *А–А*;
д – ножевая стенка, вид снизу *Б–Б*;
1 – станина; *2* – корпус; *3* – камера измельчения; *4* – загрузочная горловина;
5 – выгрузное окно; *6* – выгрузная емкость; *7* – мотор-редуктор; *8* – приводной вал;
9 – кривошип; *10* – регулировочная гайка; *11* – шатун; *12* – ножевая стенка; *13* – ножи;
14 – верхняя пластина; *15* – нижняя пластина; *16* – центральные ножевые блоки;
17 – боковые ножевые блоки; *18* – противорежущий подпор

Для осуществления поставленной задачи нами разработана конструкция зигзагообразной ножевой стенки с развернутым расположением ножей (рис. 1, *в*, *г*, *д*), способствующим снижению тангенциальной составляющей скорости резания и равномерному распределению усилий на верхнюю и нижнюю пластину ножевой стенки. Положительный эффект достигается за счет того, что ножи, расположенные в ножевой стенке под углом скольжения 30°, сгруппированы в центральные и боковые ножевые блоки, при этом ножи центральных блоков развернуты на 180° относительно боковых.

Общий вид прототипа режущего аппарата (блок ножей) представлен на рис. 2. Блок ножей можно условно разделить на четыре части, на двух из них – крайних частях – ножи наклонены вперед вниз, а на двух центральных частях – ножи наклонены вперед вверх. Относительный угол наклона ножей в разных частях блока называется углом защемления θ. Соответствующую форму, обеспечивающую прижимание плодов или клубней к режущим кромкам ножей, имеет и подпор. За счет различного пространственного положения ножей в блоке процесс разрезания на разных участках блока может существенно различаться. В рамках моделирования предполагается, что соотношение размеров блока и единиц сырья является заданным (рис. 3), и таким образом, участок блока, на котором происходит разрезание конкретного плода или клубня, является определенным. На рисунке 3 показана схема расположения четырех плодов или клубней. При таком расположении условия резания для каждого из них являются одинаковыми, причем половина плода или клубня разрезается ножами, наклоненными вперед вниз, а другая половина – ножами, наклоненными вперед вверх.

Рис. 2. Общий вид прототипа блока ножей

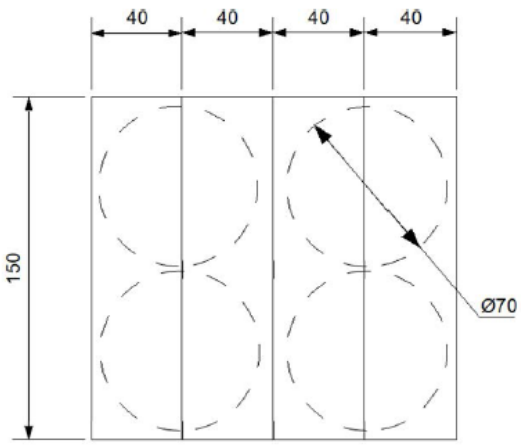


Рис. 3. Пример соотношения размеров блока ножей (сплошные линии) и разрезаемых плодов или клубней (пунктирные линии)

Для снижения энергоемкости процесса резания нами разработана конструкция зигзагообразной ножевой стенки с развернутым расположением ножей, способствующим снижению тангенциальной составляющей скорости резания и равномерному распределению усилий на верхнюю и нижнюю пластину ножевой стенки.

Усилие со стороны привода измельчителя (рис. 4):

$$P_x = \sum P_{i,x}, \tag{1}$$

где P_x – сила, приложенная со стороны привода установки, Н; $P_{i,x}$ – силы взаимодействия плода с блоком ножей, Н.

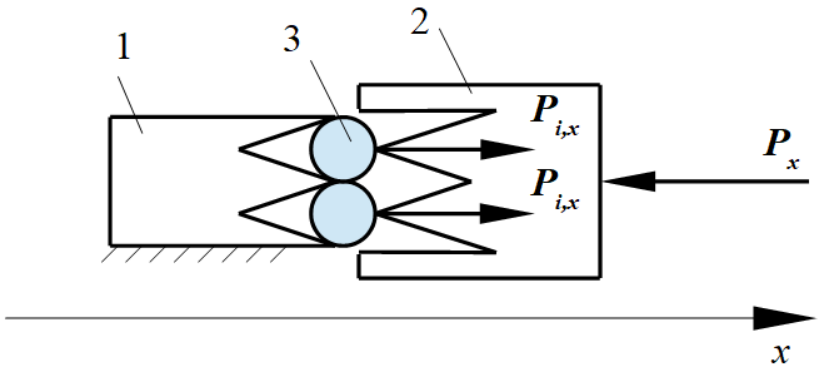


Рис. 4. Схема определения силы, действующей на привод ломтикового измельчителя плодоовощного сырья:
1 – неподвижный рабочий орган; *2* – подвижный рабочий орган;
3 – разрезаемые плоды или клубни; через $P_{i,x}$ условно показаны продольные составляющие сил взаимодействия рабочего органа с разрезаемым материалом

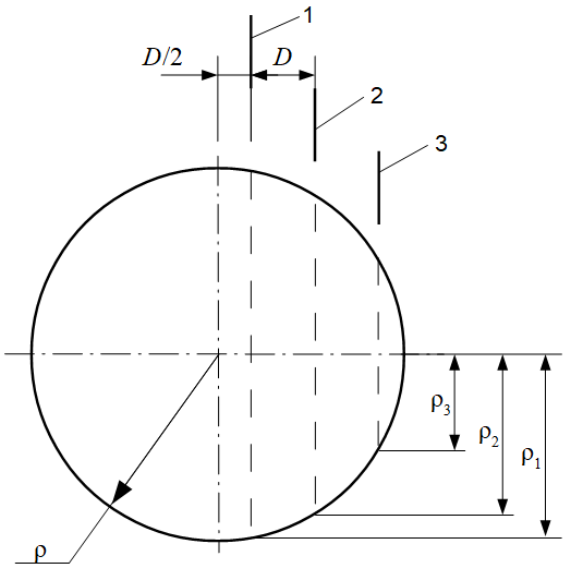
Полагая, что при продавливании материала сквозь блок ножей (рис. 5, *а*) центр плода или клубня проходит по середине между частями блока, можно считать, что каждый *i*-й нож отрезает ломтик радиусом

$$\rho_i = \sqrt{(\rho^2 - \left(iD - \frac{D}{2}\right)^2}, \tag{2}$$

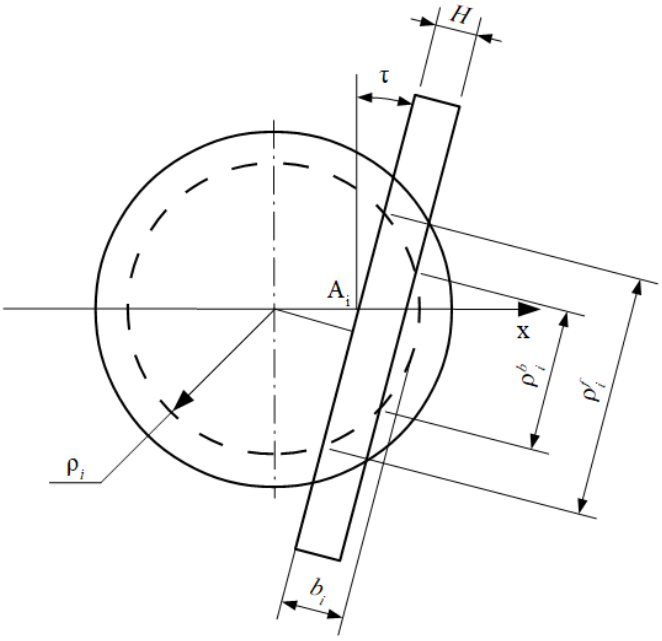
где D – расстояние между осевыми линиями лезвий соседних ножей, м – нумерация ножей идет от центра к краям как в одну, так и в другую сторону (на рис. 5, *а* условно показаны 3 ножа с правой стороны).

Для каждого плода или клубня параллельно продольной оси измельчителя вводится координатная ось x, начало отсчета которой задается произвольно из соображений удобства. Через x (без индексов) обозначается координата центра плода при его движении через блок ножей. Через x_i обозначается координата точки A_i – точки пересечения оси и режущей кромки *i*-го ножа. Угол наклона ножа τ определяется через угол защемления θ как

$$\tau = (\pi - \theta)/2. \tag{3}$$



а)



б)

Рис. 5. Схема резания плода или клубня зигзагообразной ножевой стенкой:
а – схема разрезания плода на ломтики.
Цифрами 1, 2, 3 обозначены ножи, пунктирные линии – срезы;
б – схема определения длины реза

Тогда глубина внедрения лезвия b_i в i сечении (рис. 5, *б*) определяется выражением

$$b_i = \rho_i - (x_i - x)\cos\tau, \tag{4}$$

длина реза по режущей кромке имеет вид

$$\rho_i^f = 2\sqrt{\rho_i^2 - (x_i - x)^2 \cos^2\tau}, \tag{5}$$

а по тыльной стороне ножа

$$\rho_i^b = 2\sqrt{\rho_i^2 - ((x_i - x)\cos\tau + H)^2}, \tag{6}$$

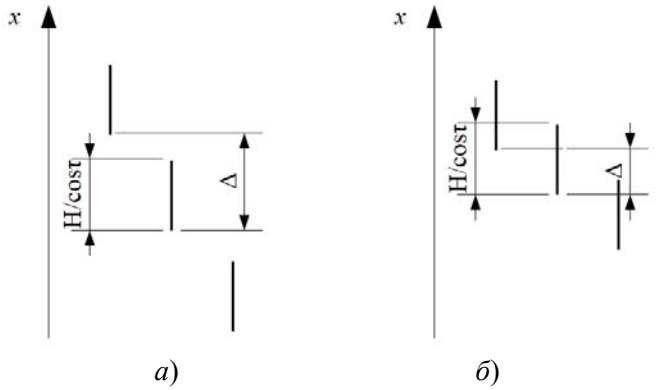
где H – ширина ножа, м.

В зависимости от значений i и x, подкоренные выражения в формулах (2), (4), (6) или выражении (5) могут оказаться отрицательными. В этом случае соответствующая величина, определяемая формулой, принимается равной нулю.

Расстояние вдоль оси x между точками A_i и A_{i+1} определяет сдвиг ножей и обозначается через Δ. Если $\Delta \geq H / \cos\tau$, то ножи не перекрывают друг друга (рис. 6, *а*) и практически не оказывают взаимного влияния на процесс резания – в каждый момент времени отрезаемый ломтик взаимодействует только с одним ножом. Однако такое расположение значительно увеличивает глубину блока ножей, что не всегда допустимо. Поэтому обычно $\Delta < H/\cos\tau$, существуют зоны перекрытия ножей (рис. 6, *б*), в которых ломтик испытывает пропорциональное увеличение деформации, что в случае линейной модели упругих свойств материала плода или клубня приводит к соответствующему увеличению сил сжатия и трения. Для учета этого эффекта вводится безразмерный коэффициент перекрытия ножей, который определяется выражением

$$\lambda = 1 - \Delta\cos\tau / H, \quad \lambda \in [0, 1]. \tag{7}$$

Если значение коэффициента λ, вычисленное по формуле (3.25) получается отрицательным, коэффициент приравнивается к нулю.



а) *б*)

Рис. 6. Схема сдвига ножей:
а – перекрытие ножей отсутствует; *б* – перекрытие имеет место

Каждое лезвие в общем случае полагается обоюдоострым, с различными углами заточки β_r^* и β_l^* справа и слева соответственно. Наклон ножей под углом τ относительно перпендикуляра к направлению резания обеспечивает кинетическую трансформацию углов заточки лезвий, которая как показано в работе описывается формулами:

$$\beta_r = \mathrm{arctg}(\mathrm{tg}\beta_r^* \cos\tau),$$
$$\beta_l = \mathrm{arctg}(\mathrm{tg}\beta_l^* \cos\tau), \tag{8}$$

где τ – угол наклона лезвий (скольжения), град.

В результате проведенных исследований разработаны методы и алгоритмы расчета, позволяющие оценивать состояние обрабатываемого материала, что дает возможность анализировать состояние предлагаемого оборудования и достичь рациональных конструктивных параметров и режимов работы.

Список использованных источников

1. **Lebed, N. I.** Influence of a zigzagging lo-cation of the knives in the cutting unit on the energy consumption during the cutting process of horticultural produce / N. I. Lebed, N. M. Antonov, A. M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». – 2015. – № 3. – С. 262 – 270. – URL: http://authorservices.wiley.com/bauthor/onlineLibraryTPS.asp?DOI=10.1111/jfpe.12162&ArticleID=1420272 (дата обращения : 19.04.2015).

2. **Лебедь, Н. И.** Процессы измельчения плодоовощных материалов в общественном питании : монография / Н. И. Лебедь, Н. М. Антонов – Волгоград : ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2014. – 172 с.

3. **Лебедь Н. И.** Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов / Н. И. Лебедь, Н. М. Антонов, А. К. Мамахай // Известия нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. ВолГАУ. – Волгоград, 2016. – № 3(43). – С. 231 – 238.

4. **Пат.** 134741 Российская Федерация, МПК A01F29/08. Измельчитель фермерский [Текст] / Антонов Н. М., Лебедь Н. И. – № 2013120183/13 ; заявл. 06.05.2013 ; опубл. 27.11.2013. – 2 с.

5. **Пат.** 129845 Российская Федерация, МПК B02C18/02. Измельчитель плодоовощной продукции [Текст] / Антонов Н. М., Искуснов Ю. В., Лебедь Н. И. – № 2013108423/13 ; заявл. 26.02.2013 ; опубл. 10.07.13.

References

1. **Lebed, N. I.** Influence of a zigzagging lo-cation of the knives in the cutting unit on the energy consumption during the cutting process of horticultural produce / N. I. Lebed, N. M. Antonov, A. M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». – 2015. – № 3. – С. 262 – 270. – URL: http://authorservices.wiley.com/bauthor/onlineLibraryTPS.asp?DOI=10.1111/jfpe.12162&ArticleID=1420272 (дата обращения 19.04.2015).

2. **Lebed, N. I.** The processes of comminution of the fruit and vegetable materials in food: monograph / N. I. Lebed, N. M. Antonov. – Volgograd : FSBEI HPE Volgograd SAU, 2014. – 172 p.

3. **Lebed, N. I.** Optimization of design parameters of the chopper of fruits and root crops / N. I. Lebed, N. M. Antonov, A. K. Mamakhay // Izvestiyanizhnevolzhsky agro-University complex: science And higher professional education. Walgau. – Volgograd, 2016. – № 3(43). – P. 231 – 238.

4. **Pat.** 134741 Russian Federation, IPC A01F29/08. Farm shredder [Text] / Antonov N. M., Lebed N. I. – № 2013120183/13 ; declare 05.06.2013 ; publ. November 27, 2013. – 2 sec.

5. **Pat.** 129845 Russian Federation, IPC B02C18/02. Fruit and vegetable chopper [Text] / Antonov N. M., Iskusnov Yu. V., Lebed N. I. – № 2013108423/13 ; declare 02.26.2013 ; publ. 07/10/13.

УДК 621.91

Родина А. А., Белякова К. А., Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630618, e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru)

САПР ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Rodina A. A., Belyakova K. A., Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630618, e-mail: ant.rodina1209@yandex.ru)

CAD GALVANIC LINES

Аннотация. В данной работе была предложена методика автоматизированного выбора технологического процесса нанесения гальванических покрытий. В проектируемой САПР данные для расчета расписания работы берутся из технологического процесса нанесения гальванического покрытия, который состоит из операций с определенным диапазоном времени, в течение которого эта операция может быть выполнена. Для этого была представлена структурная схема процесса и разработана функциональная структура системы автоматизированного выбора.

Ключевые слова: САПР, гальваническая линия, технологический процесс, гальванопокрытие, автоматизированный выбор.

Abstract. In this paper, a technique for the automated selection of a process for the deposition of electroplating was proposed. In the projected CAD system, the data for calculating the work schedule is taken from the electroplating process, which consists of operations with a certain range of time during which this operation can be performed. For this, the process flow chart was presented and the functional structure of the automated selection system was developed.

Keywords: CAD, galvanic line, technological process, electroplating, automated selection.

Отличительная особенность гальванического производства в том, что оно необычайно широко распространено – имеется практически на любом предприятии, связанном с изготовлением металлических деталей и изделий.

Традиционный процесс построения циклограмм операторов гальванической линии основан на эвристических алгоритмах, долог, трудоемок и требует от технолога опыта и специальных знаний. Вместе с тем, на производстве часто возникают ситуации, когда для одной и той же линии требуется построить сразу несколько циклограмм, характеризующих программы различных технологических процессов, реализуемых одновременно или последовательно на фоне непрерывной работы автоматической гальванической линии (АГЛ).

Там, где существует возможность выбора той или иной очередности выполнения работ, всегда возникает проблема упорядоченности, определенной последовательности. Трудность заключается в том, что все задачи связаны друг с другом и не могут быть расчленены и требуют одновременного решения.

Задача составления расписания АГЛ в математике является задачей упорядочения. Упорядоченность – это формирование очередности, а составление расписания – это последовательность действий нескольких машин. Мы будем рассматривать эти два понятия как синонимы, так как это не вносит существенной четкости в постановку задачи.

Чтобы справиться с такой сложной задачей, как построение циклограмм, целесообразно разработать алгоритм составления расписания работы автооператора гальванической линии.

Рассмотрим однопредметную гальваническую линию с одним манипулятором.

Постановка задачи начинается с исходных данных.

Основным понятием в теории расписаний является операция – элементарная задача, подлежащая выполнению. Расписание может рассматриваться как упорядочение операций.

В нашем случае исходными данными будут:

– технологические операции (0…n, 0 – загрузка носителя, n – разгрузка);

– длительность каждой операции T_k (k = 0, 1, 2, …, n). Для одних операций эта длительность задана жестко определенным числом. А для других задан диапазон допустимых значений от $T_{k\min}$ до $T_{k\max}$. Для лимитирующей операции под T_k понимается длительность операции, деленная на число позиций этой операции;

– время на выполнение заявки (вызова) Δt_a;

– вызов манипулятора y_k (k = 0, 1, 2, …, n) – это момент времени, в который манипулятор должен начинать обслуживание k-й операции;

– y_0 – перенос кассеты на первую операцию производится в начальный момент времени. Совокупность заявок y_k служит основой для составления расписания работы манипулятора;

– время такта T_p, т.е. интервал между двумя последовательными входами носителей в линию должен быть минимальным.

Математическая модель будет строиться из следующих соображений.

За время одного такта манипулятор должен обслужить каждую операцию, т.е. выполнить (n + 1) заявку. Для этого ему необходимо времени $(n+1)\Delta t_a$.

1. Время такта не может быть меньше длительности нормирующей (самой длительной) операции:

$$T_p \geq \max\left[\left(n+1\right)\Delta t_a, \max T_k\right]. \tag{1}$$

2. Через время T_1 выполнения первой операции кассету необходимо перенести на вторую операцию:

$$y_1 = y_0 + T_1 . \tag{2}$$

Соответственно,

$$y_2 = y_1 + T_2 ,$$

$$y_3 = y_2 + T_3 , \tag{3}$$

и так далее. до тех пор, пока очередное значение не превысит время такта T_p. Это будет обозначать, что данная операция будет выполнена в следующем такте, в данном такте необходимо обслужить операцию. загруженную в предыдущем.

Таким образом, необходимо выполнить заявку:

$$y_m = y_{m-1} + T_m - T_p . \tag{4}$$

Если две заявки окажутся одинаковыми, т.е. у манипулятора будет два вызова в один и тот же момент времени, то одна из заявок не будет выполнена. Следовательно,

все числа y_k (k = 1, 2, …, n) должны отличаться друг от друга не меньше, чем на Δt_a – время выполнения заявки.

Задача определения минимального времени такта и составления заявок манипулятора может быть сформулирована математически следующим образом. Найти совокупность чисел T_k (k = 1, 2, …, n), удовлетворяющих условиям:

$$T_{\kappa\min} \le T_\kappa \le T_{\kappa\max}\,, \tag{5}$$

$$y_k = \begin{Bmatrix} y_{k-1} + T_k, если y_{k-1} + T_k < T_p \\ y_{k-1} + T_k - T_p, если y_{k-1} + T_k \ge T_p \end{Bmatrix}, \tag{6}$$

$$(y_0 = 0, k = 1, 2, ..., n)$$

удовлетворяют условиям

$$\left| y_j - y_k \right| > \Delta t_a;\, j \ne k,\, j, k = 0, 1, 2, ..., n\,. \tag{7}$$

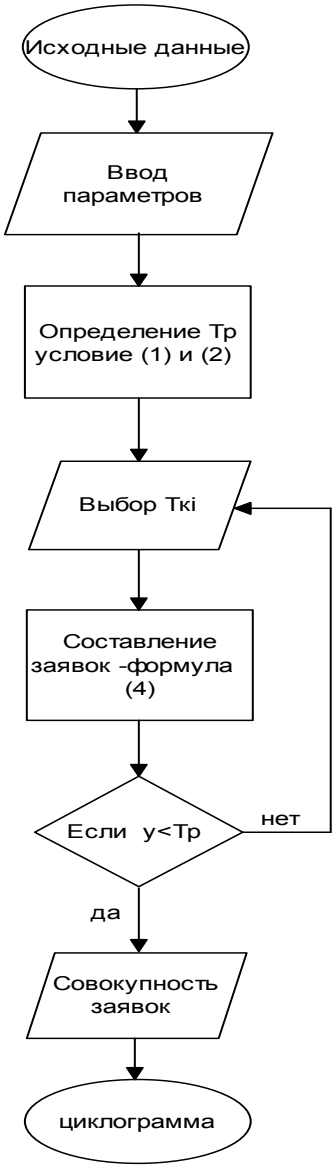


Рис. 1. Блок-схема составления расписания работы гальванической линии с одним оператором

В теории расписаний очень важным является дискретизация задачи, которая позволит организовать перебор вариантов в определенной последовательности. Выбор шага дискретизации всегда является оптимальным для данной задачи.

В качестве шага дискретизации целесообразно принимать минимальную среди всех заданных длительность операции, т.е.

$$\Delta T_a = \min T_k . \tag{8}$$

Диапазоны допустимых значений длительности операции заменяются наборами целых чисел, начиная с наименьшего заданного значения и кончая наибольшим:

$$T_{kl} = T_{k\min} + l - 1, l = 1, 2, ..., m_k , \tag{9}$$

где $m_k = T_{k\max} - T_{k\min} + 1$

Из заданной совокупности возможных целых значений

$$T_{k\min} \le T_{kl} \le T_{k\max} , \tag{10}$$
$$k = 0, 1, 2, ..., n, l = 0, 1, 2, ..., m_k$$

дискретизации и записать исходные данные в нормированном виде.

Шаг дискретизации примем равным 0,25 мин (так как целесообразно принимать минимальную среди всех заданных длительность операции).

В работе была предложена методика автоматизированного выбора технологического процесса и соответствующего аппаратурного оформления.

Основные выводы состоят в следующем:

– разработана структурная схема процесса;
– разработана функциональная структура системы автоматизированного выбора.

Список использованных источников

1. **Родина, А. А.** Методика определения размеров гальванических ванн / А. А. Родина, А. В. Солдатов // II-я Международная научно-практическая конференция «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». – 2015. – С. 337 – 341.

2. **Автоматизация** выбора технологического оборудования процессов нанесения гальванических покрытий и построения циклограммы работы автооператора / А. А. Родина, С. И. Пестрецов, С. В. Серегина, Е. Ю. Хорошкова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2016. – № 2(60). – С. 189 – 196.

3. **Design** of plating lines using information technologies / О. И. Аносова, А. А. Родина, К. В. Немтинов, В. А. Немтинов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 4(58). – С. 180 – 186.

4. **Родина, А. А.** Автоматизация выбора технологического оборудования гальванического производства / А. А. Родина, А. Н. Колодин // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы Международной научно-практической конференции. – Новосибирск. – 2016. – № 3. – С. 48 – 53.

5. **Проектирование** гальванических линий с использованием информационных технологий / О. И. Аносова, А. А. Родина, К. В. Немтинов, В. А. Немтинов // Вопросы

современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 4(58). – С. 180 – 186.

6. **Немтинов, В. А.** Применение теории нечетких множеств и экспертных систем при автоматизированном выборе элемента технической системы [Текст] / В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, П. И. Пахомов // Информ. технологии. – 2009. – № 10. – С. 34 – 38.

References

1. **Rodina, A. A.** Method of determining the size of electroplating baths / A. A. Rodina, A. V. Soldatov // II-nd International Scientific and Practical Conference “Virtual modeling, prototyping and industrial design”. – 2015. – P. 337 – 341.

2. **Automation** of the choice of technological equipment for the processes of electroplating deposition and the construction of a cyclogram of the operation of an auto-operator / Rodina A. A., Pestretsov S. I., Serigina S. V., Khoroshkova E. Yu. // Questions of modern science and practice. University. in and. Vernadsky. – 2016. – № 2(60). – P. 189 – 196.

3. **Design** of plating lines using information technologies / O. I. Anosova, A. A. Rodina, K. V. Nemtinov, V. A. Nemtinov // Questions of modern science and practice. University. in and. Vernadsky. – 2015. – № 4(58). – P. 180 – 186.

4. **Rodina, A. A.** Automation of the choice of technological equipment of galvanic production / A. A. Rodina, A. N. Kolodin // Actual problems in mechanical engineering. Materials of the international scientific-practical conference. – Novosibirsk. – 2016. – № 3. – P. 48 – 53.

5. **Designing** galvanic lines using information technology / O. I. Anosova, A. A. Rodina, K. V. Nemtinov, V. A. Nemtinov // Questions of modern science and practice. University. in and. Vernadsky. – 2015. – № 4(58). – P. 180 – 186.

6. **Application** of the theory of fuzzy sets and expert systems in the automated selection of the element of the technical system [Text] / Yu. Egorov, P. I. Pakhomov // Inform. technologies. – 2009. – № 10. – P. 34 – 38.

УДК 62-932.4

Карпушкин С. В., Афанасенков В. Л., Тюрин Р. Э.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОЩНОСТИ ОМИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ В ПЛИТАХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Karpushkin S. V., Afanasenkov V. L., Tyurin R. E.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

DETERMINATIONOF THE SURFACE POWER OF OHMIC HEATERS IN THE PLATES OF HYDRAULIC PRESSES

Аннотация. Предложен численный метод определения поверхностной мощности омических нагревателей плит гидравлических прессов, основанный на стационарном конечно-элементном анализе тепловых потоков. Приведено сравнение результатов применения метода с результатами аналитического расчета для стержневого нагревателя, размещенного по центру квадратного паза в плите.

Ключевые слова: гидравлический пресс, нагревательная плита, омический нагреватель, коэффициент эффективности излучения, конечно-элементный анализ.

Abstract. A numerical method for determination the surface power of ohmic heaters within plates of hydraulic presses, based on a stationary finite-element analysis of heat flow. A comparison the results of applying the method with the results of analytical calculation for rod heater placed in the center of the square groove in the plate.

Keywords: hydraulic press, heating plate, ohmic heater, radiative efficiency, finite-element analysis.

Применение омических нагревателей (термосопротивлений) – распространенный промышленный способ нагрева плит гидравлических прессов, работающих в широком температурном диапазоне: от 150…250 °С при реализации процессов полимеризации и вулканизации до 550 °С при термообработке металлических деталей.

Применяемые в настоящее время инженерные методы расчета параметров нагревателя не предусматривают расчет температурных полей нагреваемых объектов и базируются на использовании эмпирических данных, область применения которых ограничена условиями проведения экспериментов [1]. При использовании современных систем конечно-элементного анализа расчета температурных полей устройств с внутренними источниками тепла при известном распределении мощности не представляет серьезных затруднений. Для уменьшения объема вычислений геометрия нагревателей, как правило, упрощается, например, в плитах гидравлических прессов нагреватель укладывается в специальный паз, всю область которого обычно представляют в виде объемного источника тепла, см. [2].

Для определения температурного поля рабочей поверхности плиты необходимо решать уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\nabla^2 T + \frac{q}{c\rho}, \tag{1}$$

где $T = T(x, y, z, \tau)$ – температура в точке объема плиты с координатами (x, y, z) в момент времени τ (°C); $q = q(x, y, z)$ – удельное тепловыделение в этой точке (Вт/м^3); $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент его температуропроводности (м^2/с); λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности (Вт·м$^{-1}$К$^{-1}$), удельная теплоемкость (Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$) и плотность (кг/м^3) материала плиты соответственно.

Начальное условие для решения уравнения (1)

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \tag{2}$$

Теплоотдача от внешних поверхностей неизолированной нагревательной плиты описывается граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{\Omega_{pl,r}} = \alpha_r \left(T_r - T_0\right), \quad r = 1, \ldots, 6, \tag{3}$$

где $\Omega_{pl,\,r}$ – r-я поверхность плиты: рабочая поверхность, крышка, торцы (м^2).

Удельное тепловыделение омических нагревателей определяется по закону Джоуля–Ленца. При допущении о равномерном выделении тепла в объеме паза, где размещен нагреватель,

$$q(x, y, z) = \begin{cases} P_i / v_i, \text{если}\, (x, y, z) \in v_i,\ i = 1, \ldots, n_h, \\ 0, \text{иначе}, \end{cases} \tag{4}$$

где $P_i = \sqrt{\delta_i^3 \gamma_i U_i^2 W_i \pi^2 / 4}$ – мощность i-го нагревателя (Вт), см. [1]; v_i – объем, в котором она выделяется (м^3); δ_i – диаметр провода i-го нагревателя (м); γ_i – удельная электрическая проводимость его материала (Ом$^{-1}$м$^{-1}$); U_i – подаваемое на него напряжение (В); W_i – допустимая поверхностная мощность (Вт/м^2); n_h – число нагревателей в плите.

Для решения уравнения (1) при условиях (2) – (4) и фиксированных значениях P_i, $i = 1, \ldots, n_h$ можно применить алгоритм, предложенный в [3], для определения температурного поля плиты с индукционными нагревателями.

Главной проблемой расчета омического нагревателя является определение его допустимой поверхностной мощности. Как правило, эти нагреватели работают в температурном диапазоне от 800 до 1400 °C (в зависимости от свойств материала нагревателя и условий эксплуатации), обеспечивая высокую удельную мощность. При таких температурах основная часть тепла в диатермических (прозрачных для теплового излучения) средах передается посредством излучения. Принимая допущение об отсутствии теплопроводности и конвекции в системе передачи тепла от нагревателя к стенкам паза плиты, поверхностная мощность нагревателя

$$W = W_{id} \alpha_{rad}, \tag{5}$$

где $W_{id} = \varepsilon_{p_id} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right)$ – поверхностная мощность идеального нагревателя (тела *1*), образующего с нагреваемым телом (телом *2*) параллельные бесконечные плоскости

(Вт/м^2); σ_0 ~ 5,67·10^{-8} – постоянная Стефана–Больцмана (Вт·м$^{-2}$К$^{-4}$); $\varepsilon_{p_id} = \left(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1\right)^{-1}$ – приведенная степень черноты нагревателя и нагреваемого тела; ε_1, ε_2, T_1, T_2 – степени черноты тела *1*, тела *2* и их температуры (К) соответственно

$$\alpha_{rad} = \varphi_{12}\left(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1\right) / \left[\varphi_{12}\left(\varepsilon_1^{-1} - 1\right) + \varphi_{21}\left(\varepsilon_2^{-1} - 1\right) + 1\right] - \quad (6)$$

безразмерный коэффициент эффективности излучения нагревателя; φ_{12}, φ_{21} – средние угловые коэффициенты излучения тела *1* на тело *2* и тела *2* на тело *1* соответственно.

Формула (6) применима для замкнутой системы двух тел, разделенных диатермической средой. При наличии в системе третьего тела, выполняющего изолирующую функцию (например, керамического электроизолятора), эта формула не применима, так как необходимо учитывать процесс теплопроводности внутри изолятора.

Для расчета коэффициента эффективности излучения тел произвольной формы предлагается подход, основанный на проведении стационарного расчета теплового потока по тепловоспринимающей поверхности (Q, Вт/м^2) методом конечных элементов (МКЭ) и определении поверхностной мощности нагревателя по формуле

$$W = F_1^{-1} \int_{F_2} Q dF_2 , \quad (7)$$

где F_1, F_2 – площадь поверхности нагревателя и тепловоспринимающая поверхность (м^2), соответственно, см. рис. 1.

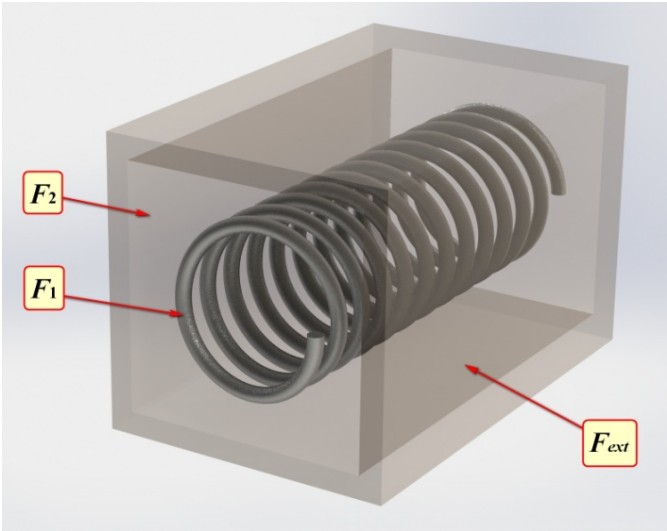


Рис. 1. Модель системы излучающих тел для расчета тепловых потоков МКЭ

Предлагаемый численный метод сводится к расчету с применением МКЭ теплового потока в установившемся режиме при заданной температуре нагревателя T_1, расчету поверхностной мощности нагревателя по (7) и определению значения α_{rad} по (5). Методом предусмотрено наличие малой конечной толщины тепловоспринимающего тела, на внешней поверхности которого F_{ext} (см. рис. 1) задается постоянная температура T_0. При таком условии будет наблюдаться градиент температур по толщине стенки, который позволит численно определить тепловой поток Q на поверхности F_2.

Для проверки корректности численного метода проведено сравнение результатов его применения с результатами аналитического расчета для тестовой модели: стержневого нагревателя цилиндрической формы, размещенного по центру квадратного паза, см. рис. 2.

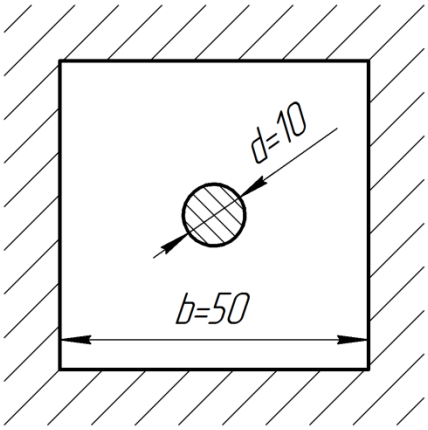


Рис. 2. Тестовая модель

Степень черноты нагревателя – 0,8, стенок паза – 0,1. Температура нагревателя T_1 = 1000 °С, стенок паза T_2 = 500 °С. Система тел замкнута, нагреватель выпуклый, поэтому $\varphi_{12} = 1$. Из свойства взаимности средних угловых коэффициентов [4]

$$\varphi_{21} = \varphi_{12} F_1 / F_2 = \pi\delta/4b = 0{,}157,$$

где b – ширина паза (м).

По формуле (6) α_{rad} = 3,848. Физически коэффициент эффективности излучения, превышающий единицу, объясняется существенно большей площадью тепловоспринимающей поверхности по отношению к площади нагревателя (с увеличением значения F_2 при условии $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ суммарный тепловой поток растет).

Интеграл теплового потока по поверхности паза, см. (7), рассчитанный в системе конечно-элементного анализа ANSYS, составил 1468 Вт/м (так как система плоскопараллельная). Поверхностная мощность нагревателя $W = 1468/\pi\delta$ = 46 732 Вт/м^2. Поверхностная мощность идеального нагревателя по формуле (5) при данных условиях составляет 12 563 Вт/м^2, т.е. α_{rad} = 3,721.

Таким образом, для рассмотренного примера отклонение результата расчета значения α_{rad} с помощью разработанного численного метода от результата, полученного аналитическим расчетом по формуле (6), составило 3,3%. Предложенный численный метод отличается универсальностью и может быть использован для вычисления поверхностной мощности нагревателя в системах, непрозрачных тепловому излучению, например, для расчета спирали, изолированной от стенок паза периклазом. В этом случае понятие эффективности излучения теряет смысл, задача состоит в непосредственном определении поверхностной мощности нагревателя по выражению (7).

Список использованных источников

1. **Дьяков, В. И.** Типовые расчеты по электрооборудованию: практ. пособие / В. И. Дьяков. – М. : Высшая школа, 1991. – 160 с.

2. **Карпушкин, С. В.** Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов, А. О. Глебов // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.

3. **Малыгин, Е. Н.** Моделирование и расчет процессов индукционного нагрева прессового оборудования при производстве резинотехнических изделий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 3. – С. 85 – 104.

4. **Зигель, Р.** Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М. : Мир, 1975. – 934 с.

References

1. **Diakov, V. I.** Tipovyye raschety po elektrooborudovaniyu : Prakt. posobiye. / V. I. Diakov. – M. : Vysshaya shkola. 1991. – 160 s.

2. **Karpushkin, S. V.** Modeling of induction heating devices in example of induction heating platens of vulcanization presses / S. V. Karpushkin, S. V. Karpov, A. O. Glebov // Tanzactions of Tambov STU. – 2011. – V. 17, № 1. – P. 110 – 120.

3. **Malygin, E. N.** Modelirovaniye i raschet protsessov induktsionnogo nagreva pressovogo oborudovaniya pri proizvodstve rezinotekhnicheskikh izdeliy / E. N. Malygin. S. V. Karpushkin. S. V. Karpov // Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye. – 2013. – № 3. – S. 85 – 104.

4. **Zigel, R.** Teploobmen izlucheniyem / R. Zigel., Dzh. Khauell. – M. : Mir. 1975. – 934 s.

УДК 66.011:681.5

Невиницын В. Ю.[1], Лабутин А. Н.[2], Волкова Г. В.[3]
Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, г. Иваново
[1](Тел. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),
[2](Тел. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru),
[3](Тел. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru)

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Nevinitsyn V. Yu.[1], Labutin A. N.[2], Volkova G. V.[3]
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo
[1](Tel. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),
[2](Tel. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru),
[3](Tel. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru)

SYNTHESIS AND SIMULATION OF NONLINEAR ROBUST SYSTEM OF TEMPERATURE CONTROL IN A CHEMICAL REACTOR

Аннотация. В работе решается задача синтеза нелинейного астатического алгоритма стабилизации температурного режима в жидкофазном химическом реакторе, обеспечивающего инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями, асимптотическую устойчивость и робастность при действии неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений.

Ключевые слова: робастное управление, аналитический синтез, химический реактор, АКАР, синергетическая теория управления, компьютерное моделирование.

Abstract. The paper deals with nonlinear astatic control algorithm synthesis of liquid-phase in a chemical reactor which provides disturbance invariance, covariance to the given actions, asymptotic stability and robustness under action of uncontrollable parametric and signal disturbances.

Keywords: robust control, analytical synthesis, chemical reactor, CSTR, ADAR, synergetic control theory, computer simulation.

Введение. Одним из основных требований к системе управления является требование робастности, т.е. способность сохранять работоспособность при изменении параметров математической модели объекта. Проблема робастного управления является одной из важнейших в теории и практике автоматического управления. Анализ публикаций показывает, что в классе линейных систем для обеспечения робастности используют адаптивные системы автоматического управления с подстройкой параметров, безынерционные регуляторы состояния, робастные системы на основе типовых ПИД-регуляторов, нечеткие системы управления. Однако указанные подходы не эффективны при синтезе систем управления существенно нелинейными объектами. Перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный в рамках синергетической теории управления [1].

Использование идей синергетики в задачах управления требует перехода от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению к целевому аттрактору (желаемому инвариантному многообразию) и дальнейшему движению вдоль многообразия в конечное состояние. Данный способ самоорганизации называется направленным или целевым. Эффективность алгоритмов, синтезированных с применением синергетической теории управления, показана в ряде работ [1 – 4].

В предлагаемой работе решается задача аналитического синтеза алгоритма управления температурой в химическом реакторе методом АКАР, который обладает свойством робастности.

Постановка задачи. В промышленности нередка ситуация, когда реакторный процесс ведут по температуре смеси в аппарате. При этом, как правило, стабилизируются расходы входных потоков, их соотношение и уровень смеси в реакторе.

Рассмотрим широко применяемый в химической промышленности жидкофазный реактор емкостного типа непрерывного действия, снабженный механической мешалкой для перемешивания реакционной смеси и теплообменной рубашкой (рис. 1). В аппарате реализуется сложная последовательно-параллельная экзотермическая реакция оксиэтилирования бутилового спирта, имеющая большое практическое значение:

$$A + B \xrightarrow{k_1} P_1, \qquad A + P_1 \xrightarrow{k_2} P_2, \qquad A + P_2 \xrightarrow{k_3} P_3,$$

где A, B – оксид этилена и спирт, соответственно; P_1, P_2, P_3 – продукты реакции; k_1, k_2, k_3 – константы скоростей стадий. Аппарат функционирует в политропическом режиме.

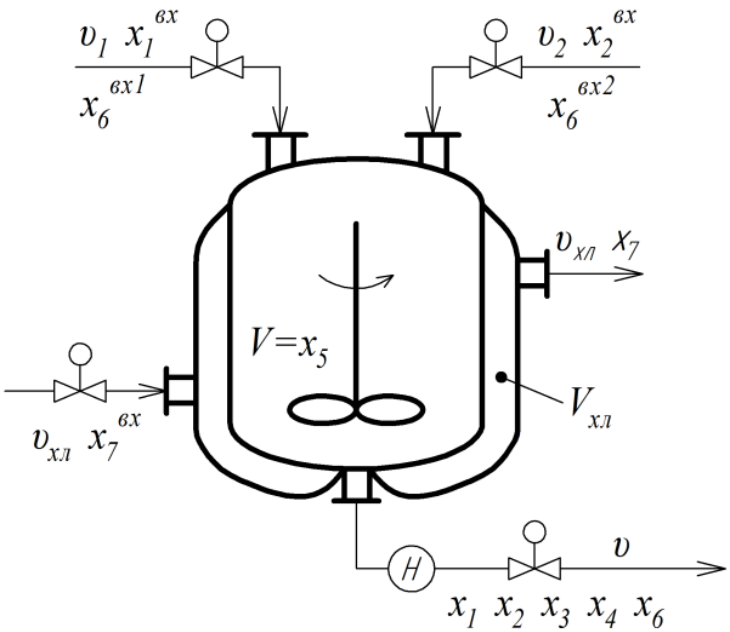


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

На рисунке 1 введены обозначения: $x_1^{вх}$, $x_2^{вх}$ – концентрации исходных реагентов; $x_6^{вх1}$, $x_6^{вх2}$ – температуры потоков исходных реагентов; υ_1, υ_2 – расходы исходных реагентов; $\upsilon_{хл}$ – расход хладоагента на входе и выходе из аппарата; $x_7^{вх}$, x_7 – температуры

хладоагента на входе и выходе из аппарата; υ – расход смеси на выходе из аппарата; x_1, x_2, x_3, x_4 – концентрации компонентов A, B, P_1, P_2 в реакторе; x_6 – температура реакционной смеси в аппарате; $V = x_5$ – объем аппарата; $V_{хл}$ – объем хладоагента в рубашке.

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации температуры реакционной смеси в аппарате на заданном уровне в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений. Регулирующим входным воздействием является расход хладоагента, подаваемый в рубашку.

Синтез закона управления методом АКАР. Из классической теории управления известно, что пропорциональный регулятор не обеспечивает отслеживания изменения уставок или возмущающих воздействий по нагрузке. В связи с этим представляется целесообразным синтезировать астатический закон управления температурой, обладающий свойством грубости (робастности). Это возможно, если в алгоритм управления температурой ввести интегральную составляющую [4].

В соответствии с методом АКАР, для введения интегральной составляющей в закон управления необходимо расширить пространство состояния путем введения в рассмотрение нескольких дополнительных переменных состояния, число которых не может быть больше числа регулируемых переменных. В нашем случае необходимо ввести одну дополнительную переменную z_1, подчиняющуюся уравнению

$$\frac{dz_1}{d\tau} = x_6 - \bar{x}_6, \tag{1}$$

где x_6, $\bar{x}_6$ – текущее и заданное значения температуры смеси в реакторе. Из (1) следует, что $z_1 = \int_0^\tau (x_6 - \bar{x}_6) d\tau$ и закон управления необходимо синтезировать таким образом, чтобы переменная z_1 входила в выражение для управляющего воздействия.

Расширенная математическая модель реактора при условии постоянства уровня реакционной смеси в аппарате ($V = x_5 = \text{const}$) с учетом (1) запишется

$$\begin{aligned}
&\frac{dz_1}{d\tau} = x_6 - \bar{x}_6, \quad \frac{dx_1}{d\tau} = R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1, \quad \frac{dx_2}{d\tau} = R_2 + M_B - b_2 x_2 - b_3 x_2, \\
&\frac{dx_3}{d\tau} = R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3, \quad \frac{dx_4}{d\tau} = R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4, \\
&\frac{dx_6}{d\tau} = \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{вх1} + \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2) x_6 + (x_6^{вх2} - x_6) b_3, \\
&\frac{dx_7}{d\tau} = \beta_2 (x_6 - x_7) + b_1 (x_7^{вх} - x_7) u,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $M_A = \upsilon_1 x_1^{вх}/V$; $M_B = \upsilon_2 \; x_2^{вх}/V$; $b_1 = 1/V_{хл}$; $b_2 = \upsilon_1 \; /V$; $b_3 = \upsilon_2/V$; $\alpha_i = \Delta H_i \; /(\rho C)$, $i = 1, \ldots, 3$; $\beta_1 = K_T F_T/(\rho C V)$; $\beta_2 = K_T F_T/(\rho_{хл} C_{хл} V_{хл})$; R_i, $i = 1, \ldots, 4$ – скорость реакции по соответствующему веществу; ΔH_i, $i = 1, \ldots, 3$ – тепловой эффект соответствующей стадии реакции; K_T, F_T – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата; ρ, C – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $\rho_{хл}$, $C_{хл}$ – плотность и теплоемкость хладоагента; $u = \upsilon_{хл}$ – регулирующее воздействие.

Этапы процедуры синергетического синтеза закона управления изложены в [1]. Поскольку расход хладоагента воздействует на переменную x_6 через переменную x_7, то канал управления температурой смеси в аппарате в развернутом виде запишется: $u \to x_7 \to x_6$. На первом шаге вводится в рассмотрение макропеременная:

$$\psi_1 = x_7 + \nu_1(x_6, z_1), \tag{3}$$

где $\nu_1(x_6, z_1)$ – некоторая функция, подлежащая определению в ходе дальнейшей процедуры синтеза.

Макропеременная (3) должна удовлетворять решению основного функционального уравнения метода АКАР:

$$T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0. \tag{4}$$

После подстановки макропеременной ψ_1 в функциональное уравнение (4) получим выражение

$$T_1\left[\frac{dx_7}{d\tau} + \frac{\partial\nu_1}{\partial x_6}\cdot\frac{dx_6}{d\tau} + \frac{\partial\nu_1}{\partial z_1}\cdot\frac{dz_1}{d\tau}\right] + x_7 + \nu_1 = 0,$$

которое в силу уравнений объекта (2) примет вид

$$T_1\left[\beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{\text{вх}} - x_7)u + \frac{\partial\nu_1}{\partial x_6}\cdot\left(f_6 + \beta_1 x_7\right) + \frac{\partial\nu_1}{\partial z_1}\cdot(x_6 - \bar{x}_6)\right] + x_7 + \nu_1 = 0, \tag{5}$$

где $f_6 = \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{\text{вх}1} - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{\text{вх}2} - x_6)b_3$.

Из (5) получаем выражение для закона управления:

$$u = -\frac{(x_7 + \nu_1)}{T_1 b_1(x_7^{\text{вх}} - x_7)} - \frac{\beta_2(x_6 - x_7)}{b_1(x_7^{\text{вх}} - x_7)} - \frac{\partial\nu_1}{\partial x_6}\frac{\left(f_6 + \beta_1 x_7\right)}{b_1(x_7^{\text{вх}} - x_7)} - \frac{\partial\nu_1}{\partial z_1}\frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{b_1(x_7^{\text{вх}} - x_7)}. \tag{6}$$

Управление u переводит изображающую точку системы на фазовой плоскости из произвольного начального состояния в окрестность многообразия $\psi_1 = 0$, на котором реализуется связь $x_7 = -\nu_1$ и наблюдается эффект «сжатия фазового пространства», т.е. снижение размерности системы уравнений (2). Уравнения декомпозированной системы с учетом соотношения $x_7 = -\nu_1$ примут вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{dz_1}{d\tau} = x_6 - \bar{x}_6, \quad \frac{dx_1}{d\tau} = R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1,\\
&\frac{dx_2}{d\tau} = R_2 + M_B - b_2 x_2 - b_3 x_2, \quad \frac{dx_3}{d\tau} = R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3,\\
&\frac{dx_4}{d\tau} = R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4, \quad \frac{dx_6}{d\tau} = f_6 - \beta_1\nu_1.
\end{aligned} \tag{7}$$

Для нахождения функции $\nu_1(x_6, z_1)$ введем в рассмотрение цель движения системы (7) на втором этапе в форме инвариантного многообразия

$$\psi_2 = x_6 - \bar{x}_6 + \gamma_1 z_1 = 0, \tag{8}$$

где γ_1 – настроечный параметр интегральной составляющей закона управления.

Макропеременная ψ_2 удовлетворяет решению функционального уравнения $T_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$, которое в развернутом виде с учетом выражения (8) в силу модели декомпозированной системы (7) примет вид

$$T_2\left[f_6 - \beta_1\nu_1 + \gamma_1(x_6 - \bar{x}_6)\right] + x_6 - \bar{x}_6 + \gamma_1 z_1 = 0\,. \qquad (9)$$

«Внутреннее» управление в соответствии с выражением (9) запишется

$$\nu_1 = \frac{x_6 - \bar{x}_6 + \gamma_1 z_1}{T_2\beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1} + \frac{\gamma_1(x_6 - \bar{x}_6)}{\beta_1}\,. \qquad (10)$$

Окончательное выражение для закона управления $u(x)$ получается путем подстановки в (6) функции ν_1 (10) и ее частных производных $\partial\nu_1/\partial x_6$, $\partial\nu_1/\partial z_1$. Параметрами настройки закона управления, влияющими на качество динамики процессов в замкнутой системе, являются постоянные времени T_1, T_2, а также параметр γ_1, отвечающий за вклад интегральной составляющей. Условия асимптотической устойчивости системы в целом относительно введенных в фазовое пространство многообразий $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ имеют вид: $T_1 > 0$, $T_2 > 0$, $\gamma_1 > 0$.

Предлагается два варианта технической реализации алгоритма управления:

1) осуществляется измерение всех переменных состояния объекта, текущие значения которых используются для расчета управляющего воздействия u (или строится наблюдатель при измерении части переменных состояния);

2) измеряются только регулируемая переменная – x_6 и температура хладоагента в рубашке – x_7. Остальные переменные состояния, входящие в закон управления, считаются не наблюдаемыми. Их значения при расчете управляющего воздействия принимаются постоянными и равными значениям этих переменных в статике.

Компьютерное моделирование системы управления. Методами компьютерного моделирования проведено исследование системы управления температурным режимом в химическом реакторе с использованием синтезированного нелинейного робастного закона. Моделирование проводилось при технологических и конструктивных параметрах, обеспечивающих оптимальный режим работы химического реактора [5].

В результате имитационного моделирования установлено, что замкнутая система управления не имеет статической ошибки регулирования при действии на объект неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений, изменении задающих воздействий и отклонении начальных условий от статических значений при реализации варианта закона управления, предусматривающего только частичное измерение переменных состояния объекта.

На рисунке 2 приведены примеры переходных процессов в замкнутой системе при отклонении переменных состояния от статики в момент времени $\tau = 50$ мин.

Заключение. Таким образом, методами теории синергетического управления решена задача аналитического синтеза нелинейного робастного закона регулирования, обеспечивающего управление температурным режимом химического реактора в условиях действия на объект возмущений. Алгоритмический синтез закона управления проведен с использованием нелинейной математической модели объекта без применения

процедуры линеаризации. Компьютерное моделирование показало инвариантность замкнутой системы к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности метода АКАР для решения задач алгоритмического синтеза систем управления нелинейными, многомерными и многосвязными технологическими объектами.

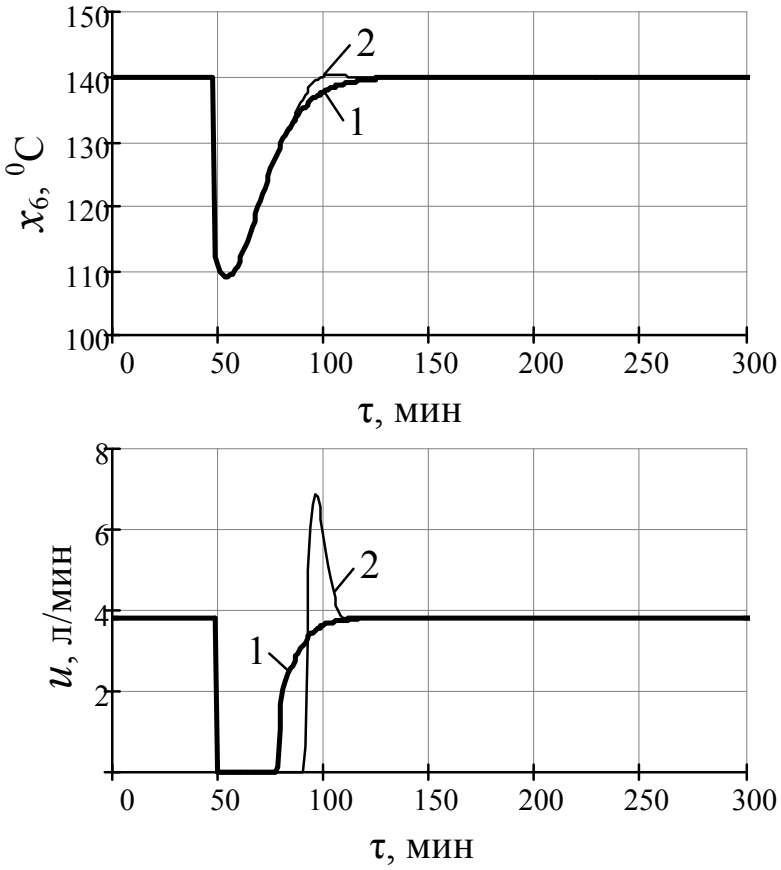


Рис. 2. Переходные процессы выходной переменной и управления при отклонении переменных состояния от статики $\Delta x_i = -0{,}2x_i^0$:
1 – первый вариант реализации алгоритма; *2* – второй вариант

Список использованных источников

1. **Labutin, A. N.** Analytical synthesis of chemical reactor control system / A. N. Labutin, V. Yu. Nevinitsyn // Theor. Found. Chem. Eng. – 2014. – V. 48, № 3. – P. 296 – 300.

2. **Labutin, A. N.** Synthesis of chemical reactor nonlinear control algorithm using synergetic approach / A. N. Labutin, V. Yu. Nevinitsyn // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2017. – Т. 60, № 2.– P. 38 – 44.

3. **Невиницын, В. Ю.** Управление температурным режимом химического реактора с применением нелинейного робастного алгоритма / В. Ю. Невиницын, А. Н. Лабутин, Г. В. Волкова // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. – 2018. – № 2. – С. 64 – 68.

4. **Лабутин, А. Н.** Робастное управление температурным режимом химического реактора / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова // Информатика и системы управления. – 2018. – № 3(57). – С. 115 – 123.

5. **Системный** анализ химического реактора как объекта управления / В. Ю. Невиницын, А. Н. Лабутин, Г. В. Волкова и др. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 92 – 99.

References

1. **Labutin, A. N.** Analytical synthesis of chemical reactor control system / A. N. Labutin, V. Y. Nevinitsyn // Theor. Found. Chem. Eng. – 2014. – V. 48, № 3. – P. 296 – 300.

2. **Labutin, A. N.** Synthesis of chemical reactor nonlinear control algorithm using synergetic approach / A. N. Labutin, V. Yu. Nevinitsyn // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2017. – Т. 60, № 2. – P. 38 – 44.

3. **Nevinitsyn, V. Yu.** Temperature control of chemical reactor using nonlinear robust algorithm / V. Y. Nevinitsyn, A. N. Labutin, G. V. Volkova // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom. – 2018. – № 2. – P. 64 – 68.

4. **Labutin, A. N.** Robastnoe upravlenie temperaturnym rezhimom himicheskogo reaktora / A. N. Labutin, V. Yu. Nevinitsyn, G. V. Volkova // Informatika i sistemy upravleniya. – 2018. – № 3(57). – P. 115 – 123.

5. **System** analysis of chemical reactor as control object / V. Yu. Nevinitsyn, A. N. Labutin, G. V. Volkova et al. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2017. – V. 60, № 9. – P. 92 – 99.

УДК 62-932.4

Карпушкин С. В., Корнилов К. С., Афанасенков В. Л.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ НАГРЕВА ПЛИТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Karpushkin S. V., Kornilov K. S., Afanasenkov V. L.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF HEATING METHODS FOR PLATES OF HYDRAULIC PRESSES

Аннотация. Предложена методика сравнения эффективности способов нагрева плит гидравлических прессов с точки зрения энергоемкости, продолжительности периода нагрева и стабилизации температуры плиты, точности поддержания заданной температуры и степени неравномерности температурного поля рабочей поверхности. Методика предусматривает использование системы конечно-элементного анализа и разработана на основе математических моделей процесса нагрева для паровых плит, плит с омическими и индукционными нагревателями. Приведен пример практического применения методики для сравнения эффективности промышленных нагревательных плит парового, омического и индукционного нагрева.

Ключевые слова: гидравлический пресс, нагревательная плита, моделирование процесса нагрева и стабилизации температуры, конечно-элементный анализ, сравнение показателей эффективности.

Abstract. The paper explores the technique for comparing the efficiency of heating methods for plates of hydraulic presses in terms of energy consumption, the duration of the heating period and the stabilization of the plate temperature, the accuracy of maintaining the desired temperature and the degree of non-uniformity of the temperature field of the working surface. The technique involves the use of a system of finite-element analysis and is based on mathematical models of the heating process for steam plates, plates with ohmic and induction heaters. An example of the practical application of techniques for comparing the efficiency of industrial plates with steam, ohmic and induction heating is given.

Keywords: hydraulic press, heating plate, modelling of heating process and stabilization temperature, finite element analysis, performance comparison.

Гидравлические прессы широко используются в промышленности для осуществления процессов горячего прессования резинотехнических изделий (РТИ) и изделий из пластмасс, термообработки изделий из металлов. Основным элементом конструкции пресса, обеспечивающим реализацию тепловых процессов, являются нагревательные плиты парового, омического или индукционного нагрева. В последние годы все большее распространение получают плиты индукционного нагрева благодаря повышенной

надежности, равномерности прогрева рабочей поверхности и пониженной энергоемкости, однако выбор наиболее приемлемого способа нагрева плит гидравлических прессов в конкретной ситуации может быть не очевидным.

В данной работе предлагается методика оценки эффективности нагревательных плит гидравлических прессов с точки зрения влияния способа их нагрева на энергоемкость, продолжительности периодов нагрева и стабилизации температуры плиты, точности поддержания заданной температуры и перепада температур по рабочей поверхности в условиях теплообмена с окружающим воздухом. Определение этих характеристик основано на результатах теплового расчета: распределение температур в объеме плиты в периоды нагрева, стабилизация рабочей температуры и ее поддержание в течение времени, указанного в регламенте реализуемого процесса.

Процесс нагрева одиночной нагревательной плиты описывается трехмерным нестационарным дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} \cdot \left(\lambda \cdot \nabla^2 T + q\right), \tag{1}$$

где $T = T(x, y, z, \tau)$ – температура в точке объема плиты с координатами (x, y, z) в момент времени τ (°C); $q = q(x, y, z)$ – удельное тепловыделение в этой точке (Вт/м^3); λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности материала плиты (Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$), его теплоемкость (Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$) и плотность (кг·м$^{-3}$) соответственно.

Начальное условие для решения уравнения (1)

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \tag{2}$$

где T_0 – температура окружающего воздуха (°C).

Теплоотдача от поверхностей неизолированной нагревательной плиты характеризуется граничными условиями 3-го рода:

$$-\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{\Omega_r} = \alpha_r \left(T_r - T_0\right), \quad r = 1, \ldots, 6, \tag{3}$$

где Ω_r – r-я поверхность нагревательной плиты (рабочая поверхность, крышка, торцы); α_r – комплексный коэффициент теплоотдачи от r-й поверхности плиты с учетом конвекции и излучения, значение которого определяется согласно [1], (Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$); T_r – средняя температура r-й поверхности плиты в конкретный момент времени (°C).

Способ определения интенсивности внутренних тепловыделений в плите зависит от способа ее нагрева. Для паровой плиты, приняв допущение о равномерности и идентичности тепловыделения во всем объеме каждого парового канала, получим

$$q(x, y, z, T_{\text{av}}) = \begin{cases} \dfrac{4 \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot \left(t_{\text{п}} - T_{\text{av}}\right)}{d_{\text{к}}}, & \text{если } (x, y, z) \in vk_j, \ j = 1, \ldots, nk, \\ 0, & \text{иначе}, \end{cases} \tag{5}$$

где $\alpha_п$ – коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара в горизонтальных цилиндрических каналах [1], (Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$); $t_п$ – температура конденсации пара (°С); $d_к$ – внутренний диаметр канала (м); vk_j, nk – объем j-го канала (м^3) и число каналов в плите.

Удельное тепловыделение омических нагревателей определяется по закону Джоуля–Ленца. При допущении о равномерном выделении тепла в объеме пазов, где размещены нагреватели,

$$q(x,y,z)=\begin{cases}\dfrac{P_i}{v_i}, & \text{если } (x,y,z)\in v_i,\ i=1,\ ...,n_h,\\ 0, \text{иначе}, & \end{cases} \tag{6}$$

где P_i, v_i – мощность i-го нагревателя (Вт) и объем, в котором она выделяется (м^3); n_h – число нагревателей в плите.

Удельное тепловыделение индукционных нагревателей соответствует среднему тепловыделению от вихревых токов в установившемся режиме за период $1/f$, где f – частота переменного тока (Гц) и определяется по закону Джоуля–Ленца:

$$q=f\int_{t_{st}}^{t_{st}+\frac{1}{f}}\frac{J^2}{\gamma}dt, \tag{7}$$

где t_{st} – условное время начала установившегося режима электромагнитных процессов, при котором не происходит значительных изменений амплитудных значений плотности тока (с); J – плотность тока (А/м^2); γ – удельная электрическая проводимость (Ом$^{-1}$м$^{-1}$).

Режим выдержки (стабилизации заданной температуры) рабочей поверхности нагревательной плиты обычно реализуется с помощью двухпозиционного регулятора. Поэтому в математическую модель температурного поля нагревательных плит для периода выдержки необходимо включить выражение

$$I(t)=\frac{I}{2}\cdot\left(1+(-1)^{I_r(t)+1}\right), \tag{8}$$

где $I_r(t)=\begin{cases}1, \text{если } T_s(t)<T_d;\\ 0, \text{если } T_s(t)>T_u;\end{cases}$ – состояние регулятора («1» – включен, «0» – выключен); $T_s(t)$ – температура контрольной термопары (°С); T_d, T_u – нижний и верхний пороги срабатывания регулятора соответственно (°С).

Таким образом, математическую модель нагрева паровой плиты образуют соотношения (1) – (5), (8), плиты омического нагрева – соотношения (1) – (4), (6), (8), плиты индукционного нагрева – соотношения (1) – (4), (7), (8). Для решения этих моделей использован метод конечных элементов, реализуемый системой ANSYS [2]. Алгоритм решения представлен в [3].

Предлагаемая методика выбора типа нагревательных плит гидравлических прессов предусматривает:

1) расчет температурного поля плиты для периода $\tau_р$ от начала ее нагрева до окончания реализуемого процесса (например, вулканизации РТИ), выделение периодов нагрева, стабилизации рабочей температуры и ее поддержания в течение времени, соответствующего регламентной продолжительности процесса;

2) определение степени соответствия температуры плиты в месте установки контрольной термопары заданному значению рабочей температуры T_{set};

3) определение зависимости перепада температур по рабочей поверхности плиты от времени, значения перепада в течение периода поддержания рабочей температуры;

4) построение зависимости энергопотребления плиты от времени в период $\tau_р$, определение энергозатрат в течение этого периода.

В качестве примера практического применения предложенной методики приведем результаты сравнения характеристик стандартных плит размерами 600×600 мм:

– парового нагрева, выпускаемых АО «Завод Тамбовполимермаш» (индекс 432.384.02, номинальная мощность 5,5 кВт);

– индукционного нагрева, выпускаемых АО «Завод Тамбовполимермаш» (индекс 432.383.35, номинальная мощность 5,8 кВт);

– омического нагрева, выпускаемых АО «АРТИ-завод», г. Тамбов (индекс РТПС-600, номинальная мощность 4,7 кВт).

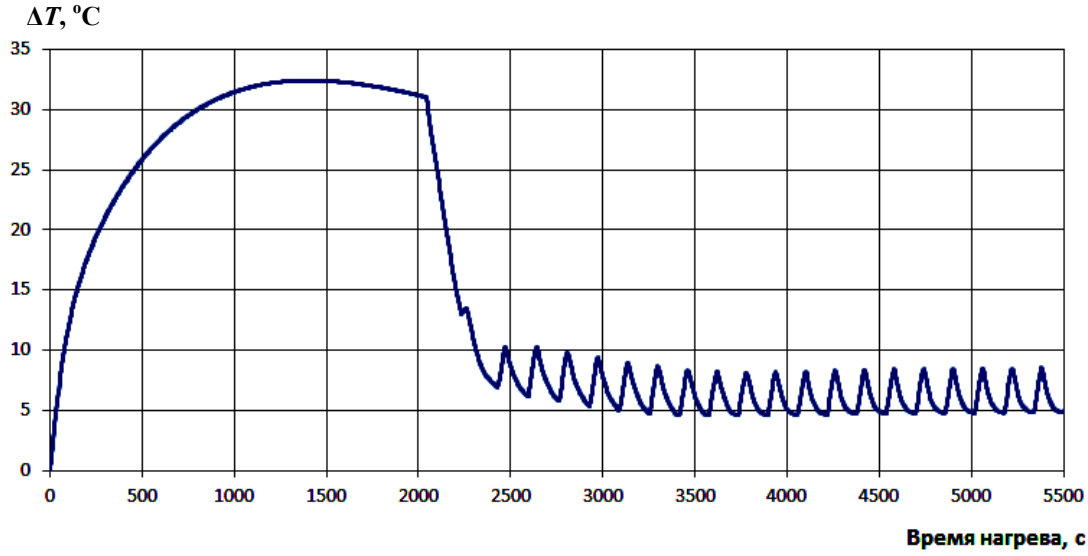
Температура окружающего воздуха T_0 = 10 °С. Тепловой анализ плит проводился для периода времени $\tau_р$ = 5500 с (около 1,5 часов непрерывной работы от момента включения нагревателей или подачи пара). Процесс автоматического регулирования температуры всех плит начинался в момент достижения температуры T_s = 150 °С в месте установки контрольной термопары (температура вулканизации большинства резиновых смесей 150…153 °С).

На рисунке 1 представлены зависимости перепада температур по рабочим поверхностям выбранных нагревательных плит. На поверхности плиты 432.383.35, см. рис. 1, *а*, перепад температур периодически колеблется между значениями 5 и 8 °С, т.е. максимальный перепад температур на рабочей поверхности плиты индукционного нагрева в течение периода поддержания рабочей температуры составляет ± 4 °С. Температура плиты 432.384.02 в месте установки контрольной термопары с момента времени 3000 с, а плиты РТПС-600 с момента времени 5500 с почти точно соответствует T_s = 150 °С, см. рис. 1, *б*, *в*, а перепад температур по рабочей поверхности обеих этих плит практически постоянен и приблизительно равен 14 °С.

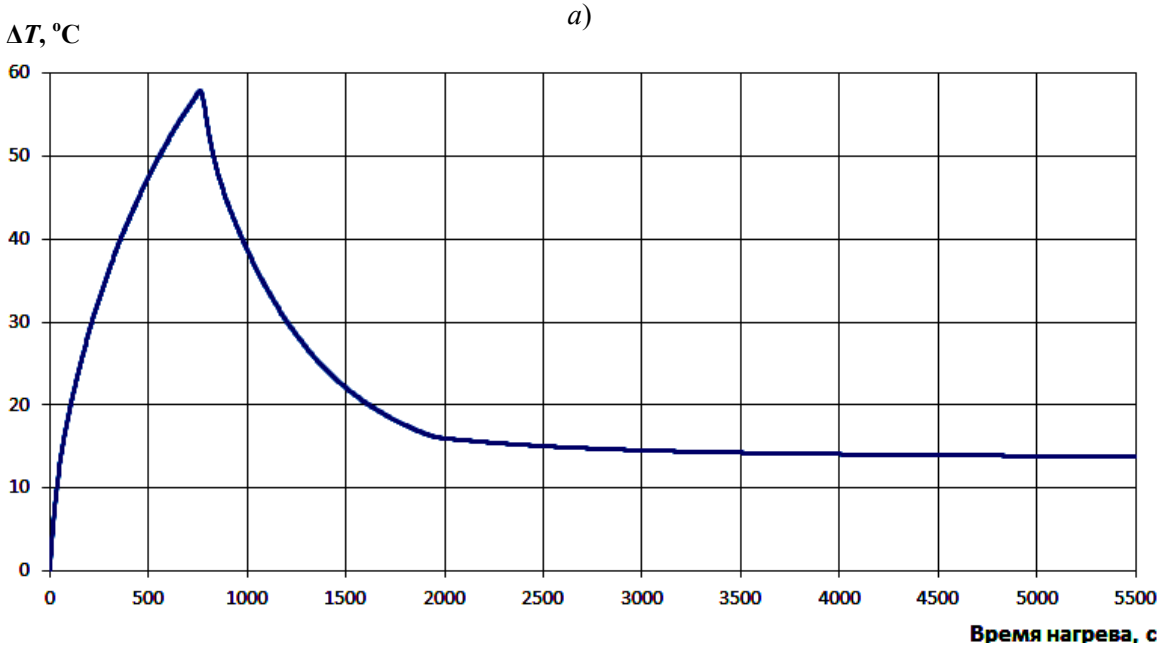
Результаты сравнения эффективности выбранных плит индукционного, парового и омического нагрева сведены в табл. 1.

1. Сравнение эффективности нагревательных плит

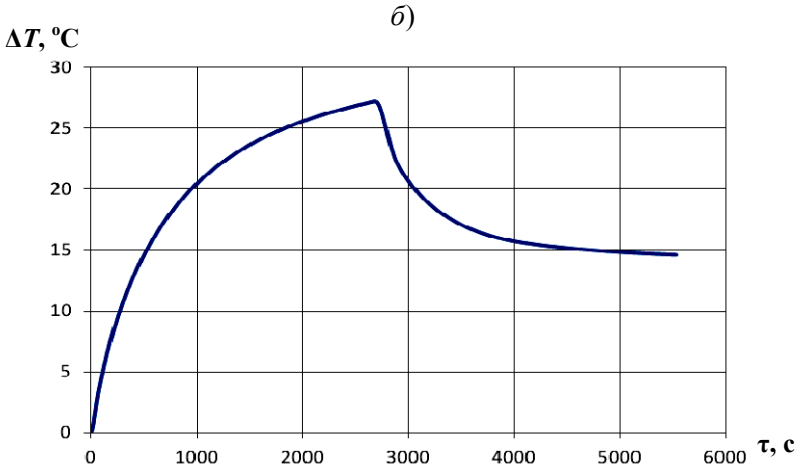
Индекс плиты	Параметры эффективности				
	$\tau_{нагр}$, с	$\tau_{стаб}$, с	T_s, °С	ΔT, °С	$Q\cdot\tau$, кВт·ч
432.383.35	2040	2040…3500	150 ± 1	±3	5,32
432.384.02	760	760…3000	150 ± 0,25	±7	5,73
РТПС-600	2745	2745…5500	150 ± 0,25	±7	4,9



а)



б)



в)

Рис. 1. Перепад температур на поверхностях плит в течение периода $\tau_р$:
а – плита индукционного нагрева 432.383.35; *б* – паровая плита 432.384.02;
в – плита омического нагрева РТПС-600

На основе выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Период нагрева плиты омического нагрева от начальной до рабочей температуры составляет 2745 с, индукционного нагрева 2040 с, парового нагрева – 760 с.

2. Суммарная продолжительность периодов нагрева и стабилизации рабочей температуры плит индукционного и парового нагрева достаточно близки: 3500 с и 3000 с соответственно, омического нагрева – существенно больше: 5500 с.

3. За счет использования более сложных законов регулирования температура в месте установки контрольной термопары для плит парового и омического нагрева в период регулирования практически совпадает с заданной, индукционной плиты: $T_s \pm 1$ °С.

4. В течение периода поддержания рабочей температуры плиты, имеющего практическую значимость, средний перепад температур по рабочей поверхности плиты индукционного нагрева составляет около ±3 °С (максимальный ±4 °С, минимальный ±2,5 °С), плит парового и омического нагрева – около ±7 °С.

5. В течение 1,5 часов индукционная плита потребляет 5,32 кВт·ч, паровая – 5,73 кВт·ч, а омическая – 4,9 кВт·ч.

Как видно, за исключением времени нагрева и энергоемкости, характеристики эффективности свидетельствуют в пользу индукционной плиты. Как показывают расчеты, применение подобной индукционной плиты обеспечит удовлетворительные условия вулканизации широкой гаммы РТИ [4]. Несмотря на значительный перепад температур по рабочей поверхности, плиты парового и омического нагрева могут оказаться пригодными для вулканизации РТИ малой массы и несложной формы (прокладок, колец, пробок). При усложнении конфигурации РТИ (например, выпускаемых АО «Завод Тамбовполимермаш» пыльников и мембран для насосных установок [5]) они вряд ли обеспечат допустимые перепады температур в изделиях, а для вулканизации РТИ, размеры которых соизмеримы с размерами плиты, (резиновые коврики, резиношифер, элементы гусениц снегоходов) плиты 432.384.02 и РТПС-600 непригодны.

Таким образом, предложенная методика оценки выбора типа нагревательных плит гидравлических прессов позволяет количественно оценить влияние способа их нагрева на энергоемкость, продолжительность периодов нагрева и стабилизации рабочей температуры, точность поддержания заданной температуры и перепад температур по рабочей поверхности. Такая оценка может способствовать выбору наиболее приемлемого способа нагрева плит прессов в конкретной производственной ситуации.

Список использованных источников

1. **Методы** расчета процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. – СПб. : Химия, 1998. – 496 с.

2. **Басов, К. А.** ANSYS: Справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

3. **Глебов, А. О.** Сравнение методик моделирования температурных полей индукционных нагревательных плит / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 7. – С. 23 – 28.

4. **Карпушкин, С. В.** Разработка виртуальной модели температурного поля резинотехнического изделия в процессе его обработки на вулканизационном прессе / С. В. Карпушкин, С. В. Лавров, К. С. Корнилов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 477 – 482.

5. **Карпов, С. В.** Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе / С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.

References

1. **Metody** rascheta protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii / P. G. Romankov, V. F. Frolov, O. M. Flisyuk, M. I. Kurochkina. – SPb. : Khimiya, 1998. – 496 s.

2. **Basov, K. A.** ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya / K. A. Basov. – M. : DMK Press, 2005. – 640 s.

3. **Glebov, A. O.** A Comparison of Modeling Techniques for Temperature Fields of Inductive Heating Plates / A. O. Glebov, S. V. Karpov, S. V. Karpushkin // Automation and Remote Control. – 2014. – V. 75, № 6 – P. 1120 – 1129.

4. **Karpushkin, S. V.** Razrabotka virtual'noy modeli temperaturnogo polya rezinotekhnicheskogo izdeliya v protsesse yego obrabotki na vulkanizatsionnom presse / S. V. Karpushkin, S. V. Lavrov, K. S. Kornilov // Vestnik Tambovskogo GTU. – 2011. – T. 17, № 2. – S. 477 – 482.

5. **Karpov, S. V.** Determination of efficiency of press molds for industrial rubber product manufacture and system for their heating in vulcanizing press / S. V. Karpov, S. V. Karpushkin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2012. – V. 48, № 3-4. – P. 153 – 162.

УДК 62-932.4

Карпушкин С. В., Глебов А. О., Корнилов К. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИЙ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Karpushkin S. V., Glebov A. O., Kornilov K. S.
[1] Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru)

APPROXIMATION OF MAGNETIZATION CURVES FOR CALCULATION OF EDDY CURRENTS FIELDS IN FERROMAGNETIC MATERIALS

Аннотация. Для расчета полей вихревых токов в ферромагнитных материалах предлагается использовать аппроксимации результатов экспериментов по снятию зависимостей индукции магнитного поля от его напряженности – кривых намагничивания. Обоснован выбор оптимального способа аппроксимации из трех, наиболее популярных в расчетной практике. Для сравнительного анализа использованы результаты экспериментов по снятию кривых намагничивания материалов с различными магнитными свойствами. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования устройств индукционного нагрева, эффективность которых определяется конфигурацией электромагнитного поля.

Ключевые слова: кривая намагничивания, ферромагнитные материалы, вихревые токи, конечно-элементный анализ.

Abstract. It is proposed to use approximations of the experimental results on the removal of magnetic field dependences on its strength – magnetization curves – for calculations the fields of eddy currents in ferromagnetic materials. The justification of the choice of an optimum approximation method from three, most popular in design practice, is given. For comparative analysis, the results of experiments on the removal of magnetization curves of materials with various magnetic properties are used. The results obtained can be used in the design of induction heating devices, the efficiency of which is determined by the configuration of the electromagnetic field.

Keywords: magnetization curve, ferromagnetic materials, eddy currents, finite element analysis.

Главным затруднением расчета полей вихревых токов в ферромагнитных материалах, методика которого предусматривает решение системы дифференциальных уравнений Максвелла, является нелинейный характер зависимостей индукции магнитного поля от его напряженности – кривых намагничивания. Необходимость математического представления кривых намагничивания обусловлена тем, что даже для распространенных сталей отсутствуют экспериментальные данные во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля. При использовании интерполяции справочных данных, в том числе и кубическими сплайнами [1], не удается обеспечить монотонность полу-

чаемой функции, вследствие чего резко ухудшается сходимость решения, поэтому для описания магнитных свойств материалов применяют аппроксимационные зависимости.

Замена оригинальной кривой намагничивания ее аппроксимацией неизбежно сопровождается возникновением погрешностей, которые в ряде случаев могут оказаться критичными. Так, при проектировании устройств индукционного нагрева с повышенными требованиями к равномерности температурного поля, погрешность расчета тепловыделений от вихревых токов в 15…20% может стать причиной принятия ошибочных технических решений. В связи с этим актуален анализ существующих способов аппроксимации кривых намагничивания на предмет оценки возникающих погрешностей расчета полей вихревых токов.

В практике расчетов полей вихревых токов наиболее часто применяются: аппроксимация Фрелиха [2]; аппроксимация Мельгуя [3], основанная на использовании арктангенсовых функций; универсальная аппроксимация Пентегова [4], которая воспроизводит вид кривой намагничивания во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля.

Для анализа трех представленных способов аппроксимации использованы экспериментально снятые кривые намагничивания, приведенные на ресурсе [5]. Материалы выбраны по признаку максимального различия магнитных свойств: Stainless Steel 416; Low Carbon Steel SAE1020; Castings Cast Iron; Cobalt Steel Hiperco 50; Electrical Steel NGO – Posco 35PN250. Сравнение качества аппроксимаций осуществлялось по трем критериям:

1) среднеквадратическое отклонение аппроксимирующей кривой от экспериментальной;

2) погрешность расчета средней плотности магнитной коэнергии за четверть периода;

3) погрешность расчета удельной активной мощности, выделяемой в бесконечной пластине.

В сравнительных расчетах использовалось положительное значение среднеквадратического отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left[B(H_i) - B_i \right]^2} , \qquad (1)$$

где n – количество экспериментальных точек кривой намагничивания; B_i, H_i – индукция и напряженность магнитного поля, измеренные в ходе экспериментов, Тл, А/м; $B(H_i)$ – значение аппроксимирующей функции, Тл.

К понятию магнитной коэнергии [6] прибегают по причине затруднений определения магнитной энергии. Плотность магнитной энергии представляет собой площадь фигуры, ограниченной кривой намагничивания и осью ординат, см. рис. 1, а магнитной коэнергии – кривой намагничивания и осью абсцисс. Очевидно, что при равенстве магнитных энергий будет наблюдаться равенство магнитных коэнергий.

Ток в индукторах является синусоидальным, следовательно, синусоидально изменяется и напряженность магнитного поля H, т.е. за четверть периода среднее значение плотности магнитной коэнергии составит [7]:

$$w_{Co} = 4 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/4} \int_0^{H(t)} BdHdt \ ,$$

где $H(t) = H_0 \cos(2\pi ft)$; f – частота тока, Гц; H_0 – амплитудное значение напряженности магнитного поля, А/м; t – время, с; $T = 1/f$ – период колебаний тока, с.

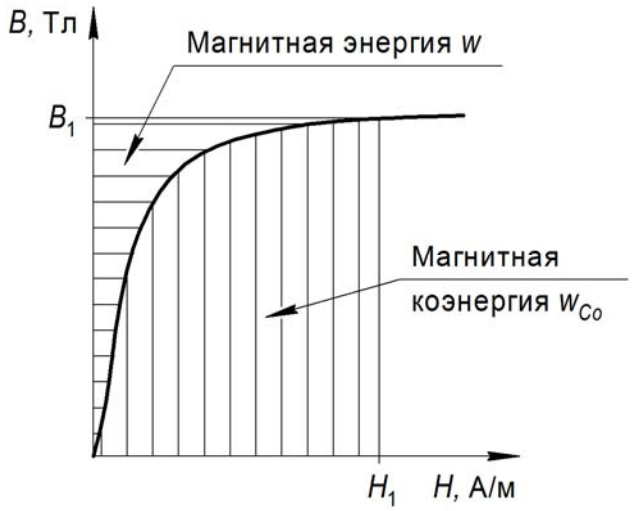


Рис. 1. Магнитная энергия и коэнергия

Погрешность расчета средней плотности магнитной коэнергии:

$$\varepsilon_{Co} = \left| w_{Co}^{a} - w_{Co} \right| \cdot w_{Co}^{-1}, \tag{2}$$

где w_{Co} – плотность средней коэнергии, рассчитанная по оригинальной кривой намагничивания, Вт/м^3; w_{Co}^{a} – плотность средней коэнергии, рассчитанная по аппроксимирующей кривой намагничивания, Вт/м^3.

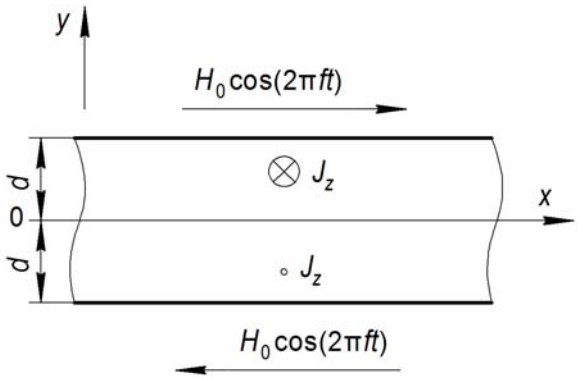


Рис. 2. Бесконечная пластина

Третий критерий использует удельную активную мощность, так как основная задача расчета устройств индукционного нагрева – определение поля тепловыделений от вихревых токов. По закону Джоуля–Ленца средняя за период мощность, отнесенная к единице поверхности бесконечной пластины, см. рис. 2.

$$P = 2\int_0^d T^{-1} \int_{t_{st}}^{t_{st}+T} J^2 \cdot \gamma^{-1} dtdy ,$$

где J – модуль плотности тока, А/м^2; γ – удельная проводимость материала, Ом$^{-1}$м$^{-1}$; d – половина толщины пластины, м; t_{st} – условное время стабилизации электромагнитных процессов, по окончании которого изменениями амплитудных значений плотности тока можно пренебречь, с.

Критерий различия активных мощностей вычисляется аналогично (2):

$$\varepsilon_P = \left|P_a - P\right| \cdot P^{-1} , \qquad (3)$$

где P – активная мощность, рассчитанная по оригинальной кривой намагничивания, Вт; P_a – активная мощность, рассчитанная по аппроксимирующей кривой намагничивания, Вт.

Поле вихревых токов определяется в результате решения уравнений Максвелла в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Рассчитывалась мощность, выделяемая в бесконечной пластине, толщиной 5 мм. Удельная проводимость материала пластины $\gamma = 5 \cdot 10^6$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$, частота тока $f = 50$ Гц, амплитуда тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля на поверхности пластины $H_0 = 10^4$ А/м. В качестве периода стабилизации электромагнитных процессов использовано значение $t_{st} = 2T$, максимальный шаг по времени $h_{\max} = T/40$. Минимальный шаг выбирался из условия сходимости итерационного процесса решения уравнений. На этапе предварительных экспериментов установлено, что при таких значениях t_{st} и $h_{\max}$ погрешность расчета активной мощности не превышает 1%. Точность при этом оценивалась относительно расчета, где $t_{st} = 9T$, $h_{\max} = T/600$.

Значения мощностей, рассчитанные для пяти материалов по четырем кривым намагничивания (оригинальная и три аппроксимирующих), приведены в табл. 1. Усредненные значения критериев представлены в табл. 2.

Как видно из представленных результатов, наилучшее описание основной кривой намагничивания получено с помощью универсальной аппроксимации Пентегова. Максимальное рассогласование наблюдается при аппроксимации кривой намагничивания материала Castings Cast Iron: 4,29% по критерию активной мощности. Погрешность расчета активной мощности с применением других аппроксимаций кривых намагничивания в некоторых случаях может превышать 15%.

1. Удельная мощность, выделяемая в бесконечной пластине, Вт/м^2

	Оригинальная кривая	Аппроксимация Фрелиха	Аппроксимация Мельгуя	Аппроксимация Пентегова
Stainless Steel 416	7552	7624	7868	7626
Low Carbon Steel SAE1020	10 444	11 454	11 503	10 892
Castings Cast Iron	7323	8284	8483	7676
Cobalt Steel Hiperco 50	13 789	13 879	13 851	13 724
Electrical Steel NGO	10 134	10 724	10 665	10 529

2. Усредненные значения критериев

	Аппроксимация Фрелиха	Аппроксимация Мельгуя	Аппроксимация Пентегова
σ, Тл	0,103	0,070	0,056
ε_{Co}, %	4,16	5,05	1,94
ε_P, %	6,04	7,17	2,89

На рисунке 3 показаны кривые намагничивания по аппроксимациям Мельгуя $B_M(H)$ и Пентегова $B_P(H)$ в сравнении с экспериментальными значениями для материала Castings Cast Iron в логарифмическом масштабе. Из приведенных графиков видно, что аппроксимация Мельгуя дает значительные отклонения на интервале $[10^3;10^4]$ А/м, чем и объясняется погрешность расчета активной мощности 15,8% при напряженности 10^4 А/м на поверхности пластины.

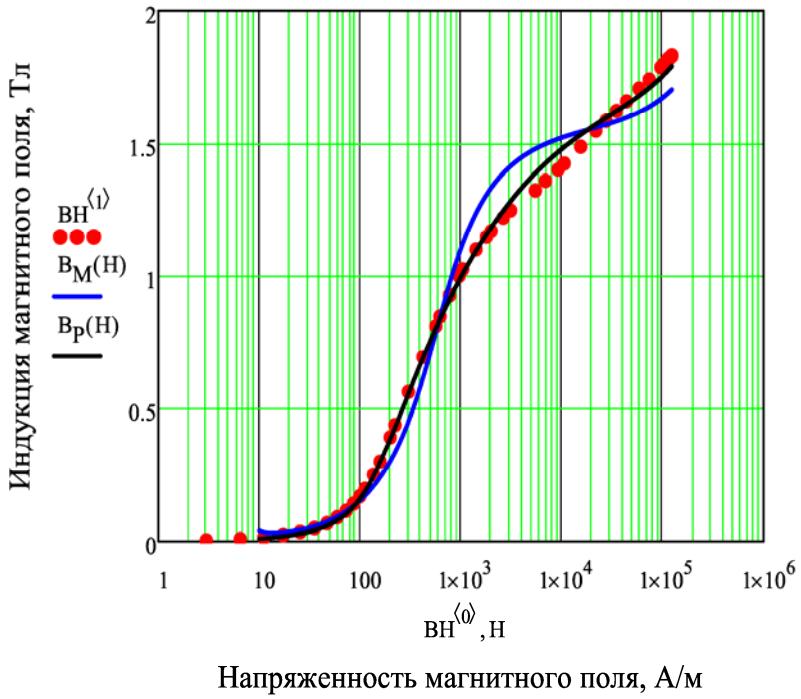


Рис. 3. Сравнение аппроксимаций кривых намагничивания материала Castings Cast Iron

Таким образом, при численном расчете поля вихревых токов в ферромагнитных телах предпочтительнее использование оригинальной (экспериментальной) кривой намагничивания (при условии наличия достоверных данных во всем диапазоне напряженностей магнитного поля). Замена кривой намагничивания приближенными зависимостями может приводить к существенным погрешностям. Среди проанализированных типов аппроксимаций наилучшее приближение кривой намагничивания получено с помощью универсальной аппроксимации Пентегова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/8.9*).

Список использованных источников

1. **Neubert, H.** Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics 4.2 / H. Neubert, T. Bödrich, R. Disselnkötter // 2011 COMSOL Conference, Stuttgart. – 2011.

2. **Lim, K. K.** Universal loss chart for the calculation of eddy-current losses in thick steel plates / K. K. Lim, P. Hammond // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1970. – V. 117, № 4. – P. 857 – 864.

3. **Матюк, В. Ф.** Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3 – 35.

4. **Пентегов, И. В.** Влияние параметров ферромагнитной среды на величину составляющих поверхностного импеданса / И. В. Пентегов, А. В. Красножон // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 2. – С. 65 – 69.

5. **URL :** http://magweb.us/free-bh-curves/

6. **Уайт, Д.** Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 523 с.

7. **Paoli, G.** Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems / G. Paoli, O. Bíró, G. Buchgraber // IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – V. 34, № 5. – P. 2625 – 2628.

References

1. **Neubert, H.** Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics 4.2 / H. Neubert, T. Bödrich, R. Disselnkötter // 2011 COMSOL Conference, Stuttgart. – 2011.

2. **Lim, K. K.** Universal loss chart for the calculation of eddy-current losses in thick steel plates / K. K. Lim, P. Hammond // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1970. – V. 117, № 4. – P. 857 – 864.

3. **Matyuk, V. F.** Matematicheskiye modeli krivoy namagnichivaniya i petel' magnitnogo gisterezisa. Chast' I. Analiz modeley / V. F. Matyuk, A. A.Osipov // Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. – 2011. – № 2. – S. 3 – 35.

4. **Pentegov, I. V.** Vliyaniye parametrov ferromagnitnoy sredy na velichinu sostavlyayushchikh poverkhnostnogo impedansa / I. V. Pentegov, A. V. Krasnozhon // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – 2007. – № 2. – S. 65 – 69.

5. **http://magweb.us/free-bh-curves/**

6. **Uayt, D.** Elektromekhanicheskoye preobrazovaniye energii / D. Uayt., G. Vudson. – M. ; L. : Energiya, 1964. – 523 s.

7. **Paoli, G.** Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems / G. Paoli, O. Bíró, G. Buchgraber // IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – V. 34, № 5. – P. 2625 – 2628.

УДК 004.9

Мокрозуб В. Г., Попов А. В., Калистратов М. С., Пыкин И. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Mokrozub V. G., Popov A. V., Kalistratov M. S., Pykin I. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

A GRAPHICAL REPRESENTATION OF THE PROBLEM OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Аннотация. Рассмотрено описание технического объекта в виде иерархии гиперграфов. Задача структурного синтеза технологического оборудования представлена в виде дерева элементов оборудования и дерева условий эксплуатации оборудования, которые связаны продукционными правилами.

Ключевые слова: технологическое оборудование, гиперграфы.

Abstract. The description of the technical object in the form of a hierarchy of hypergraphs is considered. The problem of structural synthesis of technological equipment is presented in the form of a tree of equipment elements and a tree of equipment operating conditions, which are related by production rules.

Keywords: technological equipment, hypergraphs.

Химико-технологическая система (ХТС) состоит из отдельных аппаратов (единиц технологического оборудования). Примеры отдельных единиц оборудования: емкостный аппарат, кожухотрубчатый теплообменник, ректификационная колонна и др. Завод-изготовитель производит отдельные единицы оборудования в соответствии с конструкторской документацией.

Отдельные единицы оборудования представляя.т собой систему, состоящую из элементов (обечайки, днища, опоры, штуцера и т.д.) и связей между ними.

Таким образом, структуру технического объекта можно представить как иерархию гиперграфов (рис. 1). При этом каждый элемент иерархии имеет дополнительные свойства. Например: для емкостного аппарата элементами $e_{0,1}$ и $e_{0,2}$ будут корпус и привод, в свою очередь – элементами корпуса $e_{0,1,1}$ и $e_{0,1,2}$, обечайка и днище. При этом днище будет иметь свойство тип, значение которого может быть эллиптическое, коническое или плоское.

Основными этапами конструирования технологического оборудования являются:

– структурный синтез. Определение структуры проектируемого объекта. Результат – перечень элементов, из которых состоит конструируемый объект, и связи между элементами (построение иерархии гиперграфов);

– параметрический синтез. Определение характеристик (свойств) элементов конструируемого объекта.

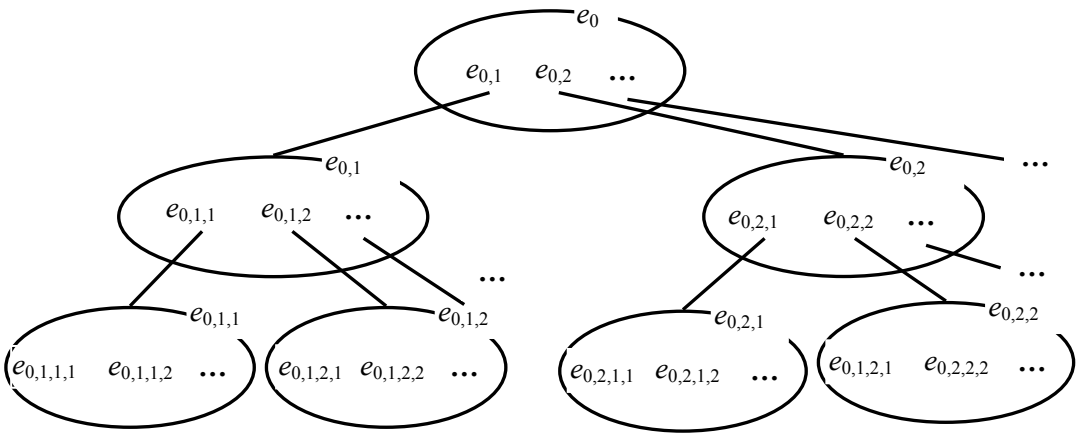


Рис. 1. Структура технологического оборудования

В основе структурного синтеза лежит И–ИЛИ дерево, обработка которого позволяет получить структуру проектируемого объекта.

Обработка дерева может осуществляться с помощью правил вида «Если …, то …». Например: «Если расположение емкостного аппарата «между этажами», то опоры – «лапы».

Части «то» правил представляют собой вершины И–ИЛИ дерева. Части «если» – таксономия (дерево) функций и условий эксплуатации оборудования. Таким образом, множество правила выбора элементов представляет собой неориентированный ультраграф, ребра которого включают в себя вершины И–ИЛИ дерева (вершины-приемники) и вершины дерева функций и условий эксплуатации оборудования (вершины-источники).

$O=(OV,OR)$ – И–ИЛИ дерево оборудования, $OV=\{ov_i, i=0...I\}$ – множество элементов оборудования, $OR=\{or_{km},\ k\in 0...I,\ m\in 0...I,\ k\neq m\}$ – связи типа класс–подкласс, например «опора – опора лапа».

$U=(UV,UR)$ – таксономия функций и условий эксплуатации оборудования, $UV=\{ov_j, j=0...J\}$ – множество функций и условий эксплуатации оборудования, например, функция – «перемешать», условия эксплуатации – «среда в аппарате склонна к образованию осадка», $UR=\{ur_{km},\ k\in 0...J,\ m\in 0...J,\ k\neq m,\}$ – связи типа класс–подкласс, например «перемешивание – интенсивное перемешивание».

$G=(GV,GR)$ – ультраграф связей вершин И–ИЛИ дерева элементов $OV=\{ov_i,\ i=0...I\}$ и вершин дерева функций и условий эксплуатации $UV=\{uv_j,\ j=0...J\}$, $GV=OV\cup UV$ – множество вершин ультраграфа,

$GR=\{gr_k,\ k=1...K\}$ – множество ребер ультраграфа, $gr_k(Y_k)$ – k-е ребро гиперграфа, Y_k – множество вершин, инцидентных k-му ребру, $Y_k\subset GV, Y_k=\{ov_l, UV1\}, ov_l\in OV$ – вершина – элемент оборудования, $UV1\subset UV$ – множество вершин из таксономии функций и условий эксплуатации оборудования, $UV1=\{uv_c, c\in J1\subset J\}$.

Таким образом, ребро ультраграфа, представляющее собой правило (продукцию) вида «Если …, то», формально запишется как $\exists \bigcap\limits_{c\in J1\subset J} uv_c \Rightarrow ov_l$.

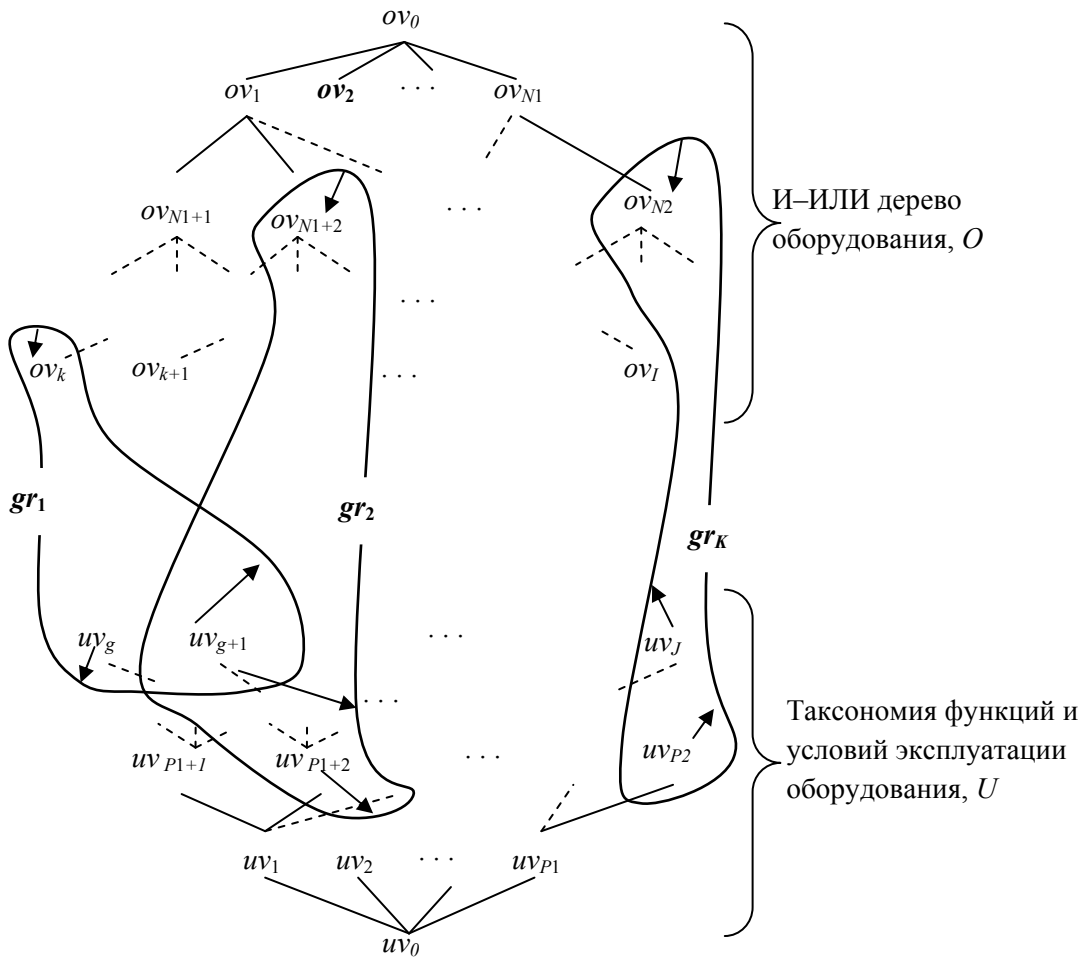


Рис. 2. Графическое представление структурного синтеза технологического оборудования

Описанные результаты используются авторами при разработке системы автоматизированного проектирования химических производств [1 – 8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/8.9*).

Список использованных источников

1. **Малыгин, Е. Н.** Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом выпускаемой продукции / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкнн // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 778 – 788.

2. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. I. Постановки задач и схема их совместного решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 3. – С. 52 – 58.

3. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. II. Условия разрешимости задач и алгоритмы их решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 4. – С. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – T. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical–engineering systems of multi–product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – T. 15, № 3. – C. 447 – 452.

6. **Мокрозуб, В. Г.** Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 252 – 254.

7. **Мокрозуб, В. Г.** Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373.

8. **Мокрозуб, В. Г.** Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области / В. Г. Мокрозуб, К. В. Немтинов, К. А. Шаронин // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2012. – № 3. – С. 11 – 20.

References

1. **Malygin, E. N.** Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnicheskih sistem s izmenyaemym assortimentom vypuskaemoj produkcii / E. N. Malygin, S. V. Karpushknn // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – T. 14, № 4. – S. 778 – 788.

2. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv. CHast' I. Postanovki zadach i skhema ih sovmestnogo resheniya / S. V .Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 3. – S. 52 – 58.

3. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv CHast' II. Usloviya razreshimosti zadach i algoritmy ih resheniya / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 4. – S. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – T. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical–engineering systems of multi–product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – T. 15, № 3. – C. 447 – 452.

6. **Mokrozub, V. G.** Postanovka zadachi razrabotki matematicheskogo i informacionnogo obespecheniya processa proektirovaniya mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv / V. G. Mokrozub, E. N. Malygin, S. V. Karpushkin // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 2. – S. 252 – 254.

7. **Mokrozub, V. G.** Sistemnyj analiz processov prinyatiya reshenij pri razrabotke tekhnologicheskogo oborudovaniya / V. G. Mokrozub, E. N. Malygin, S. V. Karpushkin // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – 2017. – T. 23, № 3. – S. 364 – 373.

8. **Mokrozub, V. G.** Programmnoe obespechenie avtomatizirovannyh sistem razmeshcheniya ob"ektov v prostranstve, invariantnoe k predmetnoj oblasti / V. G. Mokrozub, K. V. Nemtinov, K. A. SHaronin // Nauchno-tekhnicheskaya informaciya. Seriya 2: Informacionnye processy i sistemy. – 2012. – № 3. – S. 11 – 20.

УДК 004.9

Мокрозуб В. Г., Попов А. В., Калистратова И. В., Пыкин И. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ЧИСЛА И РАЗМЕРОВ АППАРАТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Mokrozub V. G., Popov A. V., Kalistratova I. V., Pykin I. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

THE USE OF GRAPHS TO REPRESENT THE PROBLEM OF CALCULATING THE NUMBER AND SIZE OF APPARATUSES FOR CHEMICAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрено представление химико-технологических систем в виде полихроматического гиперграфа. Описан пример графического представления результатов решения задачи расчета числа и размеров аппаратов химико-технологических систем.
Ключевые слова: химико-технологические системы, аппараты, расчет.

Abstract. The representation of chemical technological systems in the form of a polychromatic hypergraph is considered. An example of graphical representation of the results of solving the problem of calculating the number and size of chemical-technological systems is described.
Keywords: chemical technological systems, devices, calculation.

Химико-технологическая система (ХТС) состоит из отдельных, связанных между собой аппаратов, в которых проводятся заданные технологическим регламентом операции. При решении задачи расчета числа и размеров аппаратов известны: перечень выпускаемых продуктов; стадии, необходимые для выпуска каждого продукта; тип аппарата на каждой стадии ХТС.

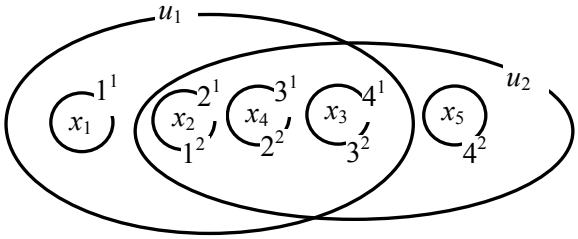
Структуру ХТС можно представить в виде ориентированного гиперграфа $G_{go}(X,U)$, где $X=\{x_i\}, i=\overline{1,I}$ – множество вершин гиперграфа (стадии процесса), x_i – i-я вершина; $U=\{u_m(Y_m)\}$, $m=\overline{1,M}$ – множество ребер гиперграфа (выпускаемые продукты), $u_m(Y_m)$ – m-е ребро гиперграфа, Y_m – множество вершин, инцидентных m-му ребру $Y_m \subseteq X$, $Y_m=\{x_k^l\}$, $k \in K_m$, $K_m \in \overline{1,I}$, l – номер вершины в ребре ориентированного гиперграфа $l=\overline{1,L_m}$. Продукты и стадии имеют свойства.

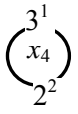
На рисунке 1 представлен пример представления в виде полихроматического ориентированного гиперграфа $G_{go}(X,U)$ ХТС, предназначенной для выпуска двух продуктов u_1 и u_2 (гиперребра), $U=\{u_1(x_1,x_2,x_4,x_3),u_2(x_1,x_2,x_4,x_5)\}$.

Для выпуска продукта u_1 используются стадии (вершины) x_1, x_2, x_3, x_4 в следующей последовательности: x_1, x_2, x_4, x_3. Для выпуска продукта u_2 – стадии (вершины) x_2, x_3, x_4, x_5 в последовательности x_2, x_4, x_3, x_5, $X=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5\}$ – множество стадий.

Ребра (продукты) имеют следующие свойства (цвета): а) наименование продукта; б) объем выпуска продукта; в) размеры партий готового продукта. Значения свойств а) и б) заданы, значение свойства в) необходимо найти.

Вершины (стадии) имеют следующие свойства: а) наименование; б) тип и наименование аппаратов; в) определяющие геометрические размеры (рабочие объемы, поверхности) аппаратов; г) число аппаратов; д) время начала и конца обработки каждой партии продукта. Значения свойств а) и б) заданы, значение свойств в), г), д) необходимо найти.





– вершина (стадия) x_4 принадлежит ребрам (продуктам) u_1 ,u_2 и ее номер в этих ребрах 3 и 2 соответственно.

Рис. 1. Пример ориентированного полихроматического гиперграфа технологической схемы для выпуска двух продуктов

На основании сказанного, задача расчета числа и размеров аппаратов для выпуска продуктов на каждой стадии заключается в нахождении значений определенных свойств ребер и вершин, а именно: размеры партий готового продукта, определяющие геометрические размеры (рабочие объемы, поверхности) аппаратов; число аппаратов; время начала и конца обработки каждой партии продукта.

Представление ХТС в виде гиперграфа, у которого ребра – продукты, а вершины стадии имеют следующие ограничения:

– в случае использования на стадии нескольких аппаратов их определяющие геометрические размеры должны быть одинаковы;

– решение задачи не подразумевает добавления в технологическую цепочку новых аппаратов, например промежуточных емкостей.

Обойти эти ограничения можно, если:

– в качестве вершин гиперграфа принимать не стадии, а аппараты;

– стадия становится не вершиной, а ребром, объединяющим несколько аппаратов;

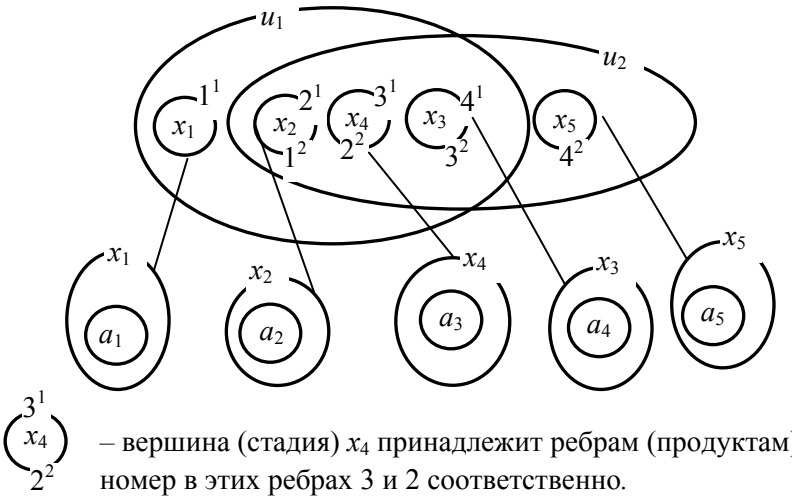
– при решении задачи могут быть добавлены новые вершины (аппараты), например промежуточные емкости;

– после или перед определенной стадией может быть несколько новых аппаратов, которые объединяются новым ребром.

На рисунках 2 и 3 представлены пример исходного гиперграфа для решения задачи расчета числа и размеров аппаратов и вариант решения.

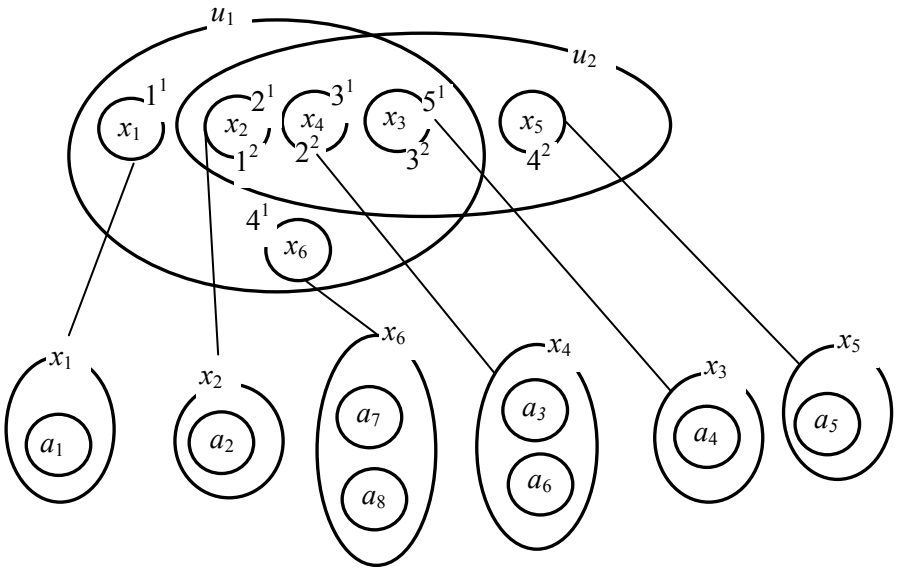
Ориентированный гиперграф $G_{go}(X,U)$, как и в предыдущем случае, задает последовательность стадий для выпуска продуктов. Гиперграф $G_g(A,X)$ описывает аппараты каждой стадии.

Как и в предыдущем случае, ребра (продукты) U имеют следующие свойства (цвета): наименование продукта; объем выпуска продукта; размеры партий готового продукта. Вершины (стадии) X – наименование стадии; число аппаратов, вершины (аппараты) A – тип аппарата; наименование аппарата; определяющие геометрические размеры (рабочие объемы, поверхности) аппаратов; время начала и конца обработки каждой партии продукта в данном аппарате.



3^1 x_4 2^2 – вершина (стадия) x_4 принадлежит ребрам (продуктам) u_1 ,u_2 и ее номер в этих ребрах 3 и 2 соответственно.

Рис. 2. Начальное состояние графов для решения задачи расчета числа и размеров аппаратов



3^1 x_4 2^2 – вершина (стадия) x_4 принадлежит ребрам (продуктам) u_1 ,u_2 и ее номер в этих ребрах 3 и 2 соответственно.

Рис. 3. Пример графического представления результатов решения задачи расчета числа и размеров аппаратов

Как видно из рис. 3 в результате решения задачи добавлена новая стадия x_6, которая включает в себя два аппарата a_7 и a_8, и в ребро x_4 добавлена новая вершина (аппарат) a_6.

Решение задачи в этом случае заключается как в нахождении свойств вершин и ребер гиперграфов, так и в изменении исходного состояния гиперграфов (добавление вершин и ребер).

Описанные результаты используются авторами при разработке системы автоматизированного проектирования химических производств [1 – 8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/8.9*).

Список использованных источников

1. **Малыгин, Е. Н.** Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом выпускаемой продукции / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкнн // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 778 – 788.

2. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. I. Постановки задач и схема их совместного решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 3. – С. 52 – 58.

3. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. II. Условия разрешимости задач и алгоритмы их решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 4. – С. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Т. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical–engineering systems of multi–product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 447 – 452.

6. **Мокрозуб, В. Г.** Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 252 – 254.

7. **Мокрозуб, В. Г.** Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373.

8. **Мокрозуб, В. Г.** Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области / В. Г. Мокрозуб, К. В. Немтинов, К. А. Шаронин // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2012. – № 3. – С. 11 – 20.

References

1. **Malygin, E. N.** Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnicheskih sistem s izmenyaemym assortimentom vypuskaemoj produkcii / E. N. Malygin, S. V. Karpushknn // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – T. 14, № 4. – S. 778 – 788.

2. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv. CHast' I. Postanovki zadach i skhema ih sovmestnogo resheniya / S. V .Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 3. – S. 52 – 58.

3. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv CHast' II. Usloviya razreshimosti zadach i algoritmy ih resheniya / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 4. – S. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – T. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical–engineering systems of multi–product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – T. 15, № 3. – C. 447 – 452.

6. **Mokrozub, V. G.** Postanovka zadachi razrabotki matematicheskogo i informacionnogo obespecheniya processa proektirovaniya mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv / V. G. Mokrozub, E. N. Malygin, S. V. Karpushkin // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 2. – S. 252 – 254.

7. **Mokrozub, V. G.** Sistemnyj analiz processov prinyatiya reshenij pri razrabotke tekhnologicheskogo oborudovaniya / V. G. Mokrozub, E. N. Malygin, S. V. Karpushkin // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – 2017. – T. 23, № 3. – S. 364 – 373.

8. **Mokrozub, V. G.** Programmnoe obespechenie avtomatizirovannyh sistem razmeshcheniya ob"ektov v prostranstve, invariantnoe k predmetnoj oblasti / V. G. Mokrozub, K. V. Nemtinov, K. A. SHaronin // Nauchno-tekhnicheskaya informaciya. Seriya 2: Informacionnye processy i sistemy. – 2012. – № 3. – S. 11 – 20.

УДК 004.383

Шуваева А. М.[1], Яковлев А. В.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. 89537142264, e-mail: anastasi93_007@mail.ru),
[2](Тел. 89108552341, e-mail: yava73@bk.ru)

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАНДАТНОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА НА ОСНОВЕ RFID-ТЕХНОЛОГИИ

Shuvaeva A. M.[1], Yakovlev A. V. [2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Тел. 89537142264, e-mail: anastasi93_007@mail.ru),
[2](Тел. 89108552341, e-mail: yava73@bk.ru)

HARDWARE IMPLEMENTATION OF MANDATORY ACCESS CONTROL USING RFID TECHNOLOGY

Аннотация. Системы контроля доступа признаны одним из наиболее эффективных методов решения задач комплексной безопасности для объектов. СКУД упрощает процесс идентификации, экономит время и повышает эффективность работы служб безопасности предприятия, но все равно не может обходиться без контроля со стороны человека. Установка системы контроля доступа позволит не только поднять уровень общей безопасности, но и сократить издержки затрат на ее обеспечение, поскольку СКУД не требуют большого количества персонала для обслуживания и экономичны в потреблении электроэнергии.

Ключевые слова: СКУД, мандатное разграничение доступа, ArduinoUno, кодовое разделение каналов, функция Уолша.

Abstract. Access control systems are recognized as one of the most effective methods for solving complex security tasks for objects. The ACS simplifies the identification process, saves time and increases the efficiency of the enterprise security services, but can not do without human control. The installation of an access control system will allow not only to raise the level of general security, but also to reduce the costs of its maintenance, since the ACS does not require a large number of personnel for maintenance and is economical in electricity consumption.

Keywords: control and access control, mandatory access control, ArduinoUno, code division channels, the Walsh function.

В системах управления доступом чаще всего используются простейшие варианты, представляющие собой бинарное событие: осуществление или отклонение доступа. В таких системах реализовать мандатную политику разграничения доступа практически невозможно. В связи с этим при использовании концепции единого входа в систему актуальной является задача объединения функций СКУД и подсистемы разграничения доступа на основе реализации мандатной политики безопасности [1, 2].

Для повышения надежности СКУД можно использовать ее в совокупности с определенной политикой безопасности.

Политика безопасности – совокупность норм и правил, регламентирующих процесс обработки информации, обеспечивающих эффективную защиту системы обработки

информации от заданного множества угроз. Политика безопасности составляет необходимое, а иногда и достаточное условие безопасности системы. Формальное выражение политики безопасности называется моделью безопасности [4].

Поскольку мандатная политика безопасности является более надежной с точки зрения конфиденциальности информации, а также имеет хороший потенциал для масштабирования системы, на ее основе и будет производиться реализация системы контроля и управления доступом. Рассмотрим подробнее один из вариантов реализации СКУД.

Карта, в которой содержится информация об уровне доступа, содержит одну антенну и чип, который и реализует технологию кодового разделения каналов CDMA. Структура карты представлена на рис. 1.

На карту с RFID-меткой будет заноситься информация о пользователе (например, фамилия, имя, отчество и персональный идентификатор), его аутентификационные данные и метка доступа субъекта. Структура карты представлена на рис. 2.

Доступ к объектам системы будет предоставляться исходя из следующих правил:

– если в контроллер поступила информация со всех трех выходов карты, то предоставляется полный доступ к системе;

– если контроллер считал информацию с любых двух выходов карты, то предоставляется ограниченный доступ;

– если контроллер считал информацию с одного любого выхода карты, то предоставляется минимальный доступ;

– если контроллер не смог считать информацию ни с одного выхода карты, то пользователь не получает доступа в систему.

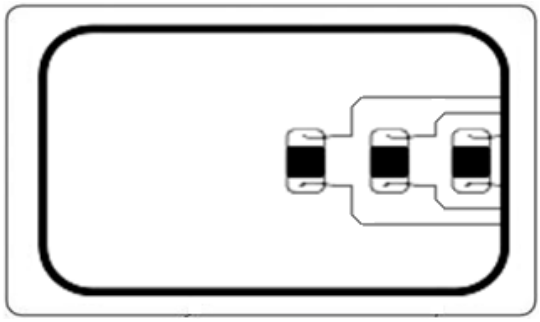


Рис. 1. RFID-карта

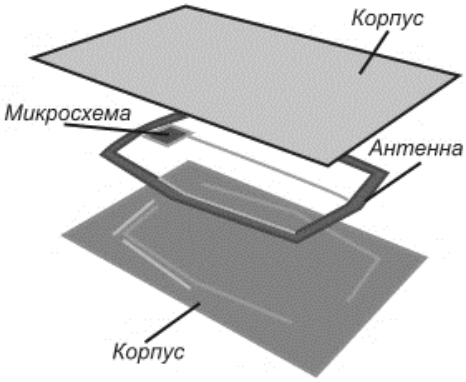


Рис. 2. Структура RFID-карты

На основе CDMA можно синтезировать устройство доступа к информационной системе с использованием трехуровневой шкалы меток безопасности и основанное на кодовых комбинациях. Рассмотрим его подробнее.

На карте владельца записана информация о его идентификаторе и смещении. Сама карта содержит 1 антенну и 3 чипа (микросхемы), которые преобразуют идентификатор в код соответствующей разрядности, а затем вычисляют значение хеш-функции. Затем считанная информация поступает в блок принятия решений, где полученная хеш-функция сравнивается с эталонным значением, а затем передается на декодер последовательности, основанный на функции Уолша. Полученная уникальная кодовая комбинация поступает на вход элемента управления доступом, где выделяется соответствующая метка безопасности в зависимости от принятых кодов (рис. 3).

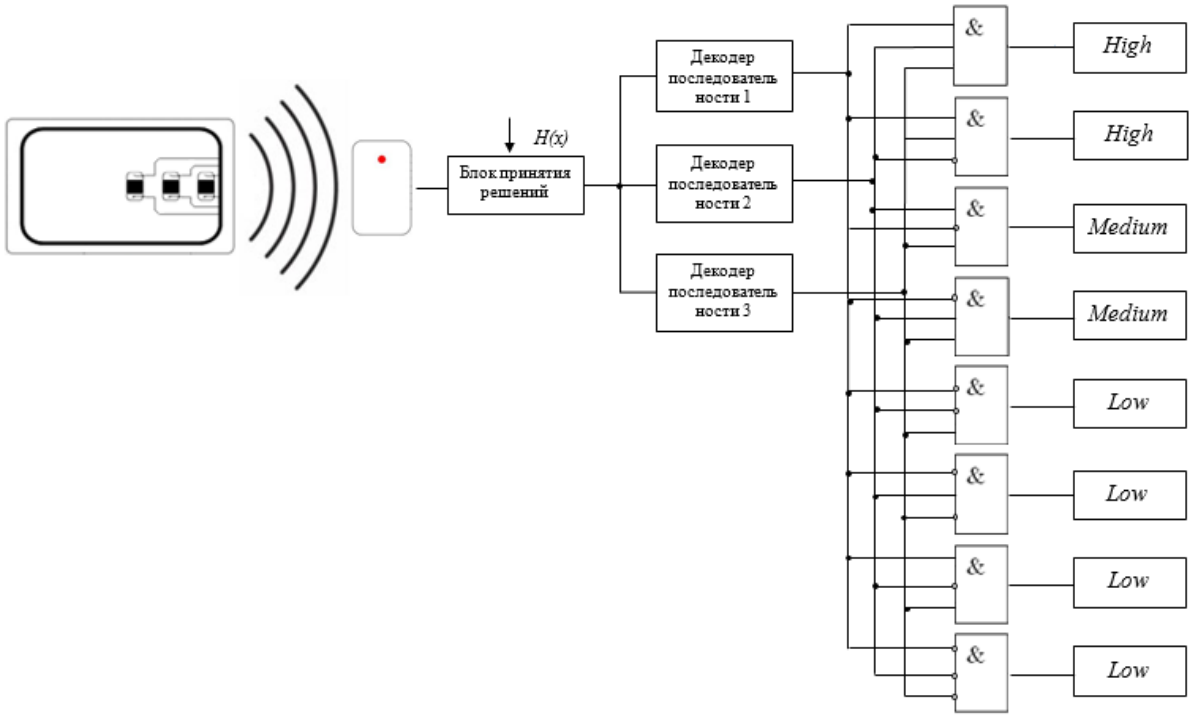


Рис. 3. Схема контроля доступа на основе CDMA

Для организации кодового разделения каналов необходимо использовать систему ортогональных функций, в качестве которых в работе будет использоваться функция Уолша, поскольку они являются наиболее простыми в реализации.

Перейдем к рассмотрению реализации СКУД на основе платы Arduino Uno.

Помимо самой платы Arduino, для реализации системы требуются следующие элементы:

– RFID-считыватель RC522 (для считывания информации с карты и передачи ее в контроллер);

– RFID-метки (брелок и карта, служащие персональными идентификаторами);

– сервопривод (аналог замка);

– RGB-светодиод (для цветового отображения результата сравнения полученной информации с карты с эталонной).

Получившаяся схема представлена на рис. 4.

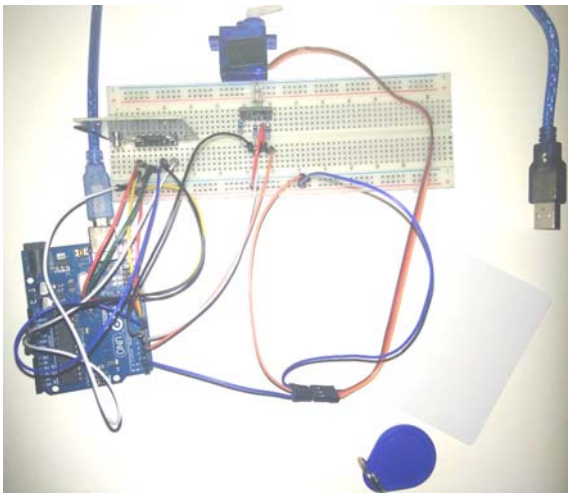


Рис. 4. Собранная модель СКУД на основе Arduino

Для реализации СКУД необходимы следующие компоненты:

– модуль шифрования (обеспечивает шифрование и дешифрование данных);

– модуль инициализации контроллера (реализует функции запуска модулей идентификации пользователей СКУД и управления исполнительным устройством);

– модуль идентификации пользователей СКУД (получает и декодирует сигнал со считывающего устройства, преобразуя его в идентификационный номер пользователя СКУД);

– модуль управления исполнительным устройством (получает управляющий или блокирующий сигналы, обеспечивающие срабатывание или блокировку работы исполнительного устройства);

– коммуникационный модуль (обеспечивает преобразование индентификационной информации для передачи ее по локальной сети).

Базовой информационной структурой, необходимой для функционирования перечисленных выше модулей, является база данных СКУД (информация о соответствии уникального идентификатора пользователя СКУД и возможности его прохождения через заградительное устройство, оборудованное данным контроллером). Схема контроллера СКУД на основе платформы Arduino представлена на рис. 5.

При разработке программного кода в качестве цветового разделения светодиодом меток секретности выбрано следующее: отсутствие цвета соответствует отсутствию доступа, красный цвет соответствует низшему уровню доступа, зеленый – среднему, синий – высшему (рис. 6 – 8).

Эффективность использования любых технических средств СКУД зависит от применяемой технологии контроля доступа и квалификации оперативно-технического персонала [4, 5].

Основные условия:

– совместимость СКУД со всеми типами физических исполнительных устройств (ограждения, ворота, турникеты);

– совместимость с техническими системами обнаружения и пожарной сигнализации, управления основным и резервным освещением, средствами связи и тревожной сигнализации, системами видеоконтроля;

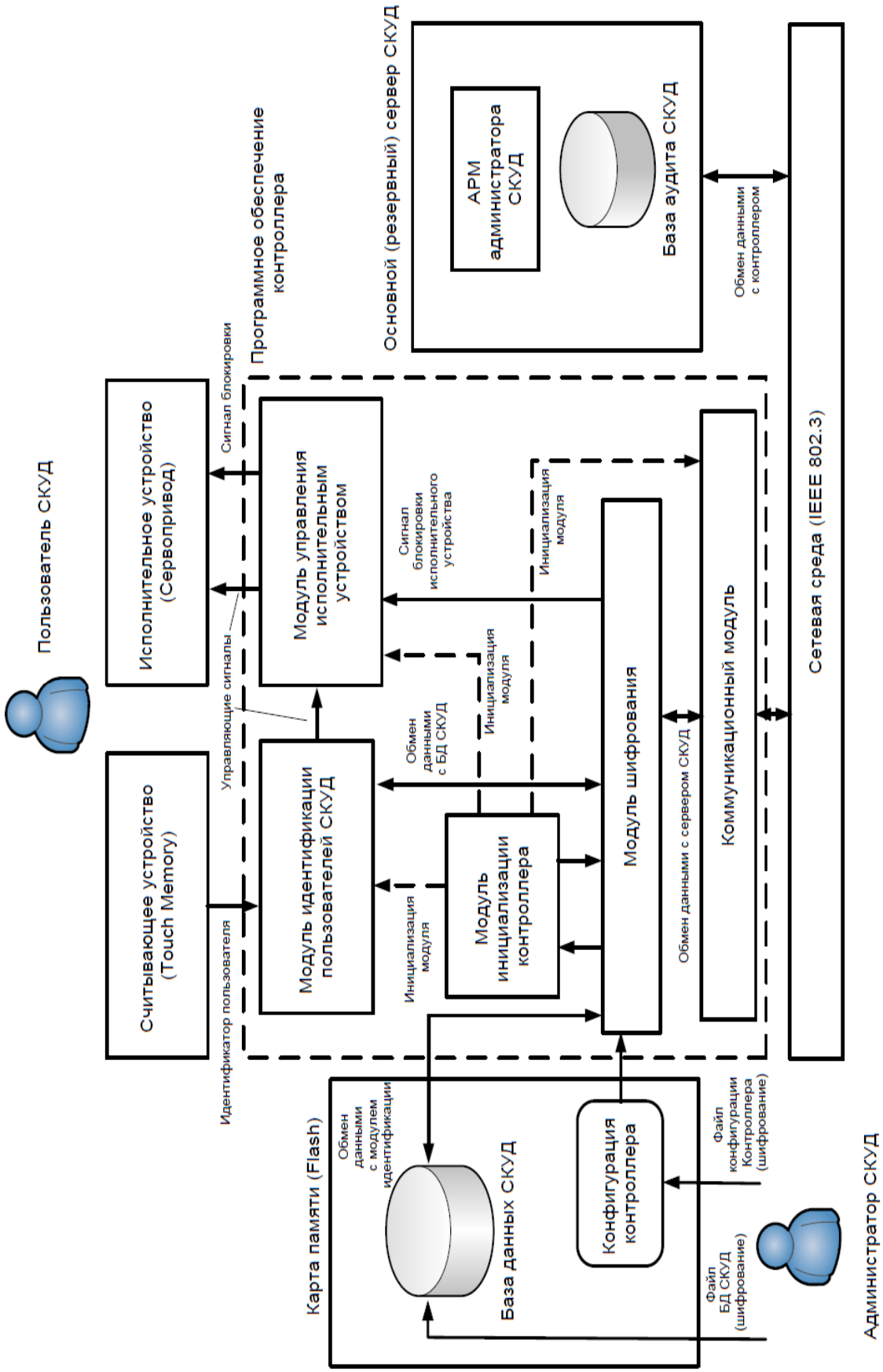


Рис. 5. Схема контроллера СКУД на основе платформы Arduino

– число точек прохода СКУД должно соответствовать необходимому для конкретной организации, учитывая перспективы развития;

– сложность СКУД должна соответствовать размерам предприятия и потокам служащих;

– автономные контроллеры должны быть рассчитаны на применение различных типов считывателей;

– должна быть предусмотрена реализация дополнительных возможностей, связанных с кадровым учетом на предприятии;

– возможность простого расширения системы и перевода оборудования в сетевой режим.

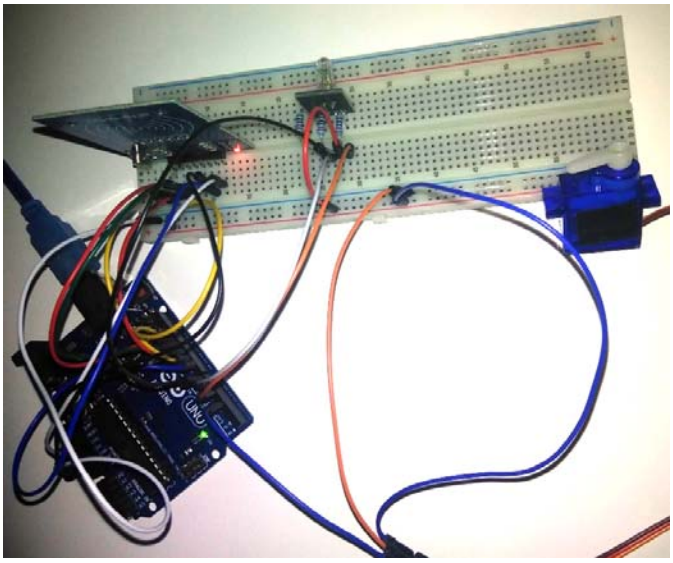


Рис. 6. Ожидание RFID-метки

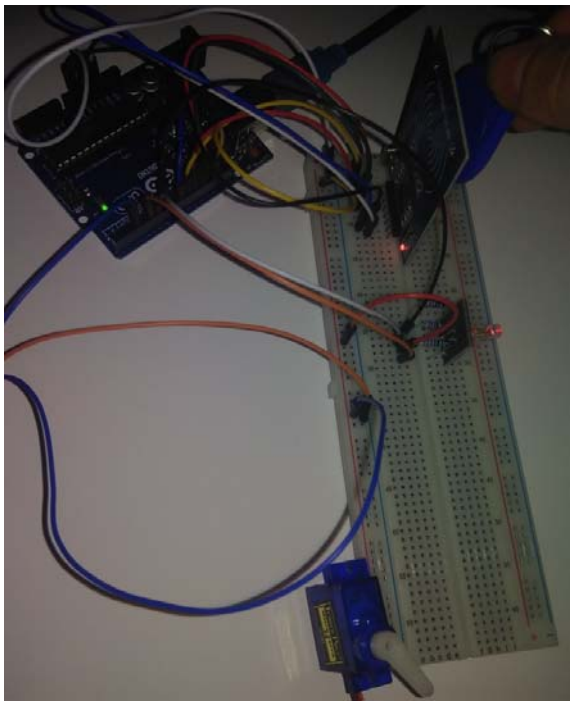


Рис. 7. Низший уровень доступа

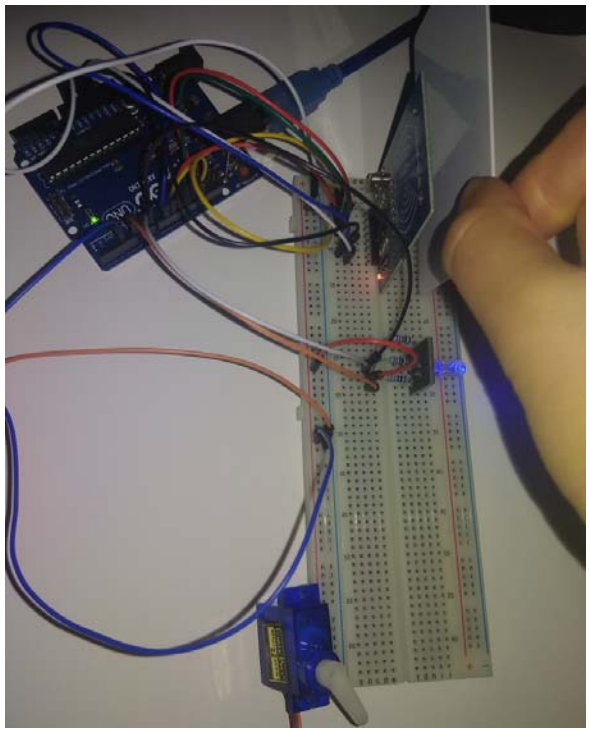


Рис. 8. Высший уровень доступа

Список использованных источников

1. **Гинце, А. А.** Новые технологии в СКУД / А. А. Гинце, А. А. Цветаев. – М. : Инфо, 2013. – 398 с.

2. **Барсуков, В. С.** Современные технологии безопасности / В. С. Барсуков, В. В. Водолазский. – М. : Нолидж, 2000. – 496 с.

3. **Об информации**, информационных технологиях и о защите информации : федер. закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ [Электронный ресурс]. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_-LAW_61798/

4. **Рыкунов, В. В.** Охранные системы и технические средства физической защиты объектов / В. В. Рыкунов. – М. : Фокус, 2011. – 288 с.

5. **Ястребов, И. О.** Контроль доступа для распределенных систем управления / И. О. Ястребов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 122 с.

References

1. **Ginze, A.** New Technologies in Access Control Systems / A. Ginze, A. Tsvetaev. – M. : Info, 2013. – 398 p.

2. **Barsukov, V.** Modern Security Technologies / V. Barsukov, V. Vodolazsky. – M. : Nolidge, 2000. – 496 p.

3. **Federal** Law «On Information, Information Technologies and Information Protection» of 27.07.2006 № 149-FZ [Electronic resource]. – Access mode : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_-LAW_61798/

4. **Rykunov, V.** Security systems and technical means of physical protection of objects / V. Rykunov. – M. : Focus, 2011. – 288 p.

5. **Yastrebov, I.** Access control for distributed control systems / I. Yastrebov. – M. : Hotline – Telecom, 2012. – 122 p.

УДК 547.391.2:678.744.422

Арапов Д. В.[1], Тихомиров С. Г.[2], Подвальный С. Л.[3], Денисенко В. В.[4], Авцинов И. А.[5]
[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7(908)143-65-13, e-mail: arapovdv@ gmail.com),
[2]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7(908)555-55-54, e-mail: tikhomirov_57@mail.ru),
[3]Воронежский государственный технический университет, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7(910)349-71-70, e-mail: spodvalny@yandex.ru),
[4]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7(906)677-73-99, e-mail: v.denisenko1@gmail.com),
[5]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, г. Воронеж
(Тел. +7(951)562-85-12, e-mail: igor.awtzinov@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ВИНИЛАЦЕТАТА НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНА

Arapov D. V.[1], Tikhomirov S. G.[2], Podvalny S.L.[3], Denisenko V. V.[4], Avtsinov I. A.[5]
[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(Tel. +7(908)143-65-13, e-mail: arapovdv@ gmail.com),
[2]Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(Tel. +7(908)555-55-54, e-mail: tikhomirov_57@mail.ru),
[3] Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh
(Tel. +7(910)349-71-70, e-mail: spodvalny@yandex.ru),
[4]Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(Tel. +7(906)677-73-99, e-mail: v.denisenko1@gmail.com),
[5]Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh
(Tel. +7(951)562-85-12, e-mail: igor.awtzinov@yandex.ru)

MODELING OF CATALYTIC SYNTHESIS OF VINYL ACETATE ON THE BASIS OF ETHYLENE

Аннотация. Описана математическая модель нестационарного каталитического процесса ацетоксилирования этилена для получения мономера винилацетата, представленная системой дифференциальных уравнений материального и энергетического баланса, дополненной уравнением изменения во времени показателя активности каталитической системы. Для интегрирования уравнений выбран метод прямоугольников Грэгга–Булирша–Штера второго порядка аппроксимации, обладающий сильной устойчивостью и обеспечивающий точность до 3–4 значащих цифр при достаточно большом шаге интегрирования. Построены 3D-поверхности зависимости скорости образования винилацетата и селективности катализатора от технологических параметров процесса. Модель предназначена для имитации каталитического процесса ацетоксилирования этилена и управления процессом.

Ключевые слова: математическая модель, синтез, винилацетат, этилен.

Abstract. A mathematical model of the non-stationary catalytic process of acetyloxylation of ethylene for the preparation of a vinyl acetate monomer is presented. It is represented by a system of differential equations of material and energy balance supplemented by the time evolution equation of the catalytic system activity index. To integrate the equations, the Gregg-Bulirsch-Stahr rectangle method of the second order approximation is chosen, possessing strong stability and providing accuracy to 3-4 significant digits for a sufficiently large integration step. 3D surfaces are constructed for the dependence of the rate of vinyl acetate formation and the selectivity of the catalyst on the technological parameters of the process. The model is designed to simulate the catalytic process of ethylene acetylation and process control.

Keywords: mathematical model, synthesis, vinyl acetate, ethylene.

Винилацетат (ВА) является важным сырьем для нефтехимического синтеза, на его основе получают поливинилацетат, поливиниловый спирт, поливинилбутираль, сополимеры с этиленом и пропиленом. Химизм процесса аппроксимируется брутто-реакциями образования целевого и побочного – диоксида углерода (ДУ) продуктов:

$$C_2H_4 + \frac{1}{2}O_2 + CH_3COOH \xrightarrow{W_1} CH_3 - COO - CH = CH_2 + H_2O + 146 \text{ кДж}; \quad (1)$$

$$C_2H_4 + 3O_2 \xrightarrow{W_2} 2CO_2 + 2H_2O + 1327.2 \text{ кДж}. \quad (2)$$

Со временем каталитический комплекс претерпевает структурные изменения, стареет, его каталитическая активность снижается, и выход ВА падает. Для поддержания постоянной активности катализатора процесс синтеза ВА реализуют с медленным подъемом температуры в течение 1 года от 140 до 200 °С.

Важнейшими показателями синтеза ВА являются [1] конверсии кислорода на образование ВА и ДУ, селективность катализатора по этилену, съем ВА, выражающийся в его количестве в граммах, получаемом с 1 л загруженного в реактор катализатора за 1 ч. Автоматический контроль и оптимизация этих характеристик невозможна без разработки математического описания синтеза ВА, включающего уравнения кинетики процесса, алгоритмы решения этих уравнений и их программную реализацию. В этой связи данная работа, посвященная решению этой проблемы, актуальна.

В патенте [1] принято, что реакции (1) и (2) имеют соответственно 1-й и 2-й порядки. Скорости этих реакций описываются уравнениями:

$$W_1 = k_1 P_{O_2} Q; \quad W_2 = k_2 P_{O_2}^2 Q; \quad P_{O_2} = n_{o_2} P, \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – аррениусовские константы скоростей реакций образования ВА и ДУ; P_{O_2} – парциальное давление кислорода; n_{o_2} – мольная доля кислорода; P – давление в реакторе; Q – показатель активности каталитического комплекса. Выразим величину n_{o_2} через конверсии кислорода на образование ВА и ДУ и мольные отношения этилена и УК к кислороду на входе в реактор. Конверсии кислорода на образование ВА и ДУ соответственно равны:

$$X_1 = N_{O_2}^{VA} / N_{O_2}^0; \quad X_2 = N_{O_2}^{CD} / N_{O_2}^0, \quad (4)$$

где X_1, X_2 – конверсии кислорода; $N_{O_2}^0$ – количество молей кислорода на входе в реактор; $N_{O_2}^{VA}$, $N_{O_2}^{CD}$ – количество молей кислорода, ушедших на образование ВА и ДУ соответственно. Мольные отношения этилена (α_1) и УК (α_2) к кислороду на входе в реактор рассчитываются по формулам:

$$\alpha_1 = N_{Eth}^0 / N_{O_2}^0; \quad \alpha_2 = N_{AA}^0 / N_{O_2}^0, \tag{5}$$

где N_{Eth}^0, N_{AA}^0 – количество молей этилена и УК на входе в реактор.

Пользуясь стехиометрическими уравнениями (1) и (2), рассчитаем мольные расходы участников реакций в момент времени *t*:

$$\begin{gathered} .N_{O_2}(t) = N_{O_2}^0 - (X_1 + X_2) N_{O_2}^0; \quad .N_{VA}(t) = 2X_1 N_{O_2}^0; \qquad .N_{AA}(t) = \alpha_2 N_{O_2}^0 - 2X_1 N_{O_2}^0; \\ .N_{Eth}(t) = \alpha_1 N_{O_2}^0 - \frac{1}{3} X_2 N_{O_2}^0 - 2X_1 N_{O_2}^0; \; .N_{CD}(t) = \frac{2}{3} X_2 N_{O_2}^0; \; .N_{H_2O}^0(t) = \left(\frac{2}{3} X_2 + 2X_1\right) N_{O_2}^0 \end{gathered} \tag{6}$$

Сложим левые и правые части уравнений (6) и получим:

$$.\sum N(t) = (1 + \alpha_1 + \alpha_2 - X_1) N_{O_2}^0. \tag{7}$$

Тогда n_{O_2} равна

$$n_{O_2} = .N_{O_2}(t) / .\sum N(t) = (1 - X_1 - X_2) / (1 + \alpha_1 + \alpha_2 - X_1). \tag{8}$$

При допущении постоянства мольного расхода и давления по длине реактора l:

$V(l) = V^0 = const$; $P(l) = P = const$, имеют место уравнения материального баланса для элементарного объема реактора с внутренним сечением трубки *S*, равного $dv = Sdl$:

$dN_{02}^{VA} = \frac{1}{2} W_1 dv$; $dN_{02}^{CD} = \frac{3}{2} W_2 dv$ или с учетом уравнений (6) и (8):

$$V_0 C_{O_2}^0 dX_1 = \frac{1}{2} W_1 Sdl; \quad V_0 C_{O_2}^0 dX_2 = \frac{3}{2} W_2 Sdl,$$

где $C_{O_2}^0$ – начальная концентрация кислорода, моль/моль.

Обозначив

$$A = \frac{S}{V^0 C_{02}^0} = \frac{\pi d_0^2}{4 V_0 C_{O_2}^0},$$

где d_0 – внутреннее сечение трубки реактора, получим систему кинетических уравнений синтеза ВА:

$$\frac{\partial X_1}{\partial l} = 0.5 \cdot A \cdot n_{O_2} \cdot k_1 \cdot Q, \quad l = [0, L], \tag{9}$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial l} = 1.5 \cdot A \cdot n_{O_2}^2 \cdot p^2 \cdot k_2 \cdot Q, \tag{10}$$

где L – длина трубки реактора, заполненной катализатором.

Дополним (9) и (10) уравнениями теплообмена и динамики старения катализатора:

$$\frac{\partial T}{\partial l}=\frac{S}{V_0C_p}\left(\left(\Delta H_1W_1+\Delta H_2W_2\right)-\frac{M\pi d_s k_T}{S\cdot 3600}\left(T-T_{cool}\right)\right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau}=-Q^{1,755}\cdot k_3\left(T\right);\tau\in\left[\tau_0,\tau_f\right], \quad (12)$$

ΔH_1, ΔH_2 – тепловые эффекты реакций образования ВА и ДУ; C_p – теплоемкость парогазовой смеси на входе в реактор; M – число трубок в реакторе; d_s – средний диаметр реакционной трубки: $d_s=0.5\left(d_0+d_1\right)$; d_1 – внешний диаметр трубки; k_T – коэффициент теплопередачи; T_{cool} – абсолютная температура хладагента находится из решения уравнения

$$P_{cool}=22.064\exp\left(\left(-7.858\xi+1.84\xi^{1.5}-11.78\xi^3+22.64\xi^{3.5}-15.939\xi^4+1.775\xi^{7.5}\right)/\tau_{cool}\right), \quad (13)$$

где P_{cool} – абсолютное давление насыщенного водяного пара, мПа; $\xi=1-\tau_{cool}$; τ_{cool} – приведенная температура $\tau_{cool}=T_{cool}/647.14$. Уравнение (13) действительно для диапазона температур насыщенного водяного пара 100…300 °С и степени его сухости 0,7…1,0.

В уравнениях (9), (10), (12) константы скоростей реакций равны:

$$k_j\left(T\right)=\exp\left(A_j-E_j/T\right),\ j=\overline{1,3},$$

где A_j – предэкспоненциальный множитель *j*-й реакции; E_j – энергия активации.

Начальные и граничные условия:

$$X_1\left(0,\tau\right)=X_2\left(0,\tau\right)=0;\ T\left(0,\tau\right)=T_0\left(\tau\right);$$

$$Q\left(l,\tau_0\right)=Q_0\left(l\right).$$

Уравнение (12) интегрируется аналитически:

$$Q\left(l,\tau\right)=\left(Q_0^{-0.755}+0.755\int_{\tau_0}^{\tau}k_3\left(T\right)d\tau\right)^{-1.3245}. \quad (14)$$

В общем виде с учетом (14) уравнения реактора записываются следующим образом:

$$\frac{dY}{dl}=f\left\{Y,Q\left[\int_{\tau_0}^{\tau}k_3\left(T\right)d\tau\right]\right\},\ \text{где}\ Y=\begin{pmatrix}y_1\\y_2\\y_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}X_1\\X_2\\T\end{pmatrix}. \quad (15)$$

Для интегрирования уравнений (14) и (15) выбран метод прямоугольников Грэгга–Булирша–Штера [2] 2-го порядка аппроксимации. Применительно к интегралу (14) метод прямоугольников имеет вид

$$Q(l,\tau_{m+1}) \approx Q^{m+1} = Q\left[S^m(l) + h_\tau K_3\left(\frac{T^m + T^{m+1}}{2}\right)\right],$$

$$\int_{\tau_0}^{\tau} K_3(T)dt \approx S^m(l) = S^{m-1}(l) + h_\tau K_3(\frac{T^m + T^{m-1}}{2}); \qquad S^0 = 0.$$

Для выражения (15) разностная схема запишется следующим образом:

$$Y_{n+1}^{m+1} - Y_n^{m+1} = hf\left\{\frac{Y_n^{m+1} + Y_{n+1}^{m+1}}{2}, Q[S^m(l_n + \frac{1}{2}) + h_\tau K_3\left(\frac{T^m(l_n + \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}(T_{n+1}^{m+1} + T_n^{m+1})}{2}\right),\right.$$

$$l_n + \frac{1}{2} = l_n + \frac{h}{2}$$

или допуская линейную интерполяцию для S^m, T^m:

$$Y_{n+1}^{m+1} - Y_n^{m+1} = hf\left\{\frac{Y_n^{m+1} + Y_{n+1}^{m+1}}{2}, Q\left[\frac{S_n^m + S_{n+1}^m}{2} + h_\tau K_3\left(\frac{T_n^m + T_{n+1}^m + T_n^{m+1} + T_{n+1}^{m+1})}{4}\right)\right]\right\}, \qquad (16)$$

здесь $Y_n^m = Y(l_n, \tau_m)$.

Реализация неявной разностной схемы (16) применительно к уравнениям (9) – (11), (14) осуществляется посредством сведения системы 3-х нелинейных уравнений (16) к одному уравнению относительно T_{n+1}^{m+1}. Для этого запишем уравнение (11) в виде

$$\frac{dT}{dl} = \frac{1}{V_0 C_p}\left\{\frac{2S}{A}\left[H_1\frac{dX_1}{dl} + \frac{H_2}{3} - \frac{dX_2}{dl}\right] - b\left[T - T_x\right],\right. \qquad (17)$$

где $b = M\pi \cdot d_s \cdot K_T / 3600$. Разностная схема (16) для уравнений (9), (10), (17) имеет вид (временные индексы m при Y и Q для краткости опускаем)

$$Y_{1,n+1} - Y_{1,n} = 0,5 \cdot h \cdot A \cdot P \cdot K_1\left(\frac{Y_{3,n+1} + Y_{3,n}}{2}\right)\left(\frac{2 - Y_{1,n+1} - Y_{2,n+1} - Y_{1,n} - Y_{2,n}}{2 + 2(\alpha_1 + \alpha_2) - Y_{1,n+1} - Y_{1,n}}\right) \cdot Q; \qquad (18)$$

$$Y_{2,n+1} - Y_{2,n} = 1,5 \cdot h \cdot A \cdot P^2 \cdot K_2\left(\frac{Y_{3,n+1} + Y_{3,n}}{2}\right)\left(\frac{2 - Y_{1,n+1} - Y_{2,n+1} - Y_{1,n} - Y_{2,n}}{2 + 2(\alpha_1 + \alpha_2) - Y_{1,n+1} - Y_{1,n}}\right)^2 \cdot Q; \qquad (19)$$

$$Y_{3,n+1} - Y_{3,n} = \frac{h}{V_0 C_p}\left\{\frac{2S}{hA}\left[\Delta H_1\left(Y_{1,n+1} - Y_{1,n}\right) + \frac{\Delta H_2}{3}\left(Y_{2,n+1} - Y_{2,n}\right)\right] - b\left(\frac{Y_{3,n+1} + Y_{3,n}}{2} - T_x\right)\right\}. \qquad (20)$$

Возведя выражение (18) в квадрат и разделив (19) на полученное равенство, имеем

$$\frac{Y_{2,n+1} - Y_{2,n}}{(Y_{1,n+1} - Y_{1,n})^2} = \frac{6K_2}{hAK_1^2 Q}. \qquad (21)$$

Обозначив разность $(Y_{1,n+1} - Y_{1,n}) = Z$, из выражения (21) получим

$$Y_{2,n+1} - Y_{2,n} = \frac{6K_2}{hAK_1^2Q} \cdot Z^2 . \tag{22}$$

Подставив выражение (22) в (18), получим квадратное уравнение относительно Z:

$$2Z\left[2 + 2(\alpha_1 + \alpha_2) - Z - 2Y_{1,n}\right] = hAPK_1Q\left[2 - Z - \frac{6K_2}{hAK_1^2Q}Z^2 - 2(Y_{1,n} + Y_{2,n})\right] \tag{23}$$

или

$$AQ \cdot Z^2 + BQ \cdot Z - CQ = 0 , \tag{24}$$

где $AQ = 6P \cdot \frac{K_2}{K_1} - 2;\ BQ = 4 \cdot Y_A + h \cdot A \cdot P \cdot K_1 \cdot Q;$ $CQ = 2 \cdot h \cdot A \cdot P \cdot K_1 \cdot Q \cdot Y_1$, где $Y_A = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 - Y_{1,n};$ $Y_1 = 1 - Y_{1,n} - Y_{2,n}$. Решая выражение (24), отбросив наименьший (отрицательный) корень и освободившись от иррациональности в числителе, получим

$$Z = 2CQ / (BQ + \sqrt{BQ^2 + 4AQ \cdot CQ} . \tag{25}$$

Коэффициенты выражения (25) зависят только от $Y_{3,n+1} = T_{n+1}$. Таким образом, подставив выражения (22) и (25) в выражение (20) получим одно уравнение с одним неизвестным T_{n+1}: $V_0C_P(T_{n+1} - T_n) = \frac{2S}{A}\left[\Delta H_1 Z + \frac{2\Delta H_2 K_2}{hAK_1^2Q}Z^2\right] - hb\left(\frac{T_{n+1} - T_n}{2} - T_{cool}\right)$, которое для метода простых итераций удобнее преобразовать к виду

$$T_{n+1} = \left(A_1 \frac{K_2}{K_1^2 \cdot Q}Z^2 + B_1 \cdot Z + C_1\right) / D_1,$$

где $A_1 = \frac{4S\Delta H_2}{hA^2};$ $B_1 = \frac{2S\Delta H_1}{A};$ $C_1 = V_0C_pY_{3,n} + hb\left(T_{cool} - \frac{T_n}{2}\right);$ $D_1 = V_0C_p + \frac{hb}{2}$. Таким образом, итерации проводятся по формуле

$$T_{n+1}^{i+1} = \frac{\left[A_1 \frac{K_2(T^i)}{K_1^2(T^i)}Z^2(T^i) + B_1 \cdot Z(T^i) + C_1\right]}{D_1},\ i = \overline{1,2} . \tag{26}$$

В качестве нулевого приближения принимаются значения на предыдущем шаге интегрирования или результаты квадратичной экстраполяции:

$$T_{n+1}^0 = \begin{cases} T_n, & \text{при } n = 0,1 \\ 3(T_n - T_{n-1}) + T_{n-2}, & \text{при } n > 2 \end{cases} . \tag{27}$$

Результаты численного эксперимента в области изменения режимных параметров процесса показали достаточность двух итераций для достижения точности до 4-значащих цифр при выборе начального приближения по формулам (27) и приемлемом

шаге интегрирования. Моделирующая программа разработана на языке программирования C# в среде Visual Studio 2010 и позволяет рассчитывать динамику изменения съема винилацетата и селективности процесса от времени работы катализатора и температуры реакции. На рисунке 1 показаны 3D-поверхности зависимости скорости образования винилацетата и селективности катализатора от технологических параметров процесса.

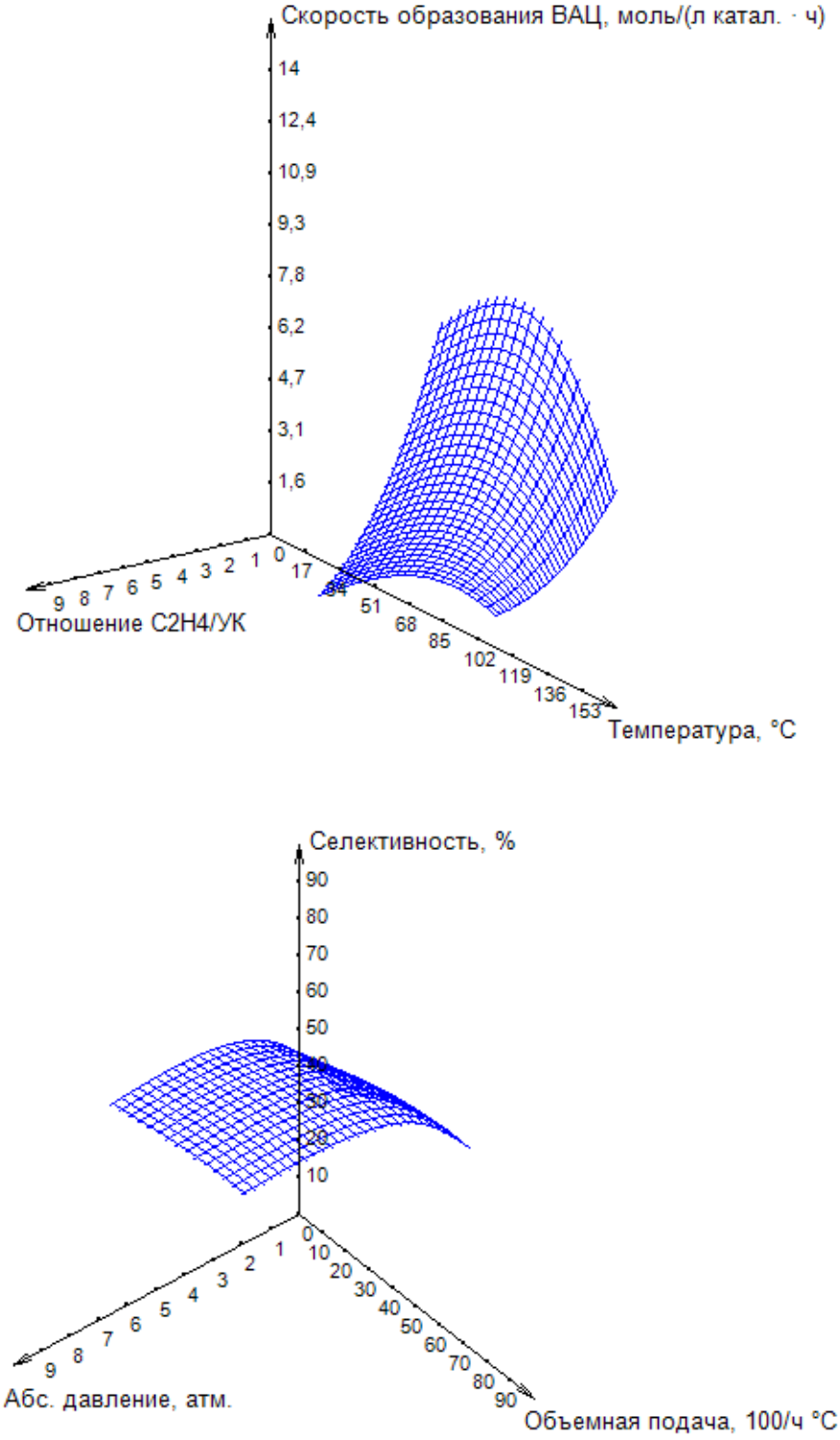


Рис. 1. Зависимость скорости образования ВА от соотношения этилен / УК и температуры и селективности от давления и объемной подачи парогазовой смеси

Список использованных источников

1. **Пат.** 2184725 Российская Федерация, МПК7 C 07 C 69/15, G 05 D 27/00, B 01 J 19/00. Способ автоматического контроля и управления процессом получения винилацетата на основе этилена [Текст] / Петров С. М., Курицын В. А., Хромых Е. А., Арапов Д. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ Воронежская государственная технологическая академия. – № 2001128929/12 ; заявл. 26.10.2001 ; опубл. 10.07.2002, Бюл. № 19. –14 с.

2. **Современные** численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла и Дж. Уатта. – М. : Мир, 1979. – 312 с.

References

1. **Pat.** 2184725 Rossijskaya Federaciya, MPK7 S 07 S 69/15, G 05 D 27/00, B 01 J 19/00. Sposob avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya processom polucheniya vinilacetata na osnove etilena [Tekst] / Petrov S. M., Kuricyn V. A., Hromyh E. A., Arapov D. V. ; zayavitel' i patentoobladatel' GOU Voronezhskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya. – № 2001128929/12 ; zayavl. 26.10.2001 ; opubl. 10.07.2002, Byul. № 19. – 14 s.

2. **Modern** numerical methods for solving ordinary differential equations / Under. Ed. J. Hall and J. Watt. – M. : Mir, 1979. – 312 p.

УДК 004.9

Мокрозуб В. Г., Попов А. В.,
Мокрозуб В. А., Пыкин И. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВИДЕ ГРАФОВ

Mokrozub V. G., Popov A. V.,
Mokrozub V. A., Pykin I. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

PRESENTATION OF THE EQUIPMENT PLACEMENT AND TRACING OF PIPELINES OF CHEMICAL ENGINEERING SYSTEMS IN A GRAPH

Аннотация. Разработаны графовые структуры для представления задачи размещения оборудования и трассировки трубопроводов химико-технологических систем. Представлено математическое описание разработанных графов.

Ключевые слова: химико-технологическая система, размещение оборудования, трассировка трубопроводов, графы.

Abstract. Graph structures have been developed to represent the problem of equipment placement and pipeline tracing of chemical and technological systems. The mathematical representation of the developed graphs is presented.

Keywords: chemical technological system, placement of equipment, tracing of pipelines, counts.

1. Размещение оборудования. Будем рассматривать задачу размещения аппаратов на примере размещения в заданном многоэтажном здании. Результатом решения этой задачи является гиперграф, ребра которого представляют собой этажи, а вершины, размещенное на этаже оборудование.

Размещаемое оборудование и этажи здания имеют свойства, например, для аппаратов – вес, габариты, координаты расположения, для этажей – размеры.

Исходные данные: множество размещаемых аппаратов со связями, множество этажей и свойства аппаратов и этажей.

Для решения задача декомпозируется на две подзадачи:

– размещение аппаратов по этажам (задания принадлежности вершин ребрам);

– размещение аппаратов на этаже (задание значения свойства аппаратов – координаты расположения).

Для примера рассмотрим задачу размещения аппаратов по этажам.

Аппараты со связями можно представить в виде ориентированного графа

$$GS = (X, T),$$

где $X = \{x_i,\}, i = \overline{1,I}$ – размещаемые аппараты (вершины графа), $T = \{t_{ij}, i \in I, j \in I, i \neq j\}$ – связи между аппаратами (ребра графа). Множество этажей $U = \{u_m(\varnothing)\}, m = \overline{1,M}$. Размещение аппаратов по этажам заключается в построении гиперграфа $GR_g = (X,U)$, где $X = \{x_i,\}, i = \overline{1,I}$ – множество, размещаемых аппаратов, $U = \{u_m(Y_m)\}$, $m = \overline{1,M}$ – множество ребер (этажей), $u_m(Y_m)$ – m-е ребро гиперграфа, Y_m – множество вершин (аппаратов), инцидентных m-му ребру $Y_m \subseteq X$, $Y_m = \{x_k\}$, $k \in K_m$, $K_m \subseteq \overline{1,I}$.

Иллюстрация размещения аппаратов по этажам представлена на рис. 1.

2. Трассировка трубопроводов. Трассы трубопроводов в производственном помещении размещаются по определенным правилам. В результате трубопровод, соединяющий два аппарата, имеет множество участков, координаты которых необходимо найти. Отдельный трубопровод представляет собой ребро гиперграфа, а элементы трубопровода вершины. Ребро имеет такие свойства, как материал трубопровода, температура и давление среды, координаты начала и конца трубопровода и др. Вершины – (элементы трубопровода) такие свойства, как диаметр трубы элемента, координаты начала и конца элемента и др.

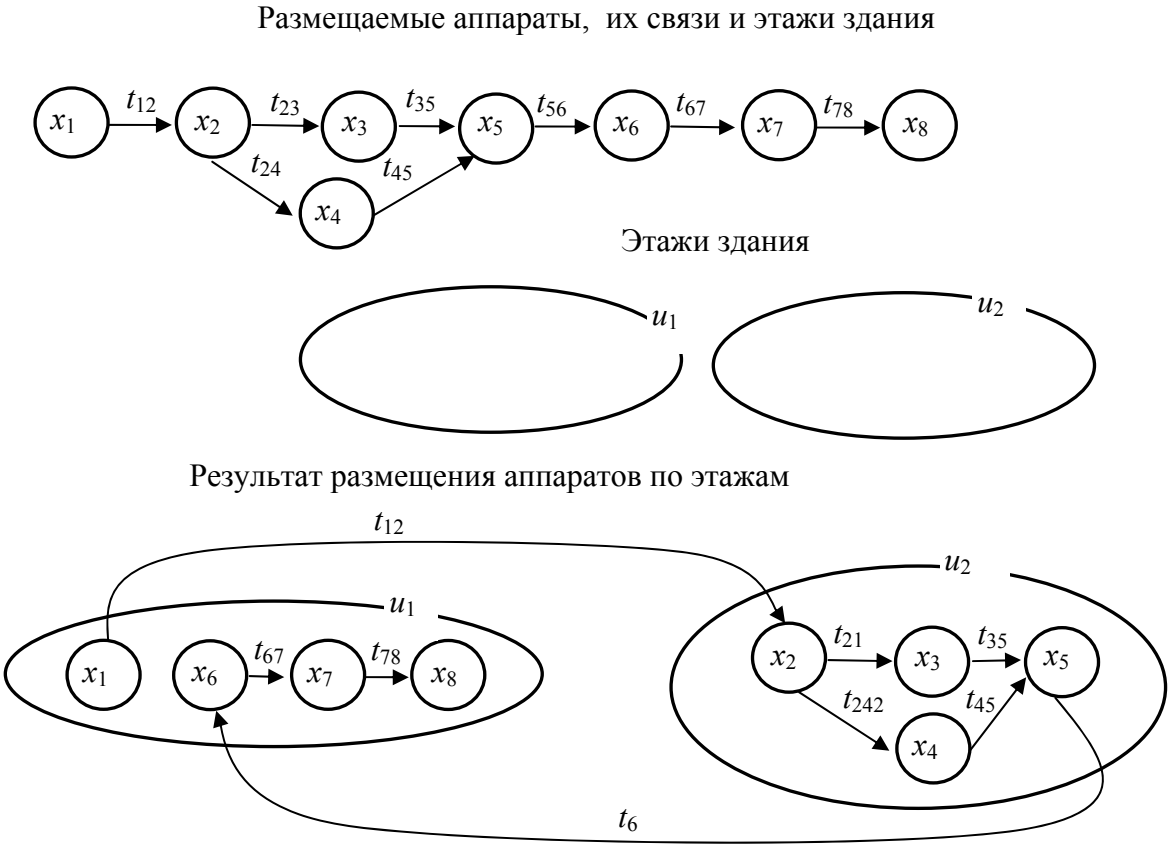


Рис. 1. Пример размещения аппаратов по этажам

Таким образом, задача трассировки заключается в следующем. Для заданных гиперграфа размещения аппаратов по этажам и пустых ребер (трасс) необходимо найти вершины ребер (элементы трассы).

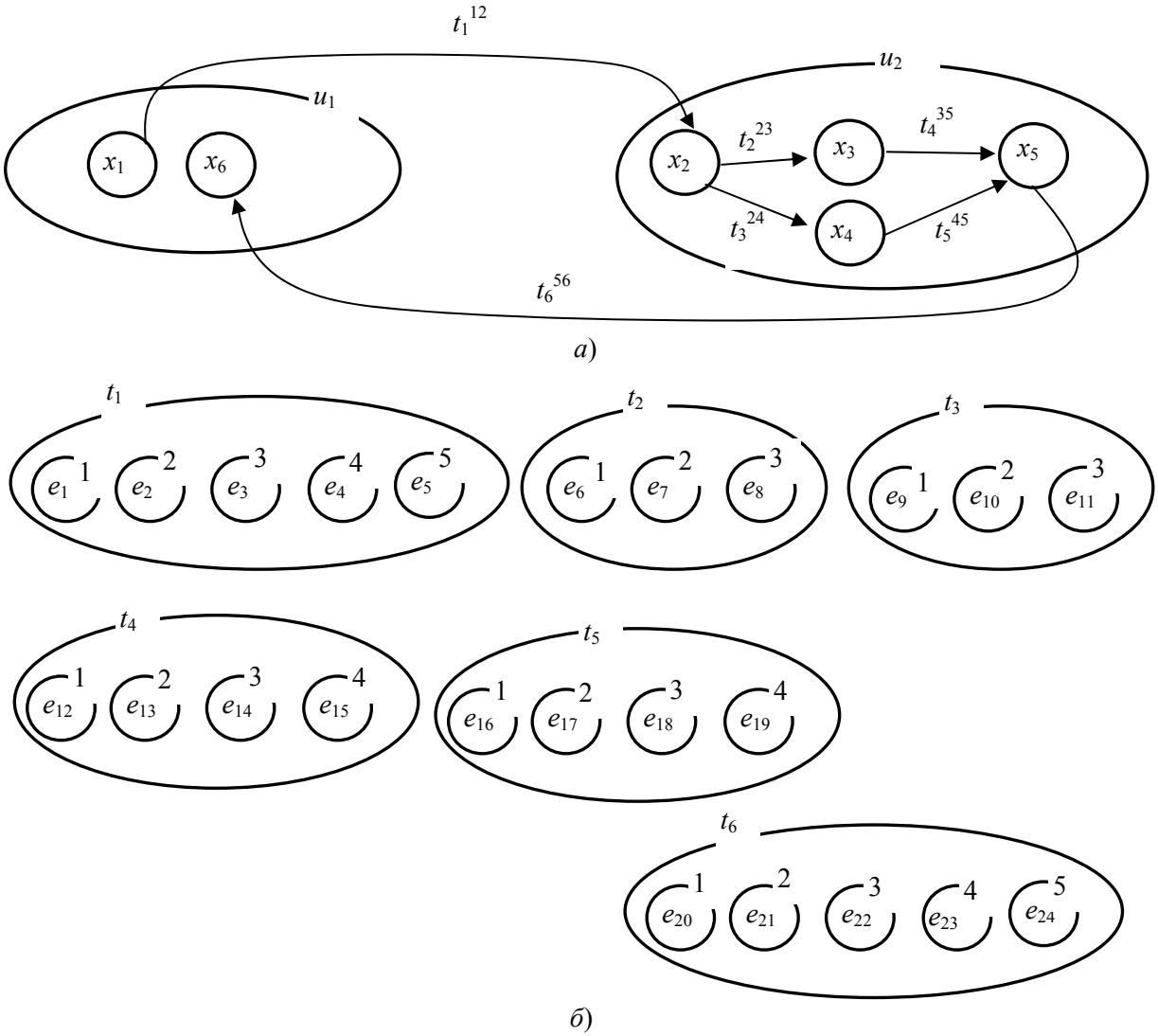


Рис. 2. Пример гиперграфа трассировки:
а – размещение аппаратов по этажам и связи между аппаратами;
б – гиперграф трассировки трубопроводов

Обозначим:

– гиперграф размещения аппаратов по этажам $GR_g = (X,U)$, где $X = \{x_i,\}, i = \overline{1,I}$ – множество размещаемых аппаратов, $U = \{u_m(Y_m)\}$, $m = \overline{1,M}$ – множество ребер (этажей), $u_m(Y_m)$ – *m*-е ребро гиперграфа, Y_m – множество вершин (аппаратов), инцидентных *m*-му ребру $Y_m \subseteq X$, $Y_m = \{x_k\}$, $k \in K_m$, $K_m \subseteq \overline{1,I}$;

– ориентированный граф аппаратов со связями $GS = (X,T)$, где $X = \{x_i\}, i = \overline{1,I}$ – размещаемые аппараты (вершины графа), $T = \{t_n^{ij}(\varnothing)\}, i \in I, j \in I, i \neq j, n = \overline{1,N}$ – связи между аппаратами (ребра графа, который необходимо построить), *n* – номер связи.

Задача трассировки заключается в построении ориентированного гиперграфа

$$GT_{go} = (E,T),$$

где $E = \{e_p,\}, p = \overline{1,P}$ – вершины гиперграфа (элементы трассы), $T = \{t_n(E1_n)\}$, $n = \overline{1,N}$ – множество ребер (трасс), $t_n(E1_n)$ – *n*-е ребро гиперграфа, $E1_n$ – множество вершин (элементов трассы), инцидентных *n*-му ребру $E1_n \subseteq E$, $E1_n = \{e_k\}$, $k \in K_n$, $K_n \subseteq \overline{1,P}$.

Следует добавить, что в гиперграфе $GT_{go} = (E,T)$ вершина может быть инцидентна только одному ребру, т.е. граф не имеет смежных ребер.

На рисунке 2 представлен пример гиперграфа трассировки, построенного на основании размещения аппаратов (рис. 1).

Представленные результаты используются при разработке системы информационной поддержки принятия решений при проектировании многоассортиментных химических производств [1 – 8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/БЧ*).

Список использованных источников

1. **Мокрозуб, В.** Создание виртуального кабинета «Конструирование технологического оборудования» в Тамбовском государственном техническом университете / В. Мокрозуб // САПР и графика. – 2015. – № 1(219). – С. 38–39.

2. **Мокрозуб, В. Г.** Представление структуры изделий в реляционной базе данных / В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 2008. – № 11(147). – С. 11 – 13.

3. **Мокрозуб, В. Г.** Представление структуры изделий в информационных системах управления машиностроительными предприятиями / В. Г. Мокрозуб // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 10(64). – С. 30 – 34.

4. **Мокрозуб, В. Г.** Программное обеспечение автоматизированных систем размещения объектов в пространстве, инвариантное к предметной области / В. Г. Мокрозуб, К. В. Немтинов, К. А. Шаронин // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2012. – № 3. – С. 11 – 20.

5. **Мокрозуб, В. Г.** Таксономия в базе данных стандартных элементов технических объектов / В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 2009. – № 11. – С. 18 – 22.

6. **Егоров, С. Я.** Автоматизированная информационная система поддержки проектных решений по компоновке промышленных объектов. Часть 2. Структура и функционирование системы (ч. 1 см. в ИТПП № 4, 2009 г.) / С. Я. Егоров, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, М. С. Громов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 1. – С. 33 – 39.

7. **Мокрозуб, В. Г.** Таксономия в базе данных стандартных элементов технических объектов / В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 2009. – № 11. – С. 18 – 22.

8. **Мокрозуб, В. Г.** Структура реляционной базы данных для хранения групповых спецификаций изделий с взаимозаменяемыми элементами / В. Г. Мокрозуб // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 3. – С. 30 – 35.

References

1. **Mokrozub, V. G.** Sozdanie virtual`nogo kabineta «Konstruirovanie texnologicheskogo oborudovaniya» v Tambovskom gosudarstvennom texnicheskom universitete / V. G. Mokrozub // SAPR i grafika. – 2015. – № 1 (219). – S. 38–39.

2. **Mokrozub, V. G.** Predstavlenie struktury` izdelij v relyacionnoj baze danny`x / V. G. Mokrozub//Informacionny`e texnologii. – 2008. – № 11(147). – S. 11 – 13.

3. **Mokrozub, V. G.** Predstavlenie struktury` izdelij v informacionny`x sistemax upravleniya mashinostroitel`ny`mi predpriyatiyami // Vestnik komp`yuterny`x i informacionny`x texnologij. – 2009. – № 10(64). – S. 30 – 34.

4. **Mokrozub, V. G**. Programmnoe obespechenie avtomatizirovanny`x sistem razmeshheniya ob``ektov v prostranstve, invariantnoe k predmetnoj oblasti / V. G. Mokrozub, K. V. Nemtinov, K. A. Sharonin // Nauchno-texnicheskaya informaciya. Seriya 2: Informacionny`e processy` i sistemy`. – 2012. – № 3. – S. 11 – 20.

5. **Mokrozub, V. G.** Taksonomiya v baze danny`x standartny`x e`lementov texnicheskix ob``ektov / V. G. Mokrozub // Informacionny`e texnologii. – 2009. – № 11. – S. 18 – 22.

6. **Egorov, S. Ya.** Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema podderzhki proektny`x reshenij po komponovke promy`shlenny`x ob′ektov chast` 2. Struktura i funkcionirovanie sistemy` (chast` 1 sm. v ITPP № 4, 2009 g.) / S. Ya. Egorov, V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, M. S. Gromov // Informacionny`e texnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2010. – № 1. – S. 33 – 39.

7. **Mokrozub, V. G.** Taksonomiya v baze danny`x standartny`x e`lementov texnicheskix ob``ektov / V. G. Mokrozub // Informacionny`e texnologii. – 2009. – № 11. – S. 18 – 22.

8. **Mokrozub, V. G.** Struktura relyacionnoj bazy` danny`x dlya xraneniya gruppovy`x specifikacij izdelij s vzaimozamenyaemy`mi e`lementami / V. G. Mokrozub // Avtomatizaciya. Sovremenny`e texnologii. – 2015. – № 3. – S. 30 – 35.

УДК 004.9

Мокрозуб В. Г., Малыгин Е. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Mokrozub V. G., Malygin E. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

DECOMPOSITION OF THE PROBLEM OF HARDWARE DESIGN OF CHEMICAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Аннотация. Проведен системный анализ процессов принятия решений при разработке технологических аппаратов (ТА), на основании которого предложена декомпозиция задачи разработки ТА, в основе которой лежит классификация элементов ТА на основные и вспомогательные.

Ключевые слова: технологические аппараты, расчет, проектирование, автоматизация.

Abstract. The system analysis of decision-making processes in the development of technological devices (TD) is carried out. On the basis of the analysis the decomposition of the task of developing TD, which is based on the classification of TD elements into the main and auxiliary ones is proposed.

Keywords: technological devices, calculation, design, automation.

Место задачи разработки технологических аппаратов в системе задач создания многоассортиментных химических производств. Задача создания многоассортиментных химических производств (МХП) – глобальная задача, чрезвычайно сложная и трудноформализуемая. Ее решение осуществляется коллективом специалистов разного профиля (химики-технологи, конструкторы, строители и др.). В соответствии с принципами системного анализа сложная задача для своего решения декомпозируется на ряд локальных взаимосвязанных подзадач, решение которых позволяет найти решение глобальной задачи. Каждая локальная подзадача в свою очередь может быть декомпозирована на более мелкие подзадачи. В результате декомпозиции получается иерархическая система связанных локальных задач разного уровня, согласование решений которых осуществляется задачами более высокого уровня иерархии так, чтобы получить решение глобальной задачи.

На рисунке 1 представлен фрагмент декомпозиции глобальной задачи разработки МХП [1]. Достоверность такой декомпозиции доказана многолетним опытом создания и эксплуатации этих производств. Глобальная задача разделена на локальные подзадачи по принципу предметной области или профессиональной специализации решающих ее сотрудников (технологи, строители, экономисты). Она включает в себя следующие подзадачи:

– технологическая разработка;
– разработка общеинженерной части;
– проведение технико-экономических расчетов и др.

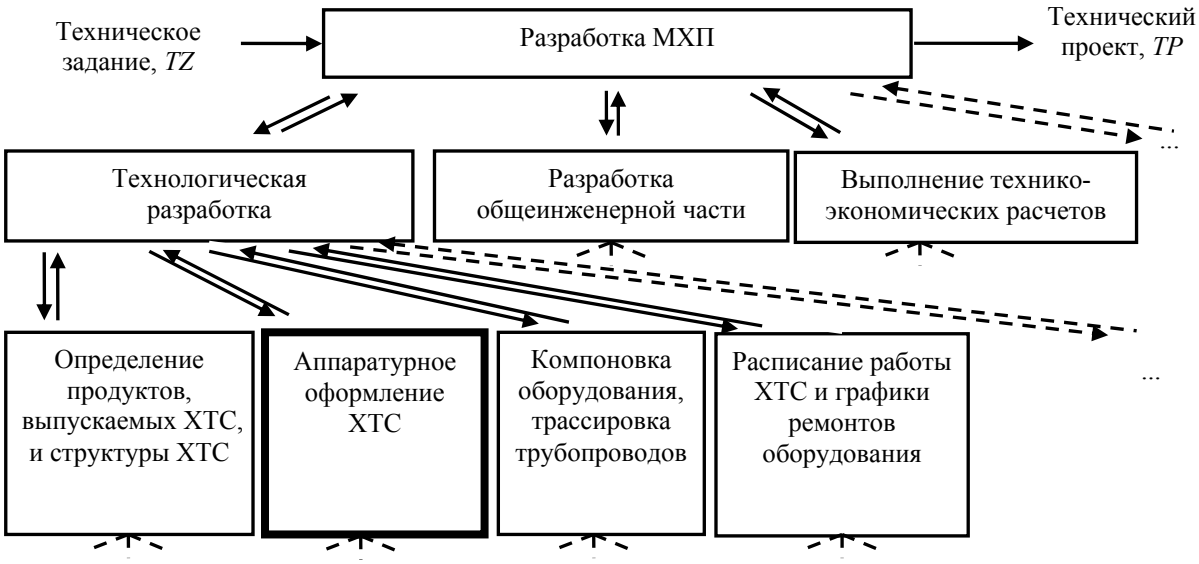


Рис. 1. Фрагмент декомпозиции глобальной задачи разработки МХП

При технологической разработке МХП определяются группы продуктов, которые будут выпускаться на одной химико-технологической системе (ХТС), осуществляется аппаратурное оформление ХТС, компоновка оборудования, разработка аппаратов отдельных стадий, разработка ХТС утилизации отходов, составляется расписание работы ХТС и др.

Задача разработки технологических аппаратов входит в задачу «Аппаратурное оформление МХП», системный анализ процессов принятия решений которой представлен ниже.

Системный анализ процессов принятия решений при разработке аппаратурного оформления химико-технологических систем. ХТС характеризуется технологическими (режимными) параметрами и конструктивным оформлением каждой стадии. Основными технологическими параметрами являются:

– масса партии, прошедшая все стадии переработки. Характеризует ХТС в целом;

– расход сырья, электроэнергии, пара, воды и др. на каждой стадии, необходимые для выпуска заданного ассортимента продуктов;

– концентрации обрабатываемых веществ, температуры тепло- и хладоносителей, давление и др. в каждом отдельном аппарате стадии.

Конструктивные параметры ХТС:

– типы и определяющие геометрические размеры аппаратов каждой стадии;

– конструкция каждого отдельного аппарата стадии (вся документация, достаточная для изготовления аппарата).

Решение задачи аппаратурного оформления ХТС заключается в нахождении таких режимных параметров ХТС и конструктивного оформления каждой стадии, которые позволяют выпускать заданный ассортимент продуктов с заданной производительностью и с минимальными затратами.

В зависимости от выполняемых процессов на каждой стадии могут устанавливаться различные аппараты: емкостные и трубчатые реакторы; ленточные, камерные, барабанные и другие сушилки; колонные аппараты; камерные, барабанные и другие фильтры. Каждый аппарат имеет множество режимных параметров (давление, температура, скоро-

сти движения потоков в рабочей зоне) и состоит из множества элементов (обечайки, приводы, мешалки и др.), которые имеют свои параметры (в первую очередь размеры).

Таким образом, число искомых параметров в задаче аппаратурного оформления исчисляется тысячами. Поэтому эта задача в той постановке, которая представлена выше, неразрешима на современном уровне развития вычислительной техники, из-за большой длительности ее решения на общедоступных компьютерах.

Основным принципом решения подобных сложных задач разработки технических объектов с множеством искомых параметров является декомпозиция исходной задачи (глобальная задача) на систему взаимосвязанных задач (локальные задачи), согласование решений которых осуществляется с помощью методов системного анализа и теории иерархических систем.

Декомпозиция задачи аппаратурного оформления химико-технологических систем. В результате системного анализа процессов принятия решений при разработке аппаратурного оформления ХТС глобальная задача «Аппаратурное оформление ХТС» декомпозирована на ряд локальных подзадач, которые разбиты на 11 уровней (рис. 2):

– уровень 1. Расчет определяющих размеров и числа аппаратов на каждой стадии;
– уровень 2. Разработка аппаратов ХТС;
– уровень 3. Разработка аппарата стадии;
– уровень 4. Выбор типов основных элементов аппарата;
– уровень 5. Расчет тепломассообменных и гидродинамических процессов в аппарате;
– уровень 6. Расчет на прочность основных элементов аппарата;
– уровень 7. Выбор типов вспомогательных элементов аппарата;
– уровень 8. Расчет основных размеров вспомогательных элементов;
– уровень 9. Расчет унитарных (зависящих от основных) размеров вспомогательных элементов аппарата;
– уровень 10. Задание и расчет посадок, допусков размеров, форм и расположений поверхностей элементов деталей аппарата;
– уровень 11. Задание шероховатости и твердости поверхностей элементов деталей аппарата.

Рассмотрим основной принцип, который положен в основу декомпозиции задачи $z^3_{i,1}$ (расчет параметров аппарата), который используется для формулировки задач 4 – 9 уровней.

Любой аппарат имеет рабочую зону, в которой протекают технологические процессы. Поэтому, прежде всего, необходимо конструктивно и технологически оформить эту зону так, чтобы обеспечить благоприятные (оптимальные) условия проведения процессов.

На основании сказанного все элементы оборудования можно условно классифицировать (разделить) на основные, которые формируют рабочую зону, и вспомогательные, которые непосредственно не влияют на рабочую зону, но без которых оборудование не может функционировать.

Следует отметить, что декомпозиция задачи аппаратурного оформления ХТС осуществлялась и ранее. Так, в работах [2 – 5] рассматривается трехуровневая декомпозиция задачи аппаратурного оформления. Однако результаты, полученные в указанных работах, не позволяют получать всю необходимую для изготовления разрабатываемых аппаратов документацию.

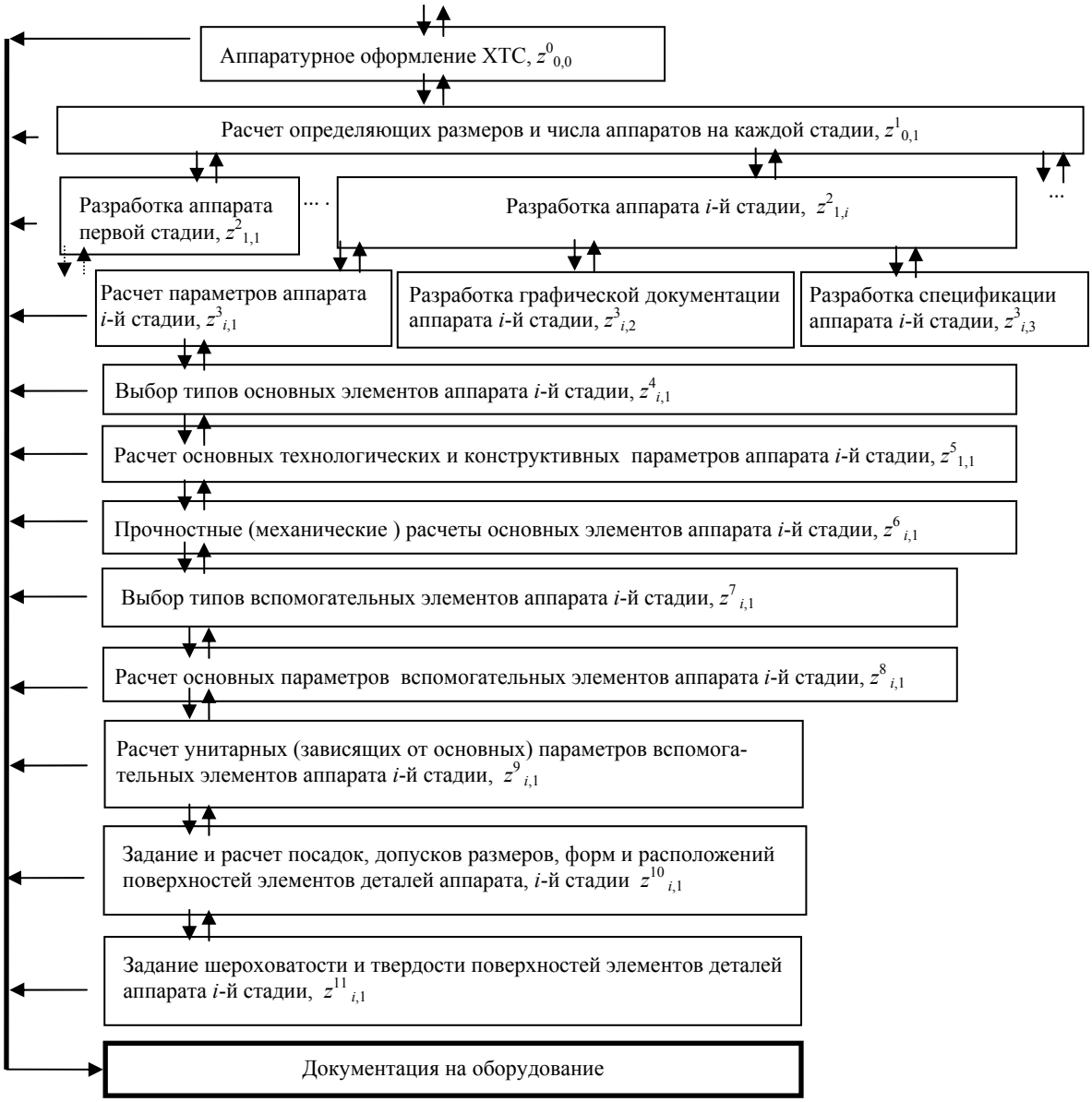


Рис. 2. Декомпозиция задачи «Аппаратурное оформление ХТС»

Заключение. Проведен системный анализ процессов принятия решений при разработке ТА, на основании которого предложена декомпозиция задачи разработки ТА, в основе которой лежит классификация элементов ТА на основные и вспомогательные. Основные элементы определяют рабочую область ТА и условия протекания в ней процессов. Вспомогательные элементы (фланцы, опоры и т.д.) непосредственно не влияют на рабочую область, но без них невозможны существование и эксплуатация ТА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части (*проект 8.7082.2017/БЧ*).

Список использованных источников

1. **Малыгин, Е. Н.** Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом выпускаемой продукции / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкнн // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 778 – 788.

2. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. I. Постановки задач и схема их совместного решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 3. – С. 52 – 58.

3. **Карпушкин, С. В.** Методика выбора основной аппаратуры технологических систем при проектировании многоассортиментных химических производств. Ч. II. Условия разрешимости задач и алгоритмы их решения / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – № 4. – С. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A.B.Borisenko, S.V.Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – T. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical-engineering systems of multi-product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – T. 15, № 3. – P. 447 – 452.

References

1. **Malygin, E. N.** Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnicheskih sistem s izmenyaemym assortimentom vypuskaemoj produkcii / E. N. Malygin, S. V. Karpushknn // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – T. 14, № 4. – S. 778 – 788.

2. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv. CHast' I. Postanovki zadach i skhema ih sovmestnogo resheniya / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 3. – S. 52 – 58.

3. **Karpushkin, S. V.** Metodika vybora osnovnoj apparatury tekhnologicheskih sistem pri proektirovanii mnogoassortimentnyh himicheskih proizvodstv CHast' II. Usloviya razreshimosti zadach i algoritmy ih resheniya / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskij, A. B. Borisenko // Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. – 2012. – № 4. – S. 34 – 40.

4. **Borisenko, A. B.** Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – T. 53, № 3. – P. 410 – 419.

5. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical-engineering systems of multi-product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – T. 15, № 3. – P. 447 – 452.

УДК 004.94:66.023

Мартьянов Е. И., Малыгин Е. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: martyanovei@gmail.com)

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАСТНЫХ МЕШАЛОК

Martyanov E. I., Malygin E. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: martyanovei@gmail.com)

APPLICATION OF COMPUTER-AIDED ENGINEERING SYSTEMS FOR DESIGNING OF BLADE STIRRERS

Аннотация. В данной статье отражен результат исследований, проводимых в целях определения степени точности, полученных из CAE-систем (англ. computer-aided engineering – система автоматизированного расчета) результатов при моделировании процесса перемешивания. В ходе исследования был произведен анализ результатов, полученных по стандартной методике расчетов механических перемешивающих устройств (МПУ) и из CAE-систем с фактическими замерами мощности на лабораторной установке с лопастной мешалкой. В ходе анализа были выявлены закономерности подтверждающие, что применение CAE-систем позволяет описывать процесс перемешивания с большей точностью, чем стандартная методика расчетов МПУ.

Ключевые слова: лопастная мешалка, расчет мощности затрачиваемой на перемешивание, расчет крутящего момента на валу мешалки, система автоматизированного расчета, вертикальный емкостной аппарат.

Abstract. This article reflects the result of studies conducted to determine the degree of accuracy obtained from CAE (computer-aided engineering) systems in the modeling of the mixing process. In the course of the study, the results obtained using the standard method for calculating mechanical agitators and from CAE systems with actual power measurements in a laboratory unit with a blade stirrer were analyzed. In the course of the analysis, regularities confirming that the use of CAE systems allows describing the mixing process with greater accuracy than the standard method for calculating mechanical agitators.

Keywords: bladed stirrer, calculation of the power expended for mixing, calculation of the torque on the agitator shaft, computer-aided engineering systems, vertical capacitive apparatus.

Современные тенденции в экономике и промышленности все больше требуют повышения качественных показателей производимых продуктов при снижении финансовых и энергетических затрат на их производство. Ввиду низкой изученности основных процессов, применяемых на производстве, данные проблемы в основном решаются экспериментальными методами на основе лабораторных исследований или создании масштабных физических моделей исследуемых объектов. На все это уходит ценное время и ресурсы, а когда эта технология будет отработана в лабораторных условиях и внедрена в производство, она может оказаться уже устаревшей или неэффективной. Поэтому все чаще на различных уровнях производства внедряют CAE-системы, кото-

рые позволяют проводить моделирование физико-механических и химических процессов с применением численных методов решения дифференциальных уравнений.

Одним из самых распространенных процессов в химической, фармацевтической и пищевой промышленности является смешение гомогенных (жидкость–жидкость) или гетерогенных (жидкость–газ, жидкость–твердое) систем в реакторах периодического или непрерывного действия. Для описания данного процесса применяют уравнение Навье–Стокса.

Уравнение Навье–Стокса – система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости. Решая данное уравнение, применяя метод конечных элементов (МКЭ), можно получать достаточно точные результаты. МКЭ – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными. Данный метод позволяет решать дифференциальные уравнения посредством разбивки его области решения на конечное количество элементов. В каждом из этих элементов обычно для простоты вычисления используют полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю, а решением задачи являются значения функций на границах элементов. Коэффициенты аппроксимирующих функций определяются из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами. Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных уравнений, в которой количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ.

Для решения поставленной задачи была создана расчетная модель лабораторной установки с лопастной мешалкой объемом 5 л (см. рис. 1) в CAE-системе COMSOL Multiphysics.

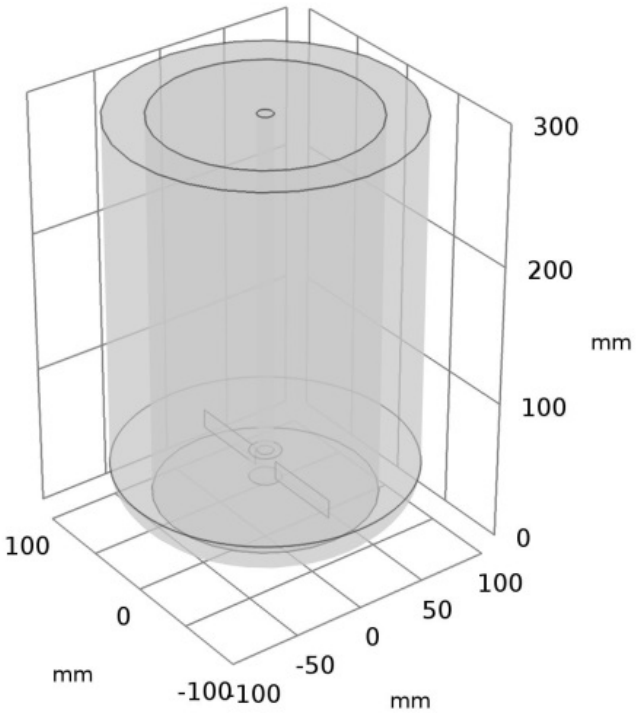


Рис. 1. Модель реактора с двухлопастной мешалкой

Для решения модели применялся модуль Rotating Machinery, Fluid Flow. Сам расчет проводили с помощью *k*-ε-модели для турбулентного режима течения жидкости. Средой в аппарате была принята вода при температуре t = 20 °С и давлении Р = 760 мм рт. ст. с характеристиками: плотность – ρ = 998 кг/м^3, динамическая вязкость – μ = 1,002·10^{-3} Па·с, кинетическая вязкость – ν = 1,004·10^{-6} м^2/с. Расчет проводили для различных частот вращения мешалки в интервале от 20 до 100 об/мин. В ходе решения задачи были определены ряд параметров: мощность, затрачиваемая на перемешивания и крутящий момент на валу мешалки (см. табл. 1). Полученные данные соответствуют установившемуся режиму перемешивания, когда мощность, затрачиваемая на перемешивания и соответственно крутящий момент на валу мешалки, не изменяется со временем.

Для проверки полученных результатов были проведены расчеты по руководящему нормативному документу РД 26-01-90–85: «Механические перемешивающие устройства, метод расчета». В расчетах определяли мощность, потребляемую при перемешивании без учета пусковых нагрузок (см. табл. 1). После на основе полученных данных вычисляли крутящий момент (см. табл. 1). Анализируя результаты, можно заметить, что потребляемая мощность и крутящий момент, полученные по стандартной методике расчетов, отличаются от полученных в CAE-системе. Данная ситуация наглядно показывает на различие используемых подходов для решения поставленной задачи и требует проверки на лабораторной установке.

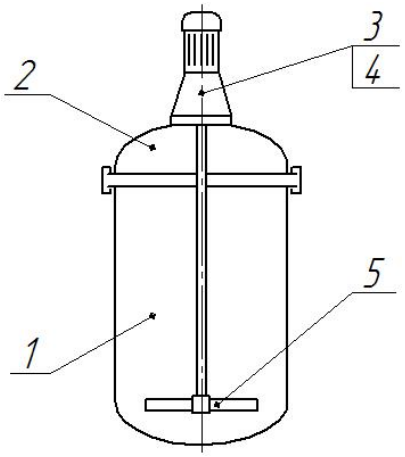


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Для проверки точности полученных результатов использовали лабораторную установку с МПУ (см. рис. 2). Сама установка представляет собой колбу с эллиптическим днищем *1* и крышкой *2*. МПУ состоит из редуктора *3* с электродвигателем постоянного тока *4*, который вращает вал, на котором установлена лопастная мешалка *5* по АТК 24.201.17–90: «Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования». Для снятия фактической мощности затрачиваемой на перемешивание использовали амперметр, подключенный к обмотке электродвигателя. По замеренной силе тока рассчитывали мощность, потребляемую приводом (см. табл. 1), а после определяли крутящий момент (см. табл. 1). Замеры проводили после того, как колебания замеряемой силы тока полностью затухали (не изменялись), что характерно для установившегося режима перемешивания.

Для большей наглядности полученные результаты исследования были представлены в виде графиков изменения мощности, затрачиваемой на перемешивание (см. рис. 3) и крутящего момента на валу мешалки (см. рис. 4).

На основе вышесказанного можно сделать выводы, что применение стандартных методик для решения простых задач, не требующих достаточно точного описания процесса перемешивания, позволяет сэкономить время. В случае если описываемый про-

цесс достаточно сложен и требует более точной проработки применение CAE-систем, позволяет получать достаточно точные данные при сравнительно небольших затратах как финансовых, так и временных.

1. Результаты исследования

Частота вращения мешалки, об/мин	Результаты расчетов из CAE-системы		Результаты расчетов по РД 26-01-90–85		Результаты замеров	
	Мощность, мВт	Крутящий момент, мН·м	Мощность, мВт	Крутящий момент, мН·м	Мощность, мВт	Крутящий момент, мН·м
20	0,28	0,13	0,42	0,2	0,26	0,12
40	2,08	0,5	3,06	0,73	2,1	0,5
60	7,12	1,13	9,82	1,56	7,08	1,13
80	17,3	2,07	22	2,68	16,5	1,97
100	34,6	3,31	43	4,04	35,2	3,36

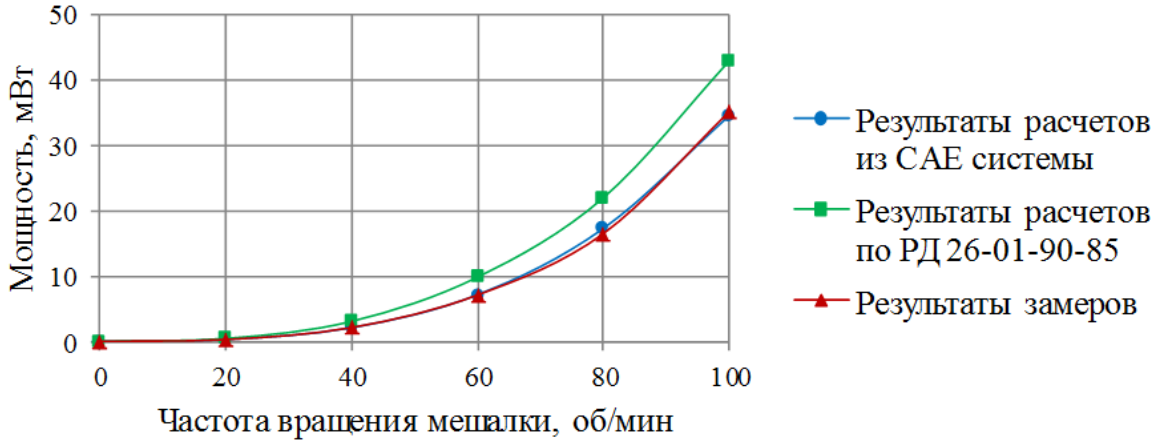


Рис. 3. Мощность, затрачиваемая на перемешивание

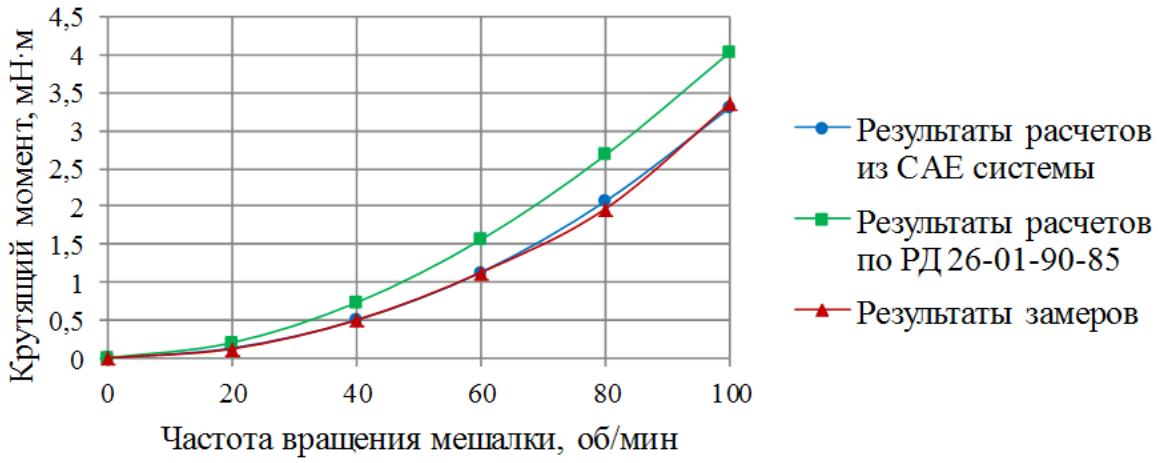


Рис. 4. Крутящий момент на валу мешалки

Список использованных источников

1. **Брагинский, Л. Н.** Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.

2. **Малыгин, Е. Н.** Математические методы в технических расчетах : учебное пособие / Е. Н. Малыгин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.

3. **Карпушкин, С. В.** Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 168 с.

4. **РД 26-01-90–85.** Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. Руководящий нормативный документ. – Введ. 1986-01-01. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.

5. **АТК 24.201.17–90.** Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. Альбом типовых конструкций. – Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 28 с.

References

1. **Braginsky, L. N.** Stirring in liquid media. Physical principles and engineering methods of calculation. / L. N. Braginsky, V. I. Begachev, V. M. Barabash. – L. : Chemistry, 1984. – 336 p.

2. **Malygin, E. N.** Mathematical methods in technical calculations: textbook / E. H. Malygin. – Tambov : Publishing House of the TSTU, 2010. – 80 p.

3. **Karpushkin, S. V.** Calculations and selection of mechanical mixing devices of vertical capacitive apparatus / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyansky, A. B. Borisenko – Tambov : Publishing house of Tamb. state. tech. University, 2009. – 168 p.

4. **RD 26-01-90–85.** Mechanical stirring devices. Calculation method. Guidance normative document. – Enter. 1986-01-01. – L. : RTP LenNIIhimmasha, 1985. – 257 p.

5. **ATC 24.201.17–90.** Agitators. Types, parameters, design, main dimensions and technical requirements. Album of typical designs. – Enter. 1991-01-01. – Moscow : Publishing Standards, 1990. – 28 p.

УДК 629.052

Бобылев В. Ю., Телепина А. А., Ищенко Д. А.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89027221648, e-mail: vlad.bobylev.97@mail.ru)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Bobylev V. Yu., Telepina A. A., Ishchenko D. A.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89027221648, e-mail: vlad.bobylev.97@mail.ru)

PROSPECTS OF USING VIRTUAL PROTOTYPING IN MODERN ENGINEERING

Аннотация. Предложена концепция и указаны достоинства использования VR-технологий в области машиностроительных производств.

Ключевые слова: моделирование, виртуальное прототипирование, виртуальная модель.

Abstract. The concept and advantages of using VR technologies in the field of machine-building production are discussed.

Keywords: modeling, virtual prototyping, virtual model.

Машиностроительный комплекс представляет сложное межотраслевое образование, включающее машиностроение и металлообработку. Так же машиностроение является ведущей отраслью тяжелой индустрии страны. Создавая наиболее активную часть основных производственных фондов – орудия труда, машиностроение в значительной степени оказывает влияние на темпы и направления научно-технического прогресса в различных отраслях хозяйственного комплекса, на рост производительности труда и другие экономические показатели, определяющие эффективность развития общественного производства [1 – 7].

Поступательное развитие средств вычислительной техники обуславливает все большее проникновение информационных технологий во все сферы человеческой деятельности. За последние 20 лет вычислительная мощность ЭВМ увеличилась более чем в десятки раз, что открывает возможности для все более и более детального моделирования виртуальной реальности. Следует отметить, что появление электронных средств вычислительной техники (СВТ) обусловило разработку моделей и программных средств, позволяющих проводить анализ, в меру доступных технических возможностей. Базируясь на принципах математического моделирования, компьютерное моделирование использовалось для решения различных задач от имитации игрового автомата до моделирования транспортной системы.

Проблему технологического отставания отечественного оборонно-промышленного комплекса и машиностроения в целом можно решить с помощью внедрения новых технологий XXI века, т.е. виртуальную реальность (VR). САПР является ключевым элементов для применения VR в машиностроении, так как позволяет создать цифровую модель детали.

Термины «виртуальная модель» и «виртуальная реальность» обычно ассоциируются с компьютерными играми, когда с помощью различных устройств виртуальной реальности – аудио, визуальных, сило-моментных, тактильных и других – имитируется физическая реальность, что позволяет получить так называемый «эффект присутствия» или близкое к реальному воздействие на органы чувств человека со стороны искусственно созданной компьютерной модели. Однако игры – не единственная область приложения виртуального моделирования, значение виртуальных компьютерных моделей гораздо шире и выходит за рамки индустрии развлечений.

Благодаря объемной фотореалистической визуализации физических объектов и процессов на экране компьютера в процессе виртуального моделирования стала возможнf полная имитация зрительного восприятия разнообразных статических и динамических состояний физической реальности. Как известно, примерно 80% информации человек воспринимает визуально. Индивидуальные средства визуализации – мониторы имеют ограниченную функциональность. когда речь заходит о визуализации для коллективной работы. Подобные системы дают возможность быстрого восприятия и обсуждения «виртуальной информации» одновременно большим количеством людей. Количество людей, работающих в виртуальной среде, может быть различным в зависимости от типа выбранной системы (от 1–2 до 30 – 50 и более). Система визуализации включает в себя большой экран для отображения виртуальных 3D-моделей в натуральную величину. Под 3D-моделью объекта понимают его пространственную (трехмерную) компьютерную геометрическую модель, которая может включать в себя также набор атрибутов, описывающих объект. 3D-модели могут создаваться на различных этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Стремительно меняющийся и диверсифицированный рынок требует сокращения жизненного цикла для многих продуктов. Быстрота разработки продукта являтся ключевым фактором для удовлетворения этих требований рынка. Однако традиционная разработка продукта основывалась на итерациях процесса проектирования и построении дорогостоящих и трудоемких физических прототипов. Когда встала задача сокращения этого процесса, неизбежным стало появление новых методов разработки, основанных на компьютерном моделировании и визуализации. Данные тенденции в инженерной науке сходятся в новом понятии – виртуальное прототипирование (virtual prototyping). В сущности, виртуальный прототип – это имитационная модель будущего изделия.

Виртуальное прототипирование позволяет оценивать возможность производства различных вариантов конструкции. Такая оценка дает информацию о длительности обработки, времени цикла, затратах и качестве изделия. Она позволяет также прогнозировать время подготовки к работе, время выполнения и затраты на рабочую силу. Инструменты виртуальной реальности сегодня все шире становятся востребованными в области продаж и маркетинговой деятельности. С профессиональной точки зрения возможность представить 3D-модель детали с высоким уровнем детализации в режиме погружения в пространство виртуальной реальности имеет неоценимое значение для повышения уровня классификации рабочего.

Мышление конструктора, применяющего 3D-моделирование, отличается от мышления конструктора, работающего только с чертежами. Эти отличия состоят в следующем.

1. Мысленные «образы чертежей» заменяются «образами моделей», что раскрепощает пространственное мышление и способствует более быстрому принятию решений.

2. Свобода в создании сложных геометрических форм и понимание того, что эти формы могут быть легко реализованы «в металле» с помощью интегрированных технологий, стимулируют творчество, повышают интерес к работе.

3. Используя при проектировании созданную ранее модель похожего изделия (изделия-аналога), конструктор может иногда в десятки раз сократить общее время работы над проектом.

Важно также, что при 3D-проектировании резко уменьшается число ошибок в проекте. Это происходит по следующим причинам:

1) Конструктор может наглядно видеть результат своей работы уже в процессе проектирования.

2) Виды чертежа формируются на основании модели автоматически и поэтому исключаются ситуации, когда информация в одном виде не соответствует другому.

3) При проектировании сборочных единиц имеется возможность проверять собираемость и выявлять ошибки на уровне моделей.

Виртуальные 3D-модели могут использоваться для создания слайдов и анимационных фильмов, выгодно представляющих созданное изделие и поясняющих принципы его работы. Эти слайды и фильмы могут использоваться в коммерческих предложениях или для рекламных целей. Так же 3D-модели могут, как и для этапа реализации, использоваться для создания слайдов и анимационных фильмов, которые в свою очередь используются в качестве элементов или составных частей эксплуатационной документации.

Для ремонта и обслуживания 3D-модели могут использоваться для создания так называемых интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР), которые детально поясняют процессы ремонта и обслуживания изделия. ИЭТР наиболее востребованы применительно к сложным видам промышленной продукции. В самом деле, трудно и даже невозможно представить себе ремонт и обслуживание самолета или корабля без соответствующей технической документации. Таким образом, 3D-модели используются практически на всех этапах ЖЦИ.

Однако роль виртуальных 3D-моделей наиболее велика на этапах проектирования и технологической подготовки производства изделий, которые можно объединить в этап конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). Поэтому основное внимание уделяется методам и средствам создания и использования виртуальных 3D-моделей при решении различных задач КТПП.

Список использованных источников

1. **Моделирование** сложных вероятностных систем : учебное пособие / В. Г. Лисиенко, О. Г. Трофимова, С. П. Трофимов и др. – Екатеринбург : УРФУ, 2011. – 200 с.

2. **Ульянов, Р. С.** Моделирование технических систем в среде Unity 3D / Р. С.Ульянов, С. В. Прокопьев, В. В. Делибалтов // Молодой ученый. – 2015. – № 11. – С. 452 – 455.

3. **Яблочников, Е. И.** Моделирование приборов, систем и производственных процессов : учебное пособие / Е. И. Яблочников, Д. Д. Куликов. – СПб. : СпбГУИТМО, 2008. – 155 с.

4. **Фролова, Т. А.** Решение интервальных математических моделей технологических процессов / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – Эл. № ФС 77-48211. – Гос. регистрация № 0421200025. Инженерное образование, #09, сент.2012, http://technomag.edu.ru/doc/454499.html

5. **Фролова, Т. А.** Архитектура системы поддержки принятия решений оценки эффективности инвестиционных проектов / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – С. 215 – 221.

6. **Фролова, Т. А.** Mathematical model with uncertain parameters for the burning process / Т. А. Фролова, Д. С. Туляков // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2, т. I. – С. 249 – 252.

7. **Фролова, Т. А.** Совершенствование механизма прогнозирования продаж продукции машиностроительного предприятия : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / Т. А. Фролова, И. И. Данилкина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2, т. I. – С. 231 – 235.

References

1. **Lisienko V. G.** Modeling of complex probabilistic systems: studies. benefit / V. G. Lisienko, O. G. Trofimova, S. P. Trofimov, etc. Ekaterinburg: URFU, 2011. – 200 p.

2. **Ulyanov R. S.** Modeling of technical systems in Unity 3D environment / R. S. Ulyanov, S. V. Prokopiev, V. V. Delibaltov / Young scientist. – 2015. – № 11. – P. 452 – 455.

3. **Yablochnikov E. I.** Modeling of devices, systems and production processes / textbook / E. I. Yablochnikov, D. D. Kulikov. – SPb. : SPbSU ITMO, 2008. – 155 p.

4. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D. S. Inhabitants of Tula. Solution of interval mathematical models of technological processes Electronic scientific and technical issuing “Science and education”. Al. № FS 77-48211. State registration № 0421200025. Engineering education, #09, сент. 2012, http://technomag.edu.ru/doc/454499.html

5. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D.S. Arkhitektur's Inhabitants of Tula of system of support of decision-making of assessment of efficiency of investment projects // Virtual modeling, prototyping and industrial design. Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2015. – P. 215 – 221.

6. **Frolova, T. A.**, Tulyakov, D. S. Inhabitants of Tula of Mathematical model with uncertain parameters for the burning process // Virtual modeling, prototyping and industrial design Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2016. – Release 2, V. I. – P. 249 – 252.

7. **Frolova, T. A.**, Danilkina, I. I. Improvement of the mechanism of forecasting of sales of production of machine-building enterprise. Materials of the international scientific and practical conference. – Tambov : TGTU FGBOU VPO publishing house, 2016. – Release 2, V. I. – C. 231 – 235.

УДК 65.012.2

Егоров С. Я., Золотов Д. А.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: egorovsy@ yandex.ru

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОСТАНОВОЧНЫХ РЕМОНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Egorov S. Ya., Zolotov D. F.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: egorovsy@yandex.ru)

Аннотация. Рассмотрена система для решения задач планирования остановочных ремонтов объектов машиностроительных производств.
Ключевые слова: остановочный ремонт, планирование, автоматизация.

Abstract. The system for solving the problems of scheduling stop repairs of machine-building plants is considered.
Keywords: stop repair, planning, automation.

Остановочный ремонт – это планово-предупредительный ремонт технологической системы, предприятия, производства, цеха или отдельного объекта, осуществление которого возможно только при условии полной остановки и прекращения выпуска продукции данной технологической схемой, предприятием, производством, цехом. К основным объектам, требующим остановочный ремонт, относятся: технологические системы и энергообъекты с непрерывным технологическим процессом и не имеющие резерва; общецеховые и магистральные коммуникации и сооружения; общезаводские коммуникации и сооружения.

Рассмотрим наиболее часто решаемые задачи при планировании остановочного ремонта [1, 2].

Задача 1. «Нахождение минимального времени выполнения остановочного ремонта при отсутствии ограничений на трудовые ресурсы».

Задача 2. «Нахождение минимального времени выполнения работ остановочного ремонта при наличии ограничений на трудовые ресурсы».

Задача 3. «Разработка плана работ остановочного ремонта по критерию суммарных затрат».

Некоторыми из результатов решения перечисленных выше задач являются фиксированное время выполнения ремонта и ежедневная занятость ремонтного персонала в виде карты проекта ремонта. Далее решаются подзадачи оптимального распределения ресурсов при заданном времени выполнения проекта по следующим критериям.

1. Критерий – дисперсия ресурсных изменений.

Проводя оптимизацию с помощью этого критерия, выбирается решение, соответствующее практической потребности, т.е. профиль ресурсов с параболическим распределением без значительного увеличения или уменьшения количества рабочего персонала.

2. Критерий – сумма квадратов потребностей в ресурсах.

Сравнение сумм квадратов потребностей в ресурсах для каждой единицы времени позволяет выбрать наиболее сглаженное распределение, которое в идеале является рав-

номерным. Эта сумма тем меньше, чем меньше изменение потребности в ресурсах при переходе от одного рабочего дня к другому.

Для решения этих задач, а также подзадач оптимального распределения ресурсов была разработана «Система оперативного планирования ремонтов промышленных объектов». Рассматриваемая система включает в себя четыре подсистемы: сбора и обработки исходных данных; планирования и управления; снабжения запасными частями; выдачи документации.

Конечным продуктом действия системы является выявление и мобилизация резервов времени и материальных ресурсов, скрытых в нерациональной организации производственных процессов.

Использование разработанной системы дает возможность спланировать требуемый ремонт, найти оптимальные сроки его проведения, при ограниченных производственных ресурсах, а также осуществлять оперативный контроль за ходом ремонтных работ.

На основе вышеизложенного, на кафедре КИСМ ТГТУ разработана и реализована учебная подсистема планирования ремонтов, которая используется в ходе выполнения курсовых и лабораторных работ по курсу «автоматизированные системы управления предприятием», а также может быть использована при решении реальных задач планирования ремонтов. Реализован удаленный доступ к системе как по локальной сети, так и через Интернет.

Список использованных источников

1. **Кудрявцев, Е. М.** Методы сетевого планирования и управления проектом [Электронный ресурс] / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2008 – 238 с. – URL : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1211

2. **Управление** качеством продукции машиностроения [Электронный ресурс] / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горниленко, Б. В. Иванов. – Лань, 2010. – 416 с. – URL : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=764

References

1. **Kudryavtsev, E. M.** Metody setevogo planirovaniya i upravleniya proyektom [Elektronnyy resurs] / E. M. Kudryavtsev. – M. : DMK Press, 2008 – 238 s. – Rezhim dostupa : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1211

2. **Upravleniye** kachestvom produktsii mashinostroyeniya [Elektronnyy resurs] / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gornilenko, B. V. Ivanov. – Lan, 2010. – 416 s. – Rezhim dostupa : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=764

УДК 004.49

Яковлев А. В.[1], Савилова У. А.[2], Шибков Д. А.[3], Яковлева Д. А.[4]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. +7(910)8552341, e-mail: yava73@ bk.ru),
[2](Тел. +7(905)085 52 45, e-mail: yliana.savilova@gmail.com),
[3](Тел. +7(920)235 53 77, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru),
[4](Тел. +7(910)6537623, e-mail: yada99@yandex.ru)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ЧЕРЕЗ УЯЗВИМОСТЬ BAD USB

Yakovlev A. V.[1],Savilova U. A.[2], Shibkov D. A.[3], Yakovleva D.A.[4]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. +7(910)8552341, e-mail: yava73@ bk.ru),
[2](Tel. +7(905)085 52 45, e-mail: yliana.savilova@gmail.com),
[3](Tel. +7(920)235 53 77, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru),
[4](Tel. +7(910)6537623, e-mail: yada99@yandex.ru)

DEVELOPMENT OF SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR PENETRATION TESTING THROUGH BAD USB VULNERABILITY

Аннотация. Проводятся аналитический обзор уязвимости Bad USB и разработка программно-аппаратного комплекса для тестирования на проникновение через уязвимость Bad USB. Любое USB-устройство управляется микроконтроллером, который имеет свою микропрограмму. Проведя обратный инжиниринг, можно изменить стандартную микропрограмму устройства на свою собственную и добавить устройству новые незадекларированные возможности. Обнаружение таких модифицированных устройств средствами антивирусного ПО затруднено, так как сканеры вредоносных программ не могут получить доступ к микропрограмме USB-устройства. Зная эту особенность работы USB-контроллеров, и была найдена уязвимость Bad USB.

Ключевые слова: USB-устройство, уязвимость Bad USB, микропрограмма, контроллер Arduino, USB Rubber Ducky.

Abstract. The paper analyzes Bad USB vulnerability and develops the system of hardware and software for penetration testing through the Bad USB vulnerability. Any USB device is controlled by a microcontroller that has its own firmware. By performing reverse engineering, you can change the device's standard firmware to its own and add new undeclared features to the device. Detection of such modified devices by means of anti-virus software is difficult, because malware scanners cannot access the firmware of the USB device. Knowing this feature of the USB-controllers, Bad USB vulnerability was found.

Keywords: USB-device, Bad USB vulnerability, firmware, Arduino controller, USB Rub-ber Ducky.

Введение. На сегодняшней день *USB*-интерфейс является одним из самых распространенных, так как он способен обеспечить удобную и быструю передачу данных. В абсолютном большинстве *USB*-устройств есть микросхема-контроллер, которая вы-

полняет много различных функций, от преобразования напряжения до связи с *USB*-хостом компьютера и обмена с ним различной информацией. А так как разнообразного *USB*-оборудования огромное количество, то производители контроллеров обычно не делают по отдельной уникальной микросхеме каждому устройству, так как это неоправданно дорого. Поэтому стали использовать контроллеры, которые имеют высокую совместимость с различным оборудованием, добавив при этом возможность прошивать внутреннюю память контроллера [1, 2].

Микросхема-контроллер, исходя из прошивки, сообщает компьютеру, что именно к нему было подключено. Зная эту особенность работы *USB*-контроллеров, и была найдена так называемая уязвимость *Bad USB*. Ее суть заключается в том, что злоумышленник может создать специальную микропрограмму для контроллера на каком-либо *USB*-устройстве. Затем, используя специальное ПО, прошить его и тем самым заставить это устройство работать так, как необходимо злоумышленнику [3].

Таким образом, стало понятно, что уязвимости *Bad USB* стоит опасаться. Но необходимо отметить, что возможность прошивки контроллера сама по себе не является уязвимостью. А вот тот факт, что с помощью специального ПО любой желающий может сделать собственную прошивку и в дальнейшем записать эту прошивку на устройство – вот это уже уязвимость.

Аналитический обзор уязвимости Bad USB. По словам исследователей, эту уязвимость настолько сложно устранить, что проще полностью отказаться от работы со стандартом *USB*. Проблема не ограничивается *flash*-накопителями. Все виды *USB*-устройств, от клавиатур до смартфонов имеют драйвера, которые могут быть подвержены той же атаке, что и *flash*-карты. Исследователи проверили это на *Bad USB*-инфицированном *Android*-телефоне. В их опыте телефону удалось выдать себя за клавиатуру и начать вводить команды от ее лица. *Bad USB*-инфицированные машины могут перехватить интернет-трафик, изменить настройки *DNS*. Если *Bad USB*-код находится на телефоне, то телефон может выступать в качестве *MITM*.

Исследование показывает, что *Bad USB*-инфекция может путешествовать как с устройства на компьютер, так и обратно. Каждый раз, когда *flash*-устройство подключено к компьютеру, его прошивка может быть перепрограммирована, и владельцу это будет непросто заметить. Данная проблема настолько обширная, что надо писать не патч, а полностью перерабатывать концепцию *USB*.

Существует несколько видов атак, реализуемых через уязвимость *Bad USB*. Например, такие, как имитация клавиатуры, имитация сетевой карты, *Boot Injection*, выход из виртуального окружения.

Антивирусам очень тяжело бороться с таким типом атак, потому что невозможно фильтровать *USB*-трафик и отличить – может устройство самостоятельно подавать такие команды или же это действие выполняет пользователь.

Небольшие методы защиты все-таки существуют. Они не спасут компьютер от заражения, но могут обезопасить от некоторых разновидностей данной угрозы. Во многих ОС можно ограничить подключение по *USB*, оставив только доступ для определенного круга устройств. А можно полностью запретить использование *USB*-портов. Запрет устанавливается как встроенными средствами операционной системы, так и с помощью дополнительных программ [4].

Разработка программно-аппаратного комплекса для тестирования на проникновение через уязвимость Bad USB. Для того чтобы протестировать информационные системы на уязвимость *Bad USB*, необходимы специальные устройства. Например, *USB Rubber Ducky.*

Оригинальный «*USB Rubber Ducky*» – это *HID*-устройство для инъекций нажатия клавиш, внешне замаскированное под обычный *flash*-накопитель, которое притворяется клавиатурой и при подключении к компьютеру набирает предварительно запрограммированные данные о нажатиях клавиш.

Внутри корпуса *flash*-накопителя в оригинальной версии *USB Rubber Ducky* микропроцессор 60 МГц 32-*bit* на базе платы *Arduino*, позволяющий осуществлять ввод команд со скоростью 1000 символов в минуту, а простой синтаксис языка, предназначенного для предварительного программирования устройства, позволяет даже далекому от кодинга пользователю, за считанные минуты создавать практически любые типы полезных нагрузок, которые будут исполнены на целевой машине автоматически, после подключения данного устройства к *USB*-порту [5, 6].

Для того чтобы рассмотреть больше аспектов уязвимости *Bad USB*, необходимо максимально расширить возможности злоумышленника. Для этого целесообразно разработать программно-аппаратный комплекс на базе контроллера *Arduino*, что позволит добавить модуль беспроводной связи *Wi-Fi*.

В память устройства без удаленного управления можно загрузить лишь один сценарий, который будет выполняться автоматически при подключении к компьютеру жертвы. С данным устройством злоумышленник может выбирать, какой из заранее загруженных скриптов он хочет выполнить.

Разработанный программно-аппаратный комплекс для тестирования на проникновение через уязвимость *Bad USB* включает в себя аппаратную часть в виде устройства *USB Rubber Ducky* и прикладного программного обеспечения, расположенного на компьютере аудитора. Аппаратная часть, компоненты которой представлены на рис. 1, состоит из:

– контроллера *Arduino Pro Micro*, запрограммированного для взаимодействия с компьютером, как клавиатура;

– модуля беспроводной связи *Wi-Fi*, микропрограмма которого предоставляет интерфейс *Web*-сервера.

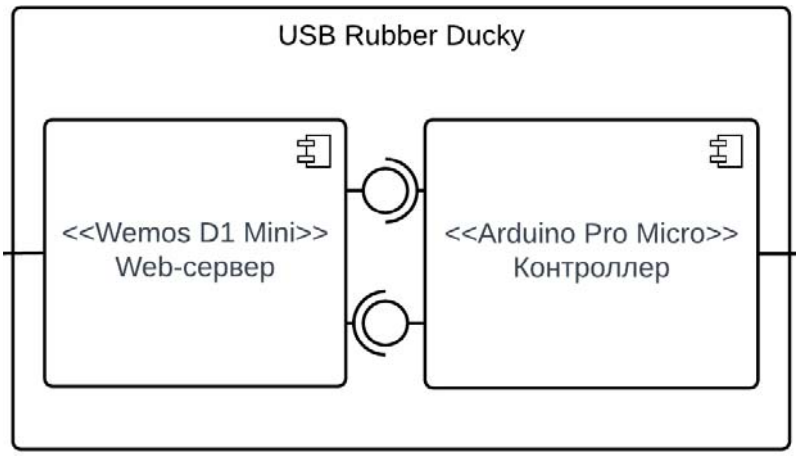


Рис. 1. Аппаратная часть комплекса

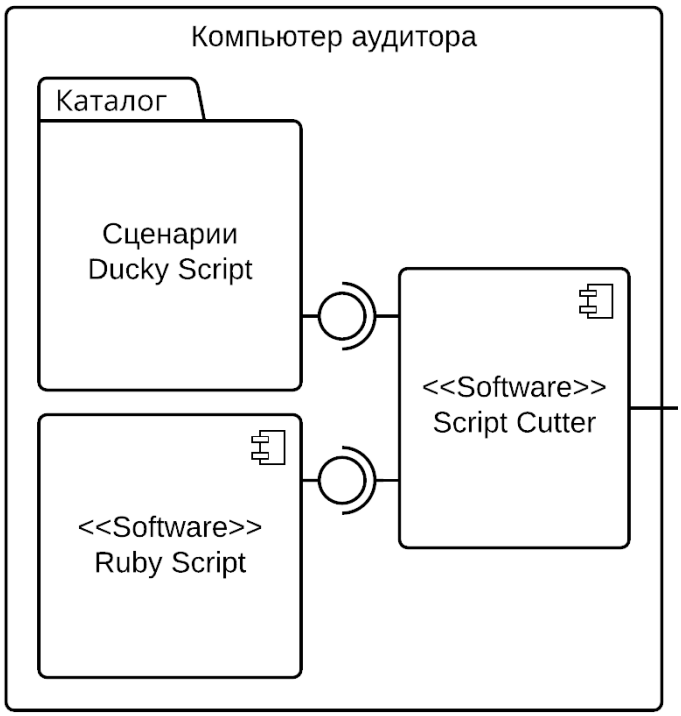


Рис. 2. Программные компоненты комплекса

Программные компоненты комплекса представлены набором прикладного программного обеспечения, как готового, так и разработанного самостоятельно, находящегося на компьютере аудитора (рис. 2):

– каталог скриптов, включающий 4 группы сценариев под ОС *Windows*;

– *Ruby Script*, генерирующий сценарий с нагрузкой *Metasploit* в кодировке *Base*64 для установления реверсивной *TCP*-сессии;

– программа *Script Cutter*, которая приводит файл сценария к виду, пригодному для загрузки на устройство.

На рисунке 3 представлена полная диаграмма компонентов комплекса, которая включает в себя компонент «АРМ» – автоматизированное рабочее место, подлежащее тестированию на проникновение через уязвимость *Bad USB*.

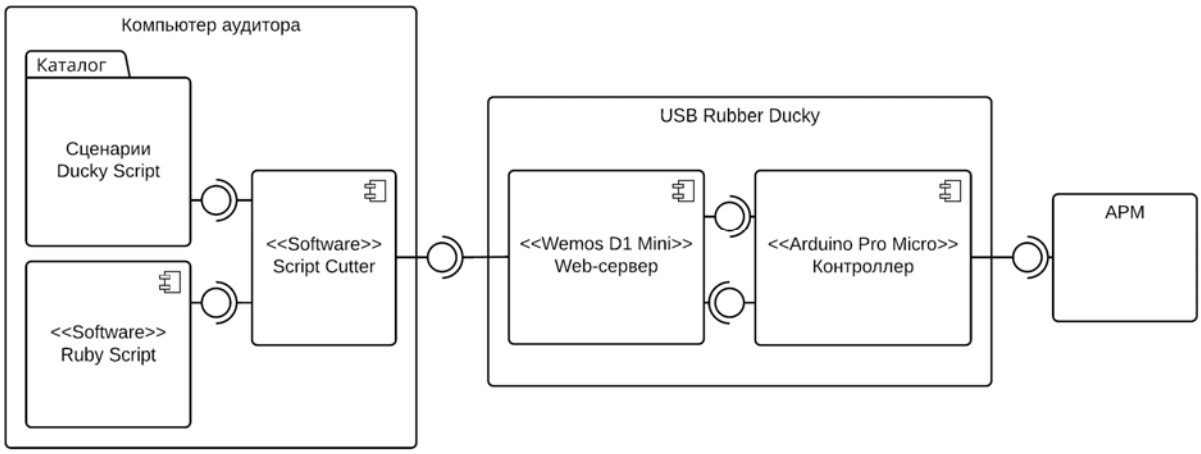


Рис. 3. Диаграмма компонентов комплекса

В данном устройстве был выявлен один недостаток – ограничение на количество символов в скрипте. Их количество не должно превышать 1024 в одном файле. Сами же скрипты могут быть различной длины. Например, скрипт для установления удаленной сессии из-за наличия нагрузки, закодированной по стандарту *Base*64, может включать в себя до 10 000 символов. В связи с этим было принято решение о разработке программы, позволяющей обойти этот недостаток микропрограммы устройства.

Различные компьютеры имеют разные показатели производительности, а значит и *USB*-устройства инициализируются в системе с разной скоростью. На одном компьютере может потребоваться около 3 секунд, а на другом это может занять 15 секунд. При долгой инициализации устройство может начать отправлять команды клавиатуры, которые не определятся компьютером и скрипт выполнится не полностью и некорректно. С данным устройством злоумышленник сам инициирует запуск сценария, когда поймет, устройство подключено, инициализировано и готово к работе. Это гарантирует корректный набор команд скрипта [7].

Некоторые антивирусные программы для ОС *Windows* имеют встроенный модуль для защиты от атак класса *Bad USB*. Таким компонентом защиты обладают *Kaspersky Endpoint Security* 10 и выше, а также *Dr.Web*. Суть защиты заключается в том, что при подключении клавиатуры к компьютеру антивирус запрашивает ввод некоторой строки букв и цифр. Если устройство посылает такой набор нажатий клавиш, значит оно считается безопасной клавиатурой. Этот модуль полностью блокирует устройства *USB Rubber Ducky* без удаленного управления. Но имея возможность посылать устройству нажатия клавиш в онлайн-режиме через *web*-интерфейс, злоумышленник может обойти данную систему защиты.

Вывод. Таким образом, используя разработанный программно-аппаратный комплекс в целях тестирования на проникновение, мы охватываем больший спектр возможностей, доступных злоумышленнику, чем при использовании других вариантов исполнения устройства *USB Rubber Ducky*.

Список использованных источников

1. **Полежаев, П. Н**. «Ахиллесова пята» USB-устройств: атака и защита / П. Н. Полежаев, А. К. Малахов, А. М. Сагитов // Философские проблемы информационных технологий и киберпространства. – 2015. – № 9. – С. 106 – 117.

2. **Bad USB** – как новая атака реализована в разных устройствах [Электронный ресурс]. – URL : http://www.computerra.ru/108106/bad-usb-on-some-device, свободный. – Загл. с экрана.

3. **Чума** на ваши USB [Электронный ресурс]. – URL : http://www.3dnews.ru/825348, свободный. – Загл. с экрана.

4. **Агуров, П. В**. Интерфейс USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 624 с.

5. **USB Rubber Ducky** – Hak5 Gear – HakShop [Электронный ресурс]. – URL : https://hakshop.com/products/usb-rubber-ducky-deluxe, свободный. – Загл. с экрана.

6. **Arduino Micro** – Аппаратная платформа Arduino [Электронный ресурс]. – URL : http://arduino.ru/Hardware/ArduinoMicro, свободный. – Загл. с экрана.

7. **Arduino Micro** – ArduinoStore [Электронный ресурс]. – URL : https://store.arduino.cc/usa/arduino-micro, свободный. – Загл. с экрана.

References

1. **Polezhaev, P. N.** “Achilles' heel” USB-devices: attack and defense / P. N. Polezhaev, A. K. Malakhov, A. M. Sagitov // Philosophical problems of information technologies and cyberspace. – 2015. – № 9. – P. 106 – 117.

2. **Bad USB** – as a new attack is implemented in different devices [Electronic resource]. – URL : http://www.computerra.ru/108106/bad-usb-on-some-device, free. – Ver. from the screen.

3. **Plague** on your USB [Electronic resource]. – URL : http://www.3dnews.ru/825348, free. – Ver. from the screen.

4. **Agurov, P. V.** The interface of USB. The practice of using and programming / P. V. Agurov. – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2006. – 624 p.

5. **USB Rubber Ducky** – Hak5 Gear – HakShop [Electronic resource]. – URL : https://hakshop.com/products/usb-rubber-ducky-deluxe, free. – Ver. from the screen.

6. **Arduino Micro** – Hardware platform Arduino [Electronic resource]. – URL : http://arduino.ru/Hardware/ArduinoMicro, free. – Ver. from the screen.

7. **Arduino Micro** – Arduino Store [Electronic resource]. – URL : https://store. arduino.cc/usa/arduino-micro, free. – Ver. from the screen.

УДК 004.49

Яковлев А. В.[1], Савилова У. А.[2], Шибков Д. А.[3], Яковлева Д. А.[4]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. +7(910)8552341, e-mail: yava73@ bk.ru),
[2](Тел. +7(905)085 52 45, e-mail: yliana.savilova@gmail.com),
[3](Тел. +7(920)235 53 77, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru),
[4](Тел. +7(910)6537623, e-mail: yada99@yandex.ru)

ПРЕДПОСЫЛКИ РЕАЛИЗАЦИИ АТАК КЛАССА «*BAD USB*»

Yakovlev A. V.[1], Savilova U. A.[2], Shibkov D. A.[3], Yakovleva D. A.[4]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. +7(910)8552341, e-mail: yava73@ bk.ru),
[2](Tel. +7(905)085 52 45, e-mail: yliana.savilova@gmail.com),
[3](Tel. +7(920)235 53 77, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru),
[4](Tel. +7(910)6537623, e-mail: yada99@yandex.ru)

BACKGROUND FOR THE IMPLEMENTATION OF THE BAD USB CLASS ATTACK

Аннотация. Приведен аналитический обзор уязвимости Bad USB и технологии USB. Любое USB-устройство управляется микроконтроллером, который имеет свою микропрограмму. С помощью реинжиниринга можно изменить стандартную микропрограмму устройства на собственную, добавив к ней эксплойт. Использование USB-устройства с модифицированной микропрограммой весьма опасно, так как эксплойт запускается в процессе инициализации устройства, а существующие антивирусные решения не могут сканировать служебную область памяти. Такой класс хакерских атак, основанный на уязвимости USB-устройств, получил название Bad USB.

Ключевые слова: уязвимость Bad USB, USB-устройство, управление микроконтроллером, эксплойт, хакерская атака.

Abstract. The paper provides an analytical review of the Bad USB vulnerability and USB technology. Any USB device is controlled by a microcontroller that has its own firmware. With the help of reengineering, you can change the standard firmware of the device to your own, adding an exploit to it. The use of a USB device with modified firmware is very dangerous, since the exploit is launched during the device initialization process, and existing anti-virus solutions cannot scan the service memory area. This class of hacker attacks, based on the vulnerability of USB-devices, was called Bad USB.

Keywords: Bad USB vulnerability, USB device, microcontroller control, exploit, hacker attack.

Введение. На текущий момент *USB*-интерфейс является одним из самых распространенных, так как способен обеспечить удобную и быструю передачу данных. Работу интерфейса обеспечивает *USB*-хост, определяющий подключение и отключение *USB*-устройств, обеспечивающий их питанием, управляющий передачей данных.

Каждое *USB*-устройство управляется микроконтроллером, который имеет свою микропрограмму. Проведя процедуру реинжиниринга, можно изменить стандартную микропрограмму устройства на собственную, добавив к ней эксплойт. Использование

USB-устройства с модифицированной микропрограммой очень опасно, так как эксплойт запускается в процессе инициализации устройства, а существующие антивирусные решения пока не могут сканировать служебную область памяти. Такой класс хакерских атак, основанный на уязвимости *USB*-устройств, получил название *Bad USB* [1].

Некоторые микроконтроллеры *USB*-устройств можно перепрограммировать с компьютера через *USB*-разъем. Записанный в микропрограмму устройства вредоносный код может, например, имитировать клавиатуру, производя необходимые действия за пользователя, или, имитируя сетевое устройство, изменить сетевые настройки *DNS* так, что пользователь будет просматривать интернет-сайты через подконтрольные злоумышленником промежуточные серверы. Имитируя *USB*-носитель, вредоносный код может загрузить и запустить на компьютере с включенным автозапуском вирусную программу. На данный момент существуют готовые реализации *Bad USB*-устройств.

Аналитический обзор технологии *USB*. Стандартная архитектура шины *USB* подразумевает подключение одного или нескольких *USB*-устройств к компьютеру, который является главным управляющим устройством и называется хостом. Шина *USB* является хост-центрической: ведущим устройством, которое управляет обменом, является хост-компьютер, а все присоединенные к ней периферийные устройства – ведомые.

Физическая топология шины *USB* – многоярусная звезда. Ее вершиной является хост-контроллер, объединенный с корневым хабом (*roothub*). Шина допускает до 5 уровней каскадирования хабов.

Логическая топология *USB* – звезда. Для хост-контроллера хабы создают иллюзию непосредственного подключения каждого устройства. В отличие от шин расширения, взаимодействие приложений с устройствами *USB* выполняется только через программный интерфейс [2].

Спецификация *USB* предлагает разработчику несколько вариантов устройств, в зависимости от требуемой скорости обмена данными. Механизм передачи данных является асинхронным и блочным.

Оперирование командами и блоками данных реализуется с помощью логической абстракции, называемой каналом, являющейся логической связкой между хост-контроллером и конечной точкой внешнего устройства (рис. 1).

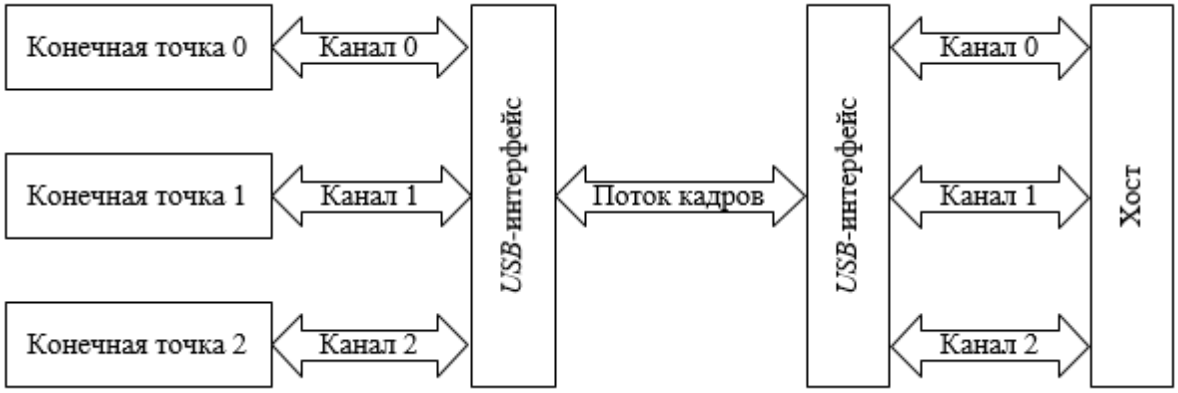


Рис. 1. Каналы данных *USB*

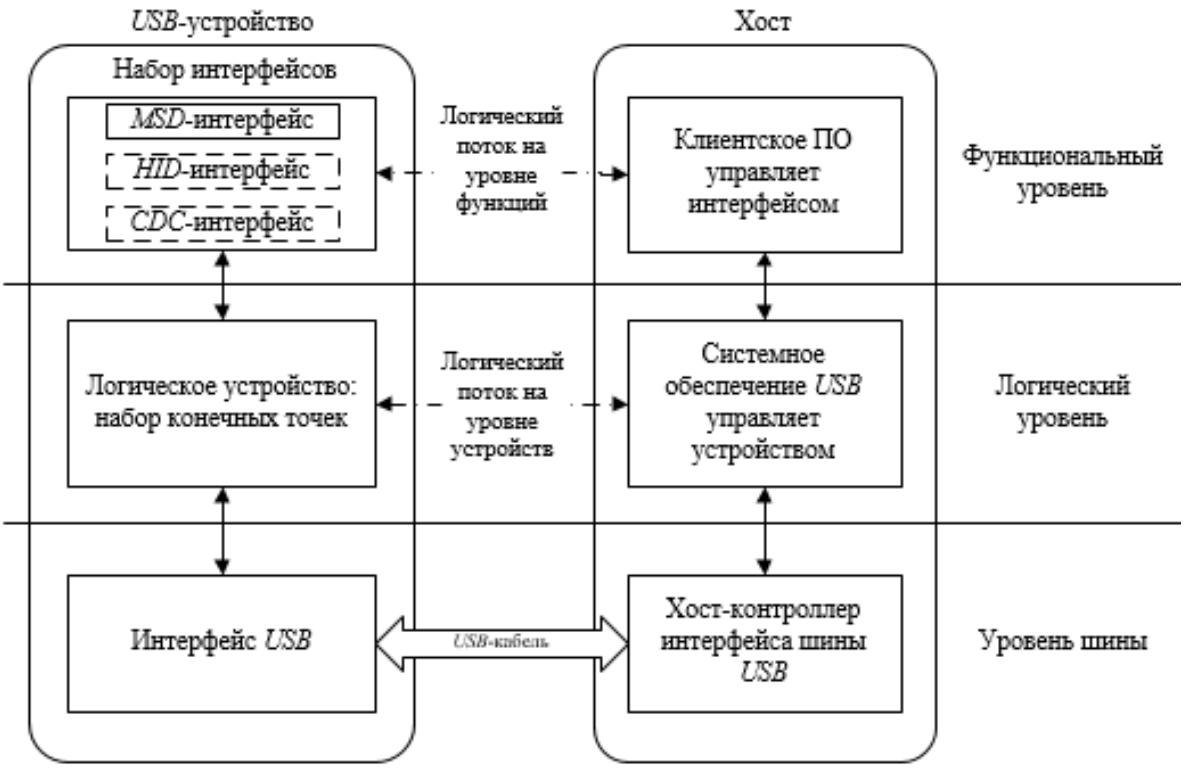


Рис. 2. Взаимодействие компонентов *USB*

Систему *USB* следует разделить на три логических уровня с определенными правилами взаимодействия. Устройство *USB* содержит интерфейсную, логическую и функциональную части. Хост делится на три части – интерфейсную, системную и программное обеспечение. Логическое и реальное взаимодействие между ними показано на рис. 2.

Таким образом, операция обмена данными между прикладной программой и шиной *USB* выполняется путем передачи буферов памяти через следующие уровни [2].

Хост-контроллер интерфейса шины *USB* формирует кадры. Кадры передаются последовательной передачей битов по методу *NRZI*.

Поскольку интерфейс *USB* получил популярность благодаря его *plug-and-play* возможности, которая позволяет использовать устройство без дополнительного программного обеспечения, и небольшому форм-фактору, операционные системы начали поддерживать больше различных типов данных устройств [3].

На конференции *Black Hat USA* 2014 Карстен Нолли и Джейкоб Лелл ввели понятие *Bad USB* и описали суть данной уязвимости в своем докладе «*Bad USB – On Accessories that Turn Evil*» [3]. Так как различные классы устройств могут подключаться к одним и тем же разъемам, то один тип устройства может выдать себя за другой тип, обладающий иными возможностями, без уведомления пользователя. Для этого необходимо всего лишь перепрограммировать чип контроллера *USB* в периферийных устройствах.

Описание уязвимости. Возможны различные варианты использования на практике злоумышленником уязвимости, *USB*-устройство с модифицированной микропрограммой представляется компьютеру жертвы сетевой картой, что позволяет осуществить подмену стандартных *DNS*-адресов и перенаправить весь трафик через свой сервер, получив возможность совершать атаку типа «человек посередине» [4].

USB-устройство с достаточным местом для хранения вредоносного кода, например, флеш-накопитель, может определить момент включения компьютера и в момент определения *BIOS* выдать на загрузку вирус для заражения операционной системы. Это становится возможным благодаря тому, что по поведению хоста при общении с *USB*-микроконтроллером возможно определить операционную систему хоста, в частности ОС *Windows*, *Linux*, *MacOSX*, а также *BIOS* [5].

USB-устройство с модифицированной микропрограммой может использовать возможность повторной инициализации устройства. В этом случае, запускаясь на виртуальной машине, вирус заражает любое подключенное *USB*-устройство. Зараженная микропрограмма выполняет переинициализацию и представляется двумя независимыми устройствами: неким новым и тем, которое уже было подключено к виртуальной машине. Новое устройство автоматически подключается к хостовой ОС, а старое – обратно в виртуальную машину. Так может быть произведен выход за пределы виртуального окружения, т.е. осуществлен переход от клиентской до хостовой ОС.

USB-устройство с модифицированной микропрограммой может выдать себя за клавиатуру и начать отдавать команды от имени пользователя, под которым был выполнен вход в операционную систему. Если был выполнен вход от имени администратора, то устройство получает полный доступ ко всем возможностям операционной системы. По истечении некоторого времени такое устройство начинает отправлять последовательности нажатий клавиш.

На 2014 год, когда была представлена данная уязвимость, список контроллеров, которые можно перепрограммировать, был следующим [5]: *ALCORAU* 698*X*; *PHISONPS* 2251-03; *SMISM* 325*X*/*SM* 326*X*; *Skymedi SK* 62 *XX SK* 66 *XX*; *Solid State System SSS*6677, *SSS*6690 и *SSS*6691; *InnostorIS*903-*A*2, *IS*903-*A*3.

После перепрограммирования доверенные устройства могут эмулировать клавиатуру и выполнять команды от имени зарегистрированного в системе пользователя, например, генерировать бэкдоры, загружать любые файлы из сети Интернет, копировать и удалять файлы, форматировать диски, добавлять программы в автозагрузку и создавать задачи. Кроме того, устройство может эмулировать сетевую карту и изменить настройку *DNS* компьютера для перенаправления трафика (рис. 3).

Широко распространены атаки *Bad USB* с использованием программируемых контроллеров, которые впоследствии могут выдавать себя за различные периферийные устройства: *USB*-носители, *USB*-кабели или *USB*-аксессуары. К этим вариациям добавляется возможность различного запуска вредоносного скрипта: автоматическая (вслепую), по таймеру, по активации с кнопки, удаленно по *Wi-Fi*-соединению и другие.

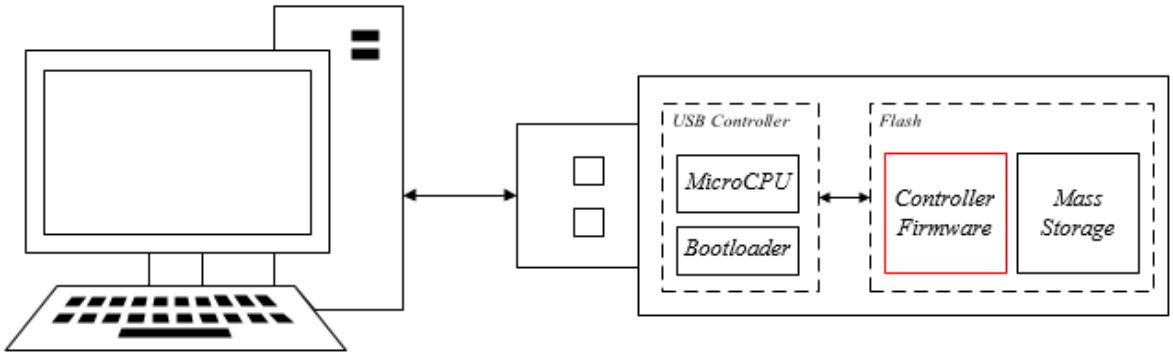


Рис. 3. Описание уязвимости

Существуют как готовые решения таких *USB*-устройств (*Rubber Ducky*), так и возможность создать *Bad USB* на основе контроллеров *Attiny* 85, *ATmega* 328 или *ATmega*168.

Возможные методы защиты. Трудно подобрать эффективную защиту от *USB*-атак. Сканеры вредоносных программ не могут получить доступ к микропрограмме, запущенной на *USB*-устройствах. Поведенческое обнаружение затруднено, так как поведение зараженного устройства может выглядеть так, как будто пользователь просто подключил новое устройство. Возможна подпись микропрограммы производителем оборудования и соответствующая проверка на стороне хоста перед использованием устройства. Еще одним из способов защиты является аппаратная блокировка возможности изменения микропрограммы устройств.

Данные способы защиты реализуются производителями *USB*-устройств, но можно воспользоваться решениями разработчиков антивирусного ПО или методами защиты, встроенными в ОС.

В *Kaspersky Endpoint Security* 10 появился защитный компонент от атак *Bad USB*, имитирующих клавиатуру [6]. Когда компьютеру подключается *USB*-устройство, определенное операционной системой как клавиатура, программа предлагает ввести числовую последовательность длинной 4 символа, изображенную на экране (процедура авторизации клавиатуры). Если цифровой код введен неправильно, программа формирует новый. Число попыток для ввода цифрового кода равно трем. Если цифровой код введен неправильно трижды, или окно «Авторизация клавиатуры» было закрыто, программа блокирует ввод с этой клавиатуры. В 2016 году «Лаборатория Касперского» получила патент на это решение в США [7]. Этот компонент присутствует только в версиях для ОС *Windows* и отсутствует в пакетах для других ОС. В случае удачной или неудачной авторизации в отчет будет добавлена запись о подключении устройства.

*Dr.Web*11 предложил похожее решение на то, что было в *Kaspersky Endpoint Security* 10. Только вместо числа, генерируемого случайным образом, при авторизации программа требует нажать статичную комбинацию клавиш, которую можно легко сэмулировать. Этот компонент защиты присутствует только в версиях для ОС *Windows*.

Рассматривая методы защиты от *Bad USB*, отличные от антивирусного ПО, самым простым методом является физическое отключение *USB*-портов. Это очень неэффективно, так как принесет массу неудобств персоналу, да и полное физическое отключение *USB*-портов проблематично из-за того, что один или два порта находятся непосредственно на материнской плате. Возможно отключение портов через *BIOS*, но не составит никакого труда через тот же *BIOS* их снова включить.

В *Linux*-системах можно использовать менеджер устройств *udev* для создания белого списка *USB*-устройств. Задаваемые пользователем (системой) правила сравниваются со свойствами события и соответствующего устройства, и совпавшее правило (которых может быть несколько) может назвать и создать соответствующий файл устройств, а также выполнить другие программы для инициализации и конфигурации устройства.

В ОС *Windows*7 и выше можно использовать возможности редактора локальной групповой политики, для того чтобы создать белый список *USB*-устройств и применить его ко всем хостам, входящих в домен.

Последние два метода являются наиболее эффективными способами защиты, но и их можно обойти, так как, зная идентификационные параметры легитимных устройств, можно применить их к вредоносному *USB*-устройству.

Заключение. В работе произведен аналитический обзор технологии *USB*, процесс инициализации *USB*-устройств и передачи данных. Технология *USB* обладает уязвимостью, при эксплуатации которой доверенное устройство выполняет действия, которые при нормальном функционировании выполнять не должно. Данная уязвимость достигается путем модификации микропрограммы контроллера, отвечающего за работу *USB*-устройства и получившая название *Bad USB*.

Список использованных источников

1. **Агуров, П. В.** Интерфейс USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с.

2. **Передача** данных по USB [Электронный ресурс]. – URL : http://life-prog.ru/view_apparprog.php?id=67, свободный. – Загл. с экрана.

3. **USB peripheral** scan turn against the iru sers [Электронный ресурс]. – URL : https://srlabs.de/bites/usb-peripherals-turn/, свободный. – Загл. с экрана.

4. **Bad USB** – как новая атака реализована в разных устройствах [Электронный ресурс]. – URL : https://www.computerra.ru/181876/bad-usb-on-some-devices/

5. **В каких** USB-контроллерах есть фатальная уязвимость Bad USB [Электронный ресурс]. – URL : https://xakep.ru/2014/11/17/badusb-v-raznyh-kontrollerah

6. **О защите** от атак Bad USB [Электронный ресурс]. – URL : https://help.kaspersky.com/KESWin/11/ru-RU/97194.htm, свободный. – Загл. с экрана.

7. **Лекарство** от Bad USB [Электронный ресурс]. – URL : https://www.kaspersky.ru/blog/badusb-solved/12425/, свободный. – Загл. с экрана.

References

1. **Agurov, P. V.** The interface of USB. The practice of using and programming / PV Agurov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2004. – 576 p.

2. **Data** transfer via USB [Electronic resource]. – URL : http://life-prog.ru/view_apparprog.php?id=67, free.

3. **USB peripheral** scan turn against the iru sers [Electronic resource]. – URL : https://srlabs.de/bites/usb-peripherals-turn/. – The title. from the screen.

4. **Bad USB** – as a new attack implemented in different devices [electronic resource]. – URL : https://www.computerra.ru/181876/bad-usb-on-some-devices/, free.

5. **In any** USB-controllers there is a fatal vulnerability Bad USB [Electronic resource]. – URL : https://xakep.ru/2014/11/17/badusb-v-raznyh-kontrollerah/, free.

6. **About** protection against Bad USB attacks [electronic resource]. – URL : https://help.kaspersky.com/KESWin/11/ru-RU/97194.htm, free. The title. from the screen.

7. **Medicine** for Bad USB [Electronic resource]. – URL : https://www. kaspersky.ru/blog/badusb-solved/12425/, free. The title. from the screen.

УДК 004.94:631.313.6

Рыжков А. В., Мачкарин А. В.
Белгородский государственный аграрный университет им. В. Я. Горина, Россия,
Белгородский район, п. Майский
(Тел. (4722)381948, e-mail: Ryzhkovbgsha@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКОВОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ С ПРУЖИННЫМ СПИРАЛЬНЫМ КАТКОМ

Ryzhkov A. V., Machkarin A. V.
V. Ya. Gorin Belgorod State Agricultural University, Russia,
Belgorod region, p. Mayskiy
(Tel. (4722)381948, e-mail: Ryzhkovbgsha@yandex.ru)

MODELING OF DISK TILLAGE TOOLS WITH HELICAL STEEL SPRING ROLLER

Аннотация. Совершенствование конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин есть важная задача, направленная на снижение эксплуатационных издержек и повышение качества технологического процесса обработки почвы. Автоматизированные методы разработки и оптимизации почвообрабатывающих рабочих органов являются ключевыми задачами при проектировании. Приводится пример разработки 3D-модели дискового мульчировщика с рифлеными дисками и пружинным спиральным катком с помощью CAD-системы Компас-3D.

Ключевые слова: Совершенствование, система автоматизированного проектирования (CAD), мульчировщик, биологизация, диск, 3D-визуализация.

Abstract. Improving the design of working bodies of tillage machines is an important task aimed at reducing operating costs and improving the quality of the technological process of tillage. Automated methods of development and optimization of tillage working bodies are the key tasks in the design. An example of the development of a 3D model of a disk mulcher with corrugated discs and a spring spiral roller using the Compass-3D CAD system is given.

Keywords: improvement, computer-aided design (CAD), mulch, biologization, disk, 3D-visualization.

В настоящее время к направлениям обработки почвы добавилась биотехнологическая обработка. Она основывается на широком внедрении сидеральных культур, таких как горчица, многолетние травы, эспарцет и др., которые измельчаются и заделываются, а также на внесении микроорганизмов в почву. Данное направление обработки почвы предусматривает широкое использование дисковых рабочих органов, позволяющих вести минимальную обработку почвы, осуществлять ресурсосбережение и внедрять биологизацию земледелия.

Анализ литературных источников показывает, что измельчение сидеральных культур и внесение микроорганизмов в почву наиболее перспективно осуществлять дисковыми рабочими органами [1].

Наиболее перспективной является дисковый мульчировщик с рабочими органами в виде конических волнистых дисков. В сравнении с другими типами дисковых орудий

он является наиболее эффективным при измельчении и заделке остатков и сидератов, производительным, позволяет выполнять несколько операций за один проход.

Существующие дисковые бороны в определенной мере удовлетворяют поставленным требованиям при обработке почвы по стерне различных культур, а также при измельчении и заделке сидеральных культур. Что касается совмещения операций, то они не совсем удовлетворяют поставленным технологическим требованиям [2].

В настоящее время для разработки и оптимизации сложных конструкций почвообрабатывающих машин широкое применение находят автоматизированные методы.

Трехмерное моделирование в различных CAD-системах при решении многих конструкторских задач обладает массой преимуществ: и при проведении прочностных расчетов, и при осуществлении контроля собираемости изделия, и при оптимизации конструкции по массе, и при подготовке технологических процессов. При выполнении 3D-моделей в CAD-системах имеется возможность для быстрого перехода к визуализации фотореалистичных изображений [3, 4].

Из представленного анализа конструкций рабочих органов дисковых борон наиболее перспективными являются вырезные сферические диски.

Дисковый мульчировщик – универсальный агрегат, который должен быть способен к работе в самых экстремальных условиях на всех почвах с влажностью до 28%, клоном поверхности поля до 10° и твердостью почвы в обрабатываемом слое не более 3,5 МПа.

За один проход мульчировщик производит измельчение и заделку сидератов, создает взрыхленный и выровненный слой.

Каждый диск расположен на индивидуальной пружинной стойке. Диск при этом выполняет роль лемеха и отвала, что способствует лучшему обороту отрезаемого пласта, его крошению, а также снижению требуемого тягового усилия трактора. Отсутствие в конструкции дисковых батарей с единой осью позволяет мульчировщику работать во влажную погоду с большим количеством сидератов и растительных остатков толстостебельных культур. При этом исключается наматывание на ось диска растительных остатков и плотное забивание междискового пространства. Благодаря пружинной подвеске режущего узла диск совершает низкочастотные колебательные движения, при которых происходит его самоочистка от налипшей грязи и растительных остатков [3].

Предлагается конструкция дискового мульчировщика с двухрядным размещением рабочих органов на раме (рис. 1). Предполагается, что такое расположение дисковых рабочих органов позволит качественно заделывать и измельчать пожнивные остатки и сидераты.

Предлагаемый дисковый мульчировщик имеет ширину захвата 3,5 метра. Он состоит из рамы *1*, на которой расположены два ряда режущих узлов *2* и *3*. Каждый диск закреплен с помощью крепления на индивидуальной пружинной стойке. Диаметр дисков составляет 620 мм. Угол атаки дисков не регулируется и составляет конструктивно 15°. Угол наклона диска в вертикальной плоскости также не регулируется и принят конструктивно 10°. Расстояние между смежными режущими узлами составляет 250 мм. Межосевое расстояние между соседними рядами дисков составляет 1100 мм. Такое расположение рядов дисков, а также их размер позволяет качественно проводить мульчирование сидератов.

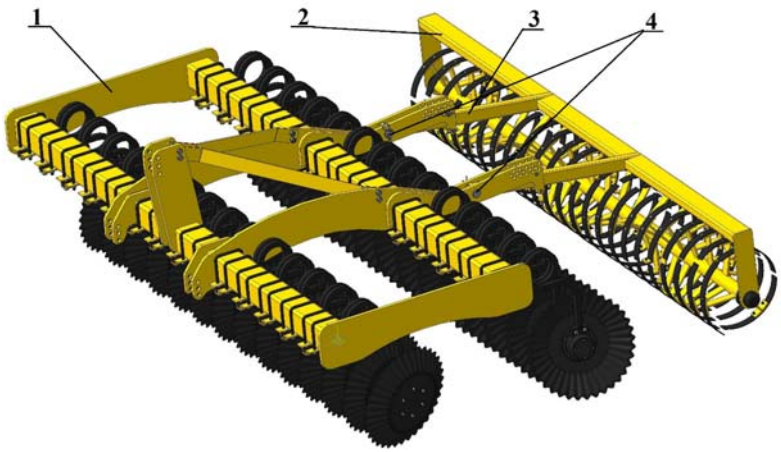


Рис. 1. Дисковый мульчировщик с пружинным спиральным катком:
1 – дисковый мульчировщик; *2* – каток; *3* – кронштейн катка; *4* – ось крепления

При движении машин по полю первый ряд дисков под действием массы мульчировщика врезаются в почву и вращаются. Режущими кромками диски подрезают пласт почвы на требуемую глубину, крошат его и отводят в сторону, измельчая и заделывая сидераты. Следующий ряд дисков разбивает комья, выравнивает поверхность почвы и доизмельчает пожнивные остатки и сидеральные культуры. Применение данного мульчировщика позволит в кратчайший срок и с наименьшими затратами подготовить почву под посев.

Предлагаемый режущий узел (рис. 2) крепится к пружинной стойке *1* болтовым соединением, крепится подшипниковый узел *3* с коническим гофрированным диском *2*.

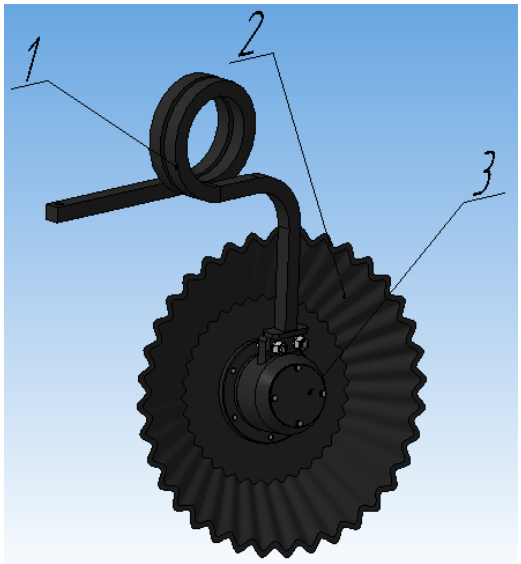


Рис. 2. Режущий узел:
1 – стойка; *2* – диск; *3* – подшипниковый узел

Мы также предлагаем спирально-пружинный каток для дискового почвообрабатывающего агрегата (мульчировщика), состоящий из рамы, на которой крепится пружинный каток [5].

Проектируемый каток в агрегате с дисковым мульчировщиком позволяет получить равномерное распределение растительных остатков по поверхности почвы и аккумулирование влаги в нижних слоях (хорошее развитие корневой системы и повышение урожайности на 12…18%), разуплотнение почвы (в дальнейшем снижается сопротивление при проходе других агрегатов, что ведет к экономии ГСМ, снижению нагрузки на орудия). Этот агрегат является универсальным: в зависимости от состояния и структуры почвы, его рабочие агрегаты взаимозаменяемы.

Проектируемый каток состоит из рамы с кронштейнами, на которой размещен опорно-распределяющий спирально-пружинный каток.

Анализ литературных источников показывает, что распределение и укладка растительных остатков может осуществляться самыми разными видами катков. Однако наиболее эффективно для предлагаемой конструкции будет использование спирально-пружинного катка.

Такая конструкция катка (рис. 3) при закреплении его на рычаге за стойками мульчировщика позволит лучше контролировать глубину хода, осуществлять обратное уплотнение и создавать равномерный слой растительных остатков на поверхности.

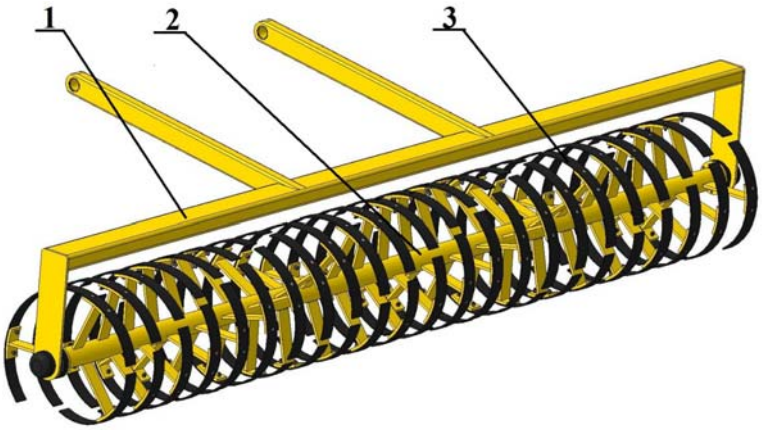


Рис. 3 Спирально-пружинный каток:
1 – рама; *2* – труба; *3* – пружинный элемент

Кроме того, как считают многие ученые в России и за ее пределами, катки такого типа позволяют не только выполнять вышеизложенные операции в агрегате с дисками, но и формировать поверхность почвы и сохранять влагу.

Список использованных источников

1. **Ресурсосберегающая** технология и система машин для производства культур с элементами биологизации / В. М. Рязанов, С. А. Булавин, А. В. Рыжков и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2008. – № 2 (3). – С. 19 – 21.

2. **Сельскохозяйственная** техника Белогорья / С. А. Булавин, В. Н. Любин, А. В. Мачкарин и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 1. – С. 39 – 42.

3. **Зарубежная** сельскохозяйственная техника : монография / А. Н. Макаренко, А. В. Мачкарин, Ю. В. Саенко и др. – Москва ; Белгород : ООО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», 2016. – 200 с.

4. **Зарубежная** сельскохозяйственная техника : учебное пособие / А. Н. Макаренко, А. В. Мачкарин, Ю. В. Саенко и др. – Белгород : Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2015. – 200 с.

5. **Пыркин, А. М.** Обоснование конструкции режущего узла дискатора / А. М. Пыркин, А. В. Рыжков // Моложежный аграрный форум – 2018 : матер. Междунар. студенческой науч.-практ. конф. (20 – 24 марта 2018 г.) : в 2 т. – Майский, 2018. – Т. 2. – С. 90.

References

1. **Ryazanov, V. M.**, Alternative technology and machinery system for production of crops with elements of biologization / V. M. Ryazanov, S. A. Bulavin, A. V. Ryzhkov, and others. / Agricultural machinery and technologies. – 2008. – № 2 (3) March-April. – P. 19 – 21.

2. **Bulavin, S. A.** Agricultural machinery BELOGORIYA / S. A. Bulavin, V. N. Lubin, A. V., Baccarin etc. //Agricultural machinery and technologies. – 2010. – № 1. – P. 39 – 42.

3. **Makarenko, A. N.** Foreign agricultural machinery. Monograph / A. N. Makarenko, A.V. Baccarin, Y. V. Saenko and others. – Moscow ; Belgorod : “Central collector of libraries bibcom”, 2016. – 200 p.

4. **Makarenko, A. N.** Foreign agricultural machinery : Textbook for students of direction of training 35.03.06 “Agroengineering”, profile 1 – Technical systems in agribusiness / A. N. Makarenko, A. V. Baccarin, Y. V. Saenko, etc. – Belgorod : Publishing house of the Belgorod state agricultural UNIVERSITY, 2015. – 200 p.

5. **Pyrkin, A. M.** Justification of the design of the cutting unit disc header / A. M. Pyrkin, A. V. Ryzhkov // Youth agricultural forum-2018 : proceedings of the Int. student science.-prakt. confer. (20 – 24 March 2018) : in 2 v. – 2018. – V. 2. – P. 90.

УДК 629.7.062.3

Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов,
(Тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

СТРУЙНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ПРИВОДОМ

Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

JET CONTROL SYSTEM FOR STEPPER DRIVES

Аннотация. Рассмотрена возможность применения струйной системы управления шаговым гидравлическим приводом.

Ключевые слова: струйная система управления, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. The possibility of using a jet control system for a stepper hydraulic drive is considered.

Keywords: jet control system, hydraulic stepper motor, hydraulic generator pulses.

Для обеспечения регулирования величины передаточного отношения и возможности нарезания зубчатых колес с произвольно заданным числом зубьев одним из возможных путей реализации является использование средств струйной техники.

Известно применение электрических шаговых двигателей при построении струйной системы управления приводом механизмов, однако они имеют малую динамику.

Задачи, решаемые с помощью шагового привода, разнообразны. Шаговые двигатели устанавливают в устройствах и механизмах, требующих высокой надежности и точности: когда требуется позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением [1].

Структурно схема состоит из следующих блоков (рис. 1):

- шаговых двигателей *1* и *2*;
- микроконтроллера;
- интерфейса управления;
- драйверов управления *1* и *2*;
- датчиков положения *1* и *2*;
- импульсного источника питания;
- компьютерной клавиатуры.

Струйная (пневматическая) система управления силовым исполнительным двигателем шагового гидропривода в гидромеханических связях при применении во внутренних цепях металлорежущих станков различного технологического назначения по-

зволит осуществить регулирование передаточного отношения цепей обката (деления), винторезных цепей, цепей затылования и обеспечить настройку станков на обработку изделий с произвольно заданными параметрами (числа зубьев, шаг резьбы).

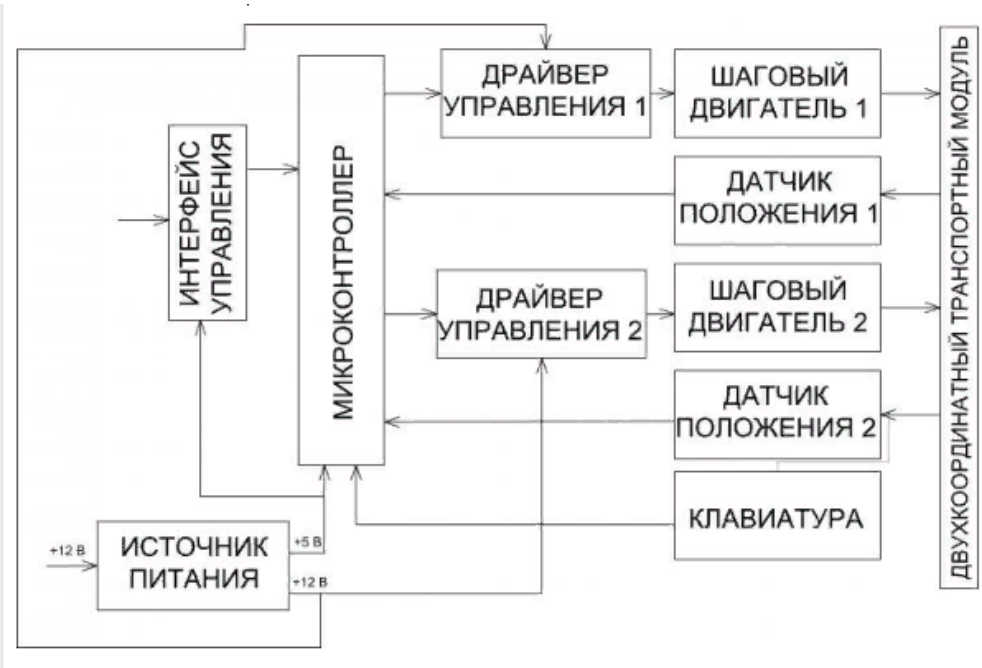


Рис. 1. Структурная схема системы управления шаговым двигателем [1]

Долговечность струйных элементов и систем управления определяется подбором соответствующего материала. Струйные элементы могут изготавливаться из металла или порошковых материалов, в этом случае долговечность их становится практически неограниченной.

Преимуществом струйных систем управления является их низкая стоимость, простота их настройки и небольшие затраты при эксплуатации, полная безопасность работы с ними, отсутствие опасности аварийного выхода из строя дорогостоящих узлов и блоков.

Элементы пневмоники могут работать в помещениях с повышенной запыленностью, влажностью, а при соответствующем выборе материала – в кислотной и щелочной средах. Струйным элементам и приборам свойственна стойкость к температурным воздействиям. Созданы струйные элементы, работающие при температуре до 2000 °С. При правильном выборе материала и принятии мер против выпадения конденсата и обледенения каналов обеспечивается работоспособность струйных устройств при низких температурах до –50 °С и ниже. Струйные элементы и устройства хорошо переносят вибрацию. Стойкость к воздействию электрических и магнитных полей определяется самой природой рабочей среды (воздуха). Стойкость к радиационному воздействию позволяет использовать пневмонику в зонах высокой радиоактивности, где остальные элементы вообще не способны функционировать. Быстродействие струйных элементов уже сейчас в десятки раз выше электромеханических элементов (реле) и в сотни раз

выше быстродействия пневматических элементов с механическими подвижными частями. Однако скорость передачи сигналов ограничена скоростью распространения звука в воздухе. Поэтому пневмоника не может конкурировать с электроникой, в тех случаях, когда требуется за короткий промежуток времени обработать много информации. Но в системах управления различными технологическими операциями, системах контроля некоторых производственных процессов и т.д., где особое значение приобретает высокая надежность, а требуемое быстродействие не превышает возможностей струйных элементов, пневмоника находит широкое применение.

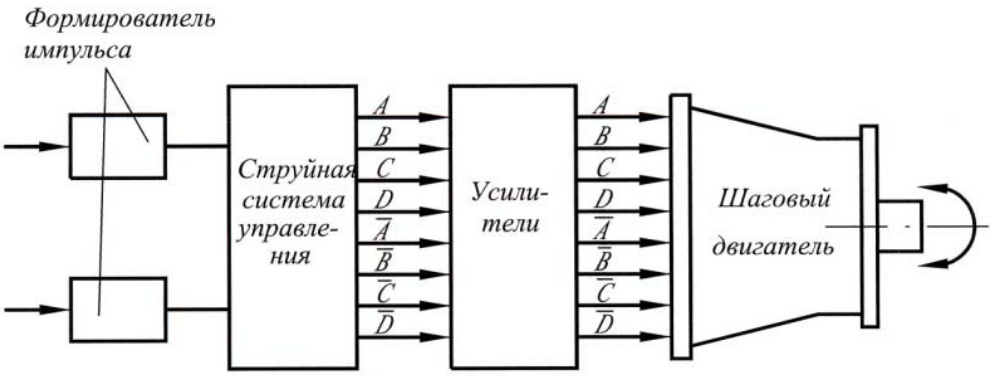
Схема привода с дискретным регулированием направления действия потока рабочего тела позволяет исключить влияние инерции быстровращающихся частей управляющего двигателя и газораспределительного валика из цепи управления при разгоне и торможении. В этой схеме изменения направления вращения волны деформации (действие потока рабочего тела) осуществляется заменой валика, вращающегося в одну сторону – валиком, вращающегося в противоположную сторону – путем совместного поступления перемещения газораспределительных валиков, например с помощью газового цилиндра, пневмораспределительного устройства типа «струйная трубка» (рис. 2) и электрического преобразователя.

Схемы привода с регулированием направления действия всего потока с использованием газораспределительного валика являются наиболее простыми в реализации. Однако наибольшими возможностями обладают приводы, построенные на базе шаговых двигателей.

Управление двигателем, в котором каждый цилиндр подключен к двухпозиционному клапану, может осуществляться либо от электронного коммутатора, либо непосредственно от выходных устройств. При соответствующих алгоритмах коммутации обмоток управление клапанов можно регулировать скорость вращения выходного вала за счет изменения частоты последовательности переключения цилиндров; величину шага за счет изменения чередования последовательности цилиндров или дробления величины подаваемого давления в цилиндр; передаточное отношение волновой передачи за счет изменения числа волн деформации гибкого колеса; развиваемое усилие за счет подключения различного числа одновременно включенных цилиндров или за счет изменения величины подаваемого в цилиндры давления.

Привод с таким шаговым двигателем позволяет в системах с изменяющейся нагрузкой осуществить ее перемещение с большой скоростью (большим шагом) до заданного положения, осуществлять фиксированный останов и доворот на малые углы при минимальном расходе рабочего тела. Сложность рассматриваемого двигателя заключается в большом количестве пневмораспределительных устройств. Однако если уменьшить число регулируемых параметров, таких как количество волн деформации и количество цилиндров, одновременно создающих воздействие для деформации гибкого колеса, то число распределительных устройств существенно уменьшается [2].

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.



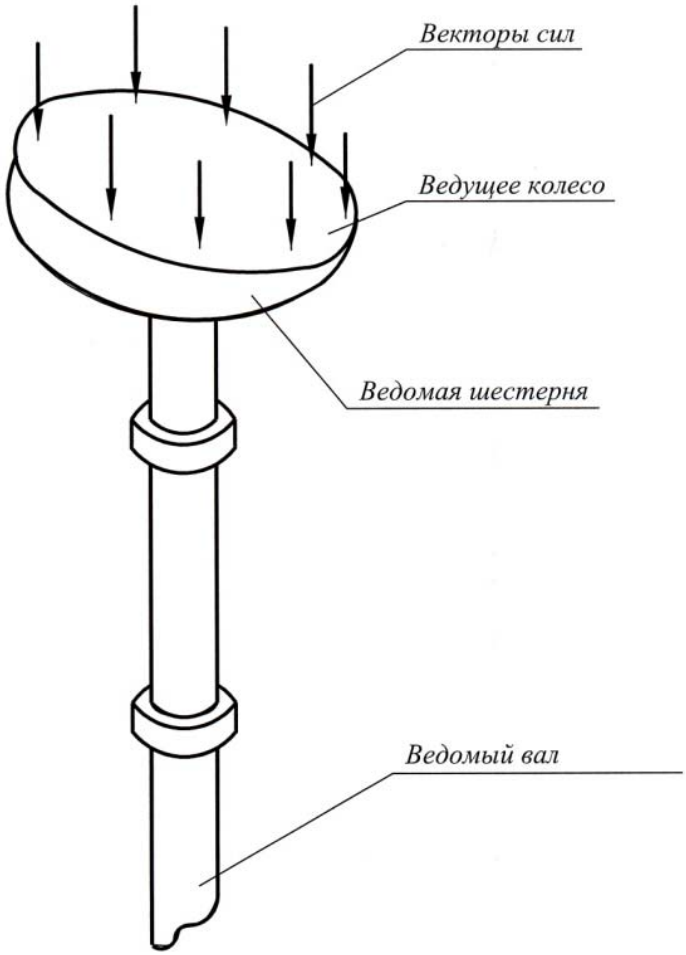


Рис. 2. Струйная система управления шаговым приводом

Список использованных источников

1. **Губанова, А. А.** Система управления шаговым двигателем / А. А. Губанова, А. С. Гузаревич, Н. Е. Таридонов // Электроника и электротехника. – 2018. – № 2. – С. 41 – 47.

2. **Ванин, В. А.** Кинематические связи в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода : монография / В. А. Ванин, С. В. Мищенко, О. Н. Трифонов. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 328 с.

3. **Ванин, В. А.** Оптимальное построение структуры внутренних цепей станков на основе гидравлических связей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, Д. А. Харин ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – С. 363 – 368.

4. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

References

1. **Gubanov, A. A.** Taridonov Control system stepper motor / A. A. Gubanov, A. S. Gusarevich, N. E. Taridonov // Electronics and electrical engineering. – 2018. – № 2. – P. 41 – 47.

2. **Vanin, V. A.** Kinematic communications in metal-cutting machines on the basis of a hydraulic step drive / V. A. Vanin, S. V. Mishchenko, O. N. Trifonov– M. : Publishing House “Mechanical Engineering-1”, 2005. – 328 p

3. **Vanin, V. A.** Optimal construction of the structure of internal chains of machines based on hydraulic connections / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, D. A. Kharin ; under the General editorship of doctor of technical Sciences, Professor V. A. Nemtinov // Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the international scientifically-practical conference. – Tambov : Publishing house FGBOU VPO “TSTU”, 2015. – P. 363 – 368.

4. **Vanin, V. A.** Machines with a hydraulic internal (formative) relationships based on hydraulic stepper for processing spiral surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

УДК 621.914.7: 621.833

Колодин А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов
(тел. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

ОПТИМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННИХ ЦЕПЕЙ СТАНКОВ

Kolodin A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(tel. (4752)630618, e-mail: dekorkan@yandex.ru)

OPTIMAL CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE OF THE INTERNAL CHAINS OF MACHINES

Аннотация. Разработка и построение рациональной конструкции кинематических цепей металлообрабатывающих станков и других технологических машин по металлоемкости, функциональной точности и другим показателям является сложной задачей, решение которой может дать большой технико-экономический эффект для производства вследствие экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Ключевые слова: оптимальное построение, металлорежущий станок, шаговый гидравлический двигатель, генератор гидравлических импульсов.

Abstract. Development and construction of a rational design of kinematic chains of machine tools and other technological machines for metal consumption, functional accuracy and other indicators is a complex task that can give great technical and economic effect due to savings in material, energy and labor.

Keywords: optimum design, metal-cutting machine, hydraulic stepper motor, hydraulic generator pulses.

Основными показателями при выборе металлорежущего оборудования для выполнения конкретных задач являются точность и производительность. Так, при постоянно растущем требовании повышения качества обработки и одновременном увеличении производительности не все оборудование, даже самое современное, может удовлетворить данным условиям. Поэтому приходится искать новые решения поставленной задачи.

Точность обработки определяется относительными перемещениями заготовки и инструмента, а также другими факторами, влияющими на требуемые размеры и формы, а также относительного расположения обрабатываемых поверхностей.

Производительность определяется принятым технологическим процессом, степенью его автоматизации, особенностями конструкции станка и характеристиками его динамической системы.

Требуемые качества станка могут быть обеспечены только при учете динамических процессов, происходящих во время работы, учете упругости и других динамических характеристик.

Кинематические цепи с механическими звеньями обладают тем достоинством, что дают возможность получить весьма точное передаточное отношение выходных звеньев и

не требует дополнительных перенастроек в процессе работы. Однако внутренние цепи с механическими звеньями при большой их протяженности становятся громоздкими и поэтому не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность работы станка.

Наиболее существенным недостатками кинематических цепей, составленных из механических звеньев, являются:

– громоздкость и значительная протяженность кинематических цепей, особенно при сложном пространственном расположении рабочих органов и при большом расстоянии между исполнительными органами станка;

– кинематические цепи из механических звеньев имеют не постоянную жесткость, так как крутильная жесткость определяется протяженностью цепи и жесткостью стыков в кинематических парах;

– индивидуальное проектирование и построение внутренних кинематических цепей под каждую отдельную компоновку станка одного и того же типа и назначения, но разного габарита.

Этим объясняется, что в последнее время в качестве кинематических связей делаются попытки вместо традиционных связей применить цепи с немеханическими элементами, используя для этих цепей гидравлические, электрические, электронные связи и их комбинации.

Одним из возможных решений могли бы служить гидравлические связи на основе гидравлического шагового привода, выполненного по разомкнутой схеме без применения датчиков обратной связи.

Гидравлический шаговый привод способен устойчиво отрабатывать релейные и импульсные управляющие сигналы с высокой точностью при практически любой встречающейся нагрузке.

Структурно шаговый гидропривод (рис. 1) можно представить в виде трех элементов: источника рабочей жидкости, управляющего устройства, которое формирует управляющие импульсы и распределяет их по рабочим камерам гидравлического шагового двигателя (ГШД).

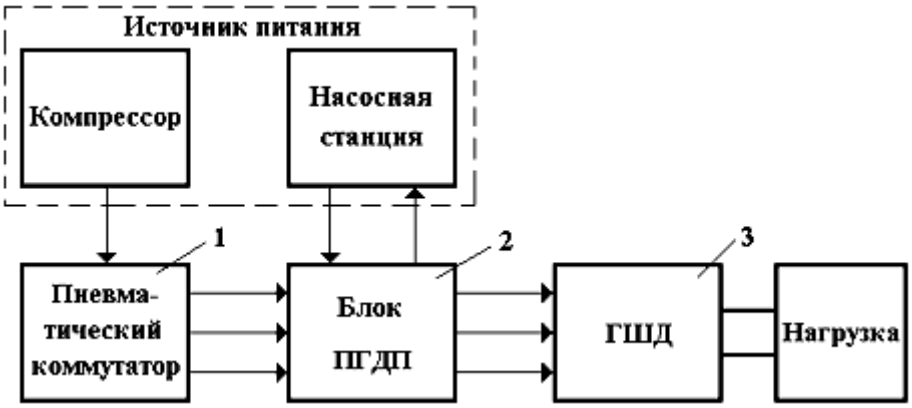


Рис. 1. Структурная схема гидравлического шагового привода

Работа ГШД зависит от числа и последовательности управляющих импульсов, распределение которых по силовым рабочим камерам шагового гидродвигателя осуществляется с помощью различного вида коммутирующих устройств, причем каждому управляющему импульсу соответствует определенный фиксированный угол поворота

выходного звена ГШД. Скорость вращения и суммарный угол поворота выходного вала пропорциональна соответственно частоте и количеству поданных управляющих импульсов.

Связь между заготовкой и инструментом осуществляется благодаря тому, что расход рабочей жидкости посредством рабочих щелей распределительного устройства преобразуется в определенную последовательность гидравлических импульсов. Они распределяются по силовым камерам шагового гидродвигателя, при этом каждому из них соответствует определенный угол поворота выходных валов ГШД, пропорционально числу импульсов, а скорость вращения пропорциональна частоте их следования. Передаточные отношения между исполнительными органами гидравлической связи – заготовкой и инструментом – зависит от соотношения частот гидравлических импульсов, подаваемых к шаговым гидродвигателям.

Поскольку для воспроизведения образующей линии по методу обката между перемещениями рабочих органов – заготовки и инструмента – необходимо осуществить требуемую функциональную зависимость, а для получения формообразующего движения необходимо обеспечить жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом, то в этом случае из всех видов шаговых гидродвигателей наиболее приемлемыми для построения внутренних кинематических цепей являются двигатели с механической редукцией шага [1 – 3].

Гидравлический шаговый двигатель представляет собой конструкцию аксиально-плунжерного двигателя вращательного движения. Конструктивно он отличается от обычной аксиально-плунжерной машины тем, что не имеет внутреннего узла распределения рабочей жидкости, а вместо наклонной шайбы применяется ротор, на торцевой поверхности которого расположен ряд кулачков. Применение их вместо одной наклонной шайбы позволяет за счет изменения угла подъема профиля кулачков ротора увеличить, при прочих равных условиях, крутящий момент на выходном валу ГШД. Каждый в отдельности из этих кулачков выполняет роль наклонной шайбы обычной плунжерной машины.

Конструктивно ГШД состоит из корпуса, в который смонтирован на подшипниках качения приводной вал, на котором закреплен ротор, имеющий с торца кулачки, взаимодействующие с толкателями. Ротор в развертке представляет собой зубчатую гребенку, толкатели смещены друг относительно друга на одну треть шага гребенки. Толкатели свободно перемещаются в расточках статора. Статор прижимается к корпусу крышкой, в которой имеются отверстия под штуцеры трубопроводов. Под воздействием гидравлического импульса толкатель перемещается, взаимодействуя со скосом кулачка ротора, поворачивая последний на определенный угол. Особенностью двигателя является то, что при отсутствии перемещения ротор жестко фиксируется толкателями во впадинах между кулачками, чем обеспечивается самоторможение системы. Направление вращения двигателя в ту или другую сторону определяется выбранным порядком действия гидравлических импульсов [4].

Используя высокие компоновочные свойства гидравлического шагового привода представляется возможным применить принципиально новый подход к построению внутренних кинематических цепей, требующих точного взаимосвязанного движения заготовки и инструмента. Осуществление на их основе агрегатно-модульного принципа построения внутренних цепей металлорежущих станков позволяет не конструировать

кинематические цепи, а компоновать их из небольшого, экономически обоснованного, количества типоразмеров одинаковых типовых общих блоков (модулей), имеющих функциональную и конструктивную завершенность.

Используя блочное (модульное) построение гидравлического шагового привода, представляется возможным применить гидравлические связи на его основе при построении внутренних цепей металлорежущих станков различного технологического назначения и разных типоразмеров. Это в первую очередь относится к металлорежущим станкам, таким как зубо- и резьбообрабатывающие, имеющим сложное пространственное расположение рабочих органов при значительном расстоянии между ними.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Номер проекта 17-48-680787.

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Кинематическая структура металлорежущих станков со сложными движениями формообразования с внутренними гидравлическими связями / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Технология машиностроения. – 2015. – № 5(155). – С. 18 – 26.

2. **Ванин, В. А.** Оптимальное построение структуры внутренних цепей станков на основе гидравлических связей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, Д. А. Харин ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – С. 363 – 368.

3. **Ванин, В. А.** Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 7(184). – С. 30 – 35.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (327). – 2018.

References

1. **Vanin, V. A.** Kinematic structure of machine tools with complex movements forming relationships with internal hydraulic / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Mechanical engineering technology. – 2015. – № 5(155). – P. 18 – 26.

2. **Vanin, V. A.** Optimal construction of the structure of internal chains of machines based on hydraulic connections / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, D. A. Kharin ; under the General editorship of doctor of technical Sciences, Professor V. A. Nemtinov // Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials of the international scientifically-practical conference. – Tambov : Publishing house FGBOU VPO “TSTU”, 2015. – P. 363 – 368.

3. **Vanin, V. A.** Machines with a hydraulic internal (formative) relationships based on hydraulic stepper for processing spiral surfaces / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Directory. Engineering with applications journal. – 2012. – № 7(184). – P. 30 – 35.

4. **Obukhov, A. D.** Structural model of control system for hydraulic stepper motor comple / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. N. Kolodin // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017. 4 – 6 December 2017, Tomsk, Russian Federation/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (327). – 2018.

УДК 66.048.3.069.833

Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Шибитова Н. В.,
Романенко М. Д., Залипаева О. А.
Волгоградский технический университет, Россия, г. Волгоград
(Тел. 89177234615, e-mail: natasha292009@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ

Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Shibitova N. V.,
Romanenko M. D, Zalipayeva O. A.
Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd
(Tel. 8917723461, e-mail: natasha29200@yandex.ru)

SIMULATION OF THE PROCESS OF RECTIFICATION WITH THE ACCOUNT OF LONGITUDINAL DIFFUSION

Аннотация. Аналитически выведены уравнения рабочих линий укрепляющей и исчерпывающей частей ректификационной колонны с учетом продольной диффузии, которые при числе Пекле продольной диффузии $Pe \to \infty$ или коэффициенте продольной диффузии $De \to 0$ переходят в известные уравнения рабочих линий для структур потоков идеального вытеснения по обеим фазам.

Ключевые слова: продольная диффузия, число Пекле, уравнения рабочих линий, ректификация, структура потока, продольное перемешивание, идеальное вытеснение, скачок концентраций на входе.

Abstract. The equations of the working lines of the reinforcing and exhaustive parts of the distillation column are analytically derived, taking into account the longitudinal diffusion, which, when the longitudinal diffusion number $Pe \to \infty$ or the longitudinal diffusion coefficient $De \to 0$, is transformed into the known equations of the working lines for the flow patterns of ideal displacement in both phases.

Keywords: longitudinal diffusion, Pecle number, working line equations, rectification, flow structure, longitudinal mixing, ideal displacement.

Известные типовые модели структуры потоков в насадных ректификационных колоннах основаны на идеальном вытеснении обеих фаз по всей высоте колонны [1, 2]. Соответственно этой физической модели выведены на основании материального баланса аналитические уравнения рабочих линий укрепляющей и исчерпывающей частей колонны, представляющие собой линейные зависимости связи концентраций легколетучего компонента в паровой и жидкой фазах, которые являются основой для расчетов минимального флегмового числа, числа теоретических тарелок, оптимального флегмового числа и геометрических размеров насадочных и тарельчатых ректификационных колонн.

Нивелировать эти отклонения реальной структуры потоков от идеального вытеснения можно учетом КПД тарелки, кинетическими кривыми, учитывающими степень использования локальной движущей силы, эмпирическими зависимостями, связанными с высотой теоретической тарелки (ВЭТТ) или высотой единицы переноса насадки (ВЕП) [2].

Целью статьи является аналитический вывод на основании материального баланса уравнений рабочих линий укрепляющей и исчерпывающей частей ректификационной колонны, учитывающих продольную диффузию паровой и жидкой фаз, и анализ этих уравнений на минимальное флегмовое число, число теоретических тарелок, оптимальное флегмовое число и геометрические размеры ректификационной колонны.

Выведем уравнение рабочей линии для исчерпывающей части колонны с учетом продольной диффузии в паровой фазе.

Выделяем снизу колонны на расстоянии *z* от опорной решетки насадки (где пар входит в насадку) сечение *I–I* (рис. 1).

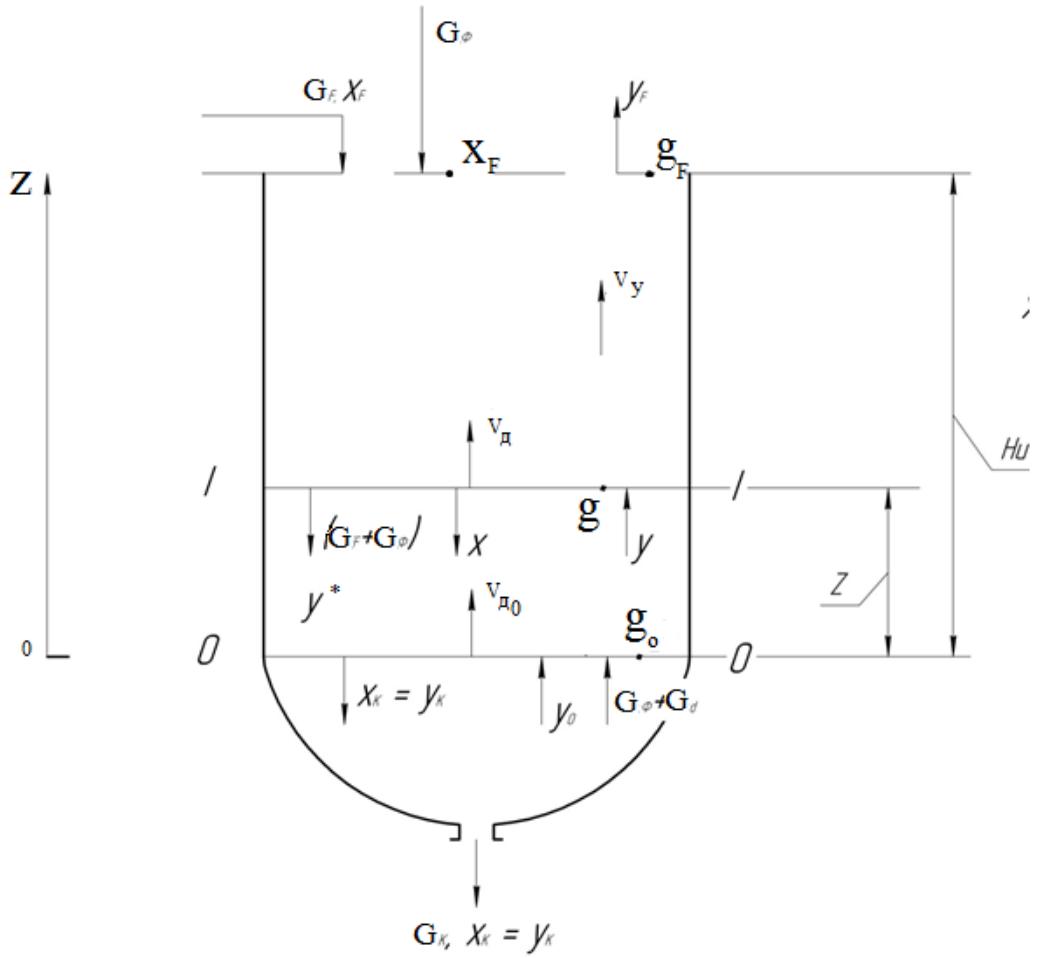


Рис. 1. Схема ректификации в исчерпывающей части колонны с материальными потоками и концентрациями легколетучего компонента в паровой и жидкой фазах с учетом продольной диффузии по паровой фазе

Для упрощения записи полагаем, что расходы соответственно исходной смеси G_F, флегмы $G_ф$ и дистиллята G_d $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с}}\right]$.

$$\left(G_F+G_ф\right)\cdot x+\left(G_ф+G_d\right)\cdot y_0+\frac{V_{D_0}\cdot S\cdot \rho_д}{M_д}=\left(G_F+G_ф\right)\cdot x_K+\left(G_ф+G_d\right)\cdot y+\frac{V_D\cdot S\cdot \rho_д}{M_д}.$$

Здесь в левой части материального баланса приход легколетучего компонента в выделенном объеме между сечениями *O–O* и *I–I*, в правой – его расход. Скорость

продольной диффузии по паровой фазе можно записать в виде модифицированного закона Фика [3, 4]

$$V_D = -De \cdot \frac{dy}{dz}, \tag{1}$$

где De – коэффициент продольной диффузии по паровой фазе.

Тогда связь y и x может быть представлена после алгебраических преобразований уравнением

$$y = y_0 + \left[\frac{(G_F + G_\Phi)}{(G_\Phi + G_d)}\right] \cdot (x - x_K) - \frac{S \cdot \rho_\partial \cdot \left[\left(\frac{dy}{dz}\right)_0 - \left(\frac{dy}{dz}\right)\right] \cdot De}{M_\partial \cdot (G_\Phi + G_d)}.$$

Разделим выражение в квадратных скобках второго слагаемого на G_d и имея в виду для третьего слагаемого уравнение неразрывности, из которого следует выражение для фиктивной скорости пара:

$$V_y = \frac{(G_\Phi + G_d) \cdot M_\partial}{\rho_\partial \cdot S},$$

а также переходя к безразмерной координате по высоте $h = \frac{z}{H}$, получаем

$$y = y_0 + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x - x_K) - \frac{[g_0 - g]}{Pe},$$

где $g = \frac{dy}{dx}$ и $g_0 = \left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=0}$, $Pe = \frac{V_y \cdot H}{De}$ – число Пекле по паровой фазе.

При h = 1, т.е. при $z = Hu$ на входе исходного раствора в исчерпывающую часть колонны $x = x_F$, $y = y_F$, $g = g_F$:

$$y_F = y_0 + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x_F - x_K) - \frac{(g_0 - g_F)}{Pe}.$$

Из известного граничного условия на входе для диффузионной модели следует

$$h = 0, \quad y_K = y_0 - \frac{g_0}{Pe}. \tag{2}$$

Тогда, подставляя значение y_0 в уравнение материального баланса, получаем

$$y_F = y_K + \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x_F - x_K) + \frac{g_F}{Pe}.$$

Но из материального баланса всей исчерпывающей части колонны:

$$(R + 1) \cdot (y_F - y_K) = (F + R) \cdot (x_F - x_K), \text{ т.е. градиент } g_F = \left(\frac{dy}{dh}\right)_{h=1} = 0.$$

Окончательное уравнение рабочей линии исчерпывающей части насадочной ректификационной колонны с учетом продольной диффузии по паровой фазе принимает вид

$$y = y_K = \left(\frac{F + R}{R + 1}\right) \cdot (x - x_K) + \frac{g}{Pe} \tag{3}$$

с граничными условиями:

$$h = 0, \qquad y_0 = y_K + \frac{g_0}{Pe}; \qquad h = 1, \qquad g_F = 0. \tag{4}$$

Как видно, уравнение (3) в общем случае является нелинейным и переходит в типовое линейное уравнение рабочей линии исчерпывающей части ректификационной колонны, соответствующее идеальному вытеснению по обеим фазам, при $Pe \to \infty$ или $De \to \infty$.

Аналогично выводятся уравнения рабочей линии по паровой фазе для укрепляющей части колонны (рис. 2).

В этом случае уравнение рабочей линии укрепляющей части ректификационной колонны с продольной диффузией по пару приобретает вид

$$y = y_F + \frac{R}{R+1} \cdot (x - x_F) + \frac{1}{Pe} \cdot g \tag{5}$$

с граничными условиями:

$$h = 0, \qquad y_F = y_H - \frac{1}{Pe} \cdot g_H; \qquad h = 1, \qquad g_d = 0. \tag{6}$$

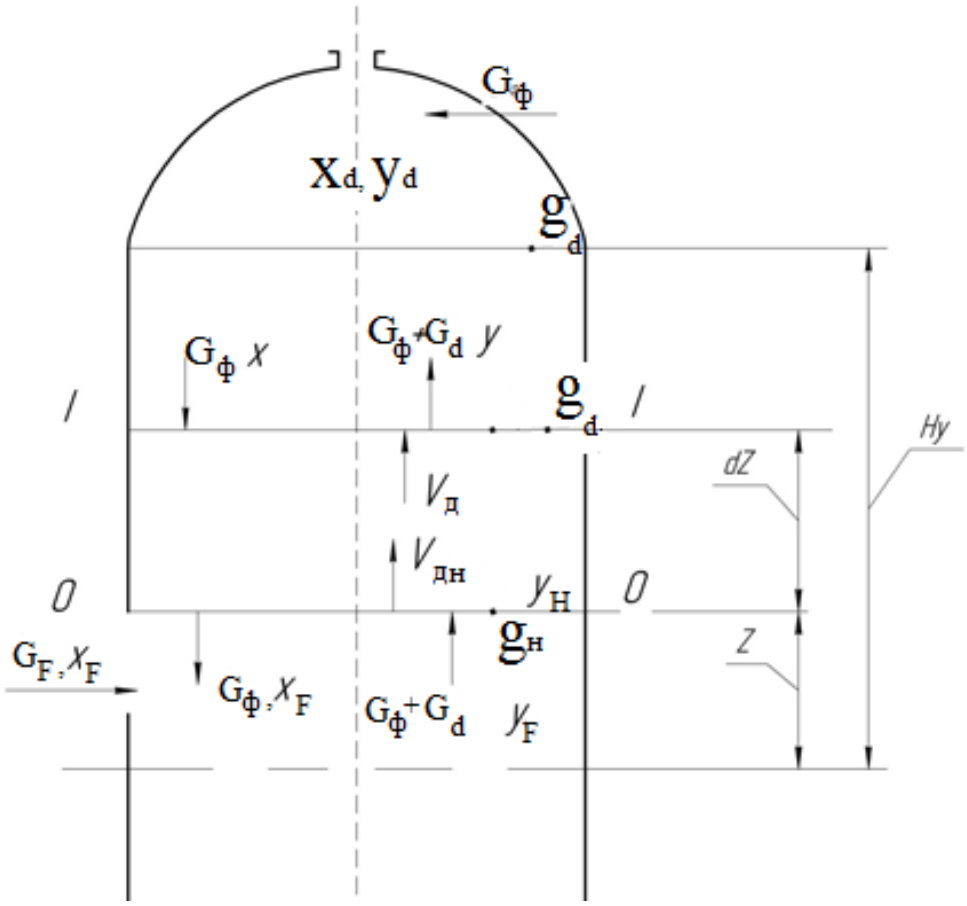


Рис. 2. Схема ректификации в укрепляющей части колонны с материальными потоками и концентрациями легколетучего компонента в паровой и жидкой фазах с учетом продольной диффузии по паровой фазе

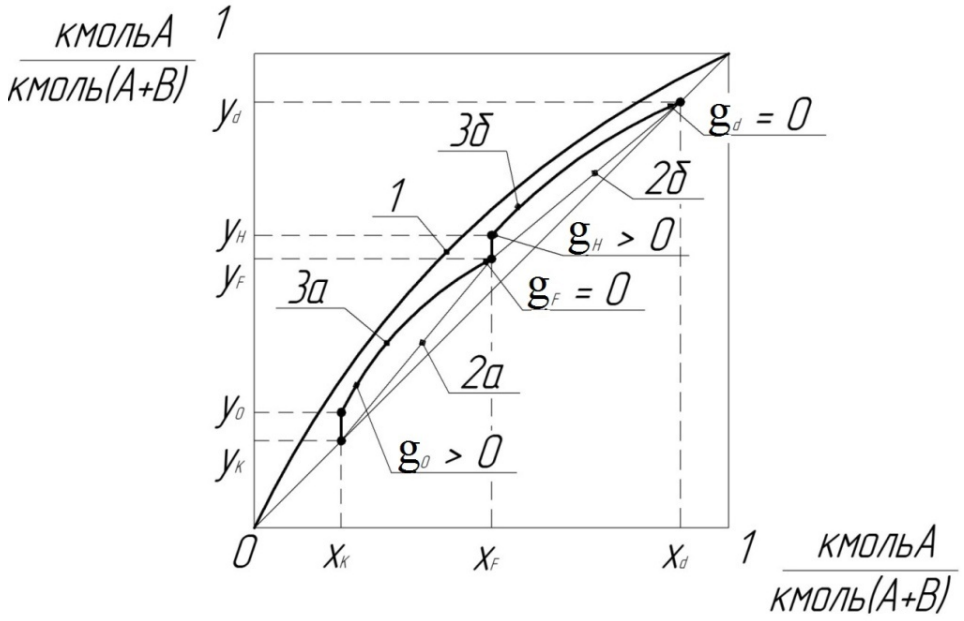


Рис. 3. Равновесная (*1*) и рабочие линии:
типовые без учета продольной диффузии для исчерпывающей (*2а*)
и укрепляющей (2*б*) частей колонны; с учетом продольной диффузии
для паровой фазы для исчерпывающей (3*а*) и укрепляющей (3*б*) частей колонны

На рисунке 3 представлены графики уравнений рабочих линий для исчерпывающей и укрепляющей частей ректификационной колонны: типовые *2а* и *2б*, не учитывающие продольную диффузию, т.е. соответствующих идеальному вытеснению по обеим фазам при $Pe \to \infty$ или $De \to 0$, и *3а* и *3б*, учитывающие продольную диффузию по паровой фазе и соответствующие вышевыведенным уравнениям рабочей линии для исчерпывающей части колонны (3) с граничными условиями (4) и для укрепляющей части колонны с уравнением рабочей линии (5) с граничными условиями (6).

Из графиков уравнений рабочих линий (3) и (5) видно, что продольная диффузия, во-первых, приводит к скачку концентраций на входе пара в исчерпывающую и укрепляющую части колонны, т.е. $y_0 > y_K$, а $y_H > y_F$ (рис. 3), а во-вторых, сами рабочие линии не прямые, а описываются выпуклыми кривыми. Оба отличия могут значительно уменьшать локальные и средние движущие силы, что приводит к увеличению числа теоретических тарелок, числа единиц переноса, минимального и оптимального флегмовых чисел, а с ними диаметров и высоты каждой части колонны.

Аналогичные математические выкладки проведены авторами для колонны с учетом продольной диффузии по жидкой фазе в статьях [3, 4].

В общем случае, когда продольная диффузия имеет место и по паровой, и по жидкой фазам, получаем уравнения рабочих линий, учитывающие соответствующие градиенты концентраций и числа Пекле продольной диффузии по обеим фазам в обеих частях колоны [5].

Для исчерпывающей части

$$y = y_k + \left(\frac{F+R}{R+1}\right)\cdot(x - x_k) - \frac{F+R}{R+1}\cdot\left(\frac{g}{Pe_x}\right) + \left(\frac{g}{Pe_y}\right). \qquad (7)$$

Для укрепляющей части колоны

$$y = \left(\frac{x_d + Rx}{R+1}\right) - \frac{R}{R+1}\cdot\left(\frac{g}{Pe_x}\right) + \left(\frac{g}{Pe_y}\right). \quad (8)$$

Графики уравнений рабочих линий укрепляющей и исчерпывающей частей колонны с учетом продольной диффузии по обеим фазам представлены на рис. 4 (линии *3а* и *3б*).

Продольная диффузия уменьшает локальные и средние движущие силы процессов массопередачи в обеих частях ректификационной колонны за счет скачка концентраций на входе по паровой и жидкой фазам, а также приводит к переходу от линейных уравнений рабочих линий к нелинейным. При критических значениях чисел Пекле по паровой Pe_x фазам точки *K*, *F* и *D* рабочих линий (рис. 4) ложатся на равновесную линию *1*, т.е. рабочие линии *3а* и *3б* пересекают равновесную, что теоретически увеличивает высоту колонны до бесконечности. В общем случае учет продольной диффузии может потребовать увеличения флегмового числа по сравнению с типовым расчетом и привести к увеличению диаметра и высоты обеих частей ректификационной колонны.

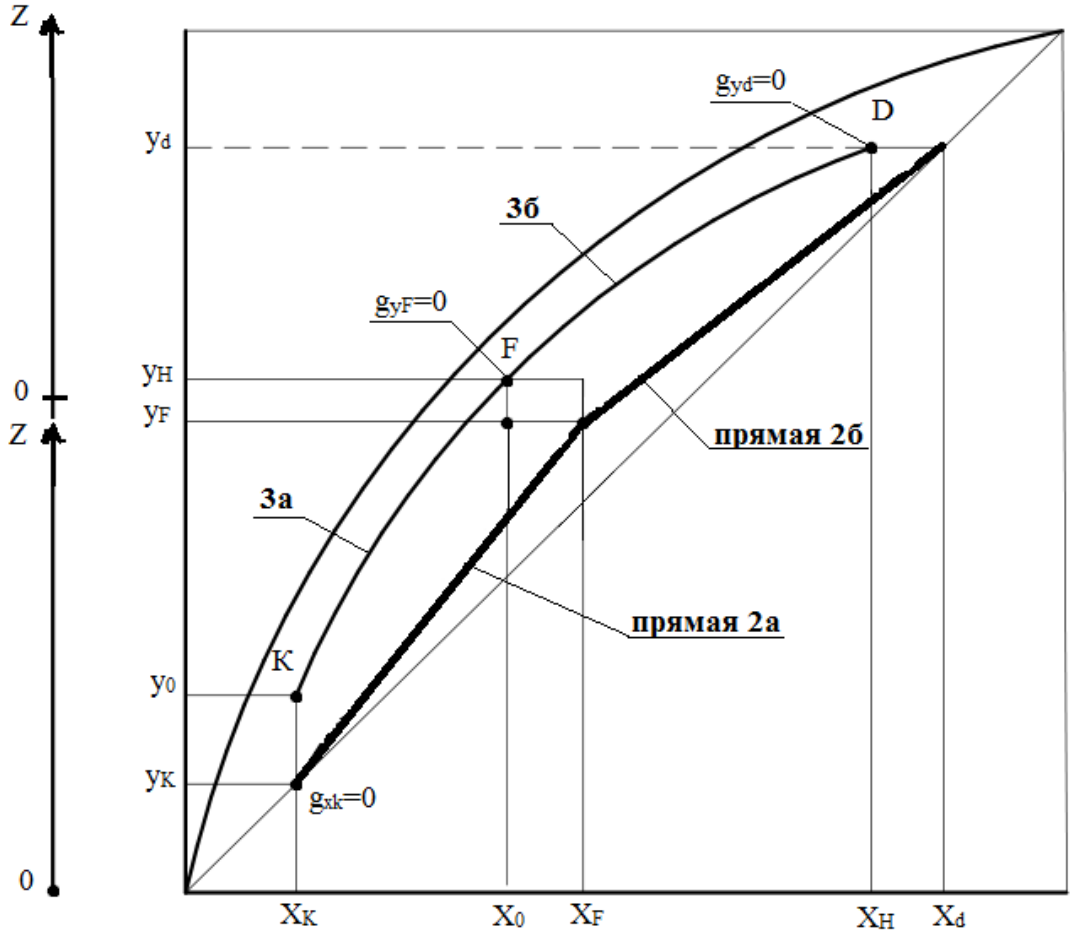


Рис. 4. Равновесная (*1*) и рабочие линии:
типовые без учета продольной диффузии для исчерпывающей (*2а*)
и укрепляющей (*2б*) частей колонны; с учетом продольной диффузии
в обеих фазах для исчерпывающей (*3а*) и укрепляющей (*3б*) частей колонны

Список использованных источников

1. **Багатуров, С. А.** Основы теории и расчета перегонки и ректификации / С. А. Багатуров ; под ред. С. А. Багатурова. – изд. 3-е, перераб. – М. : Химия,1974.

2. **Кафаров, В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии : учебник / В. В. Кафаров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1985.

3. **Голованчиков, А. Б.** Алгоритм расчета насадочной ректификационной колонны с учетом продольного перемешивания по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, В. Н. Карев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 3(182). – С. 14 – 17.

4. **Голованчиков, А. Б.** Расчет дисперсии воспроизводимости в отсутствии параллельных опытов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 11(190). – С. 13 – 16.

5. **Голованчиков, А. Б.** Моделирование материального баланса с учетом продольной диффузии в ректификационной колонне / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2018. – № 5(215). – С. 18 – 21.

References

1. **Bagaturov, S. A.** Fundamentals of the theory and calculation of distillation and rectification; edited by S. A. Bagaturov. – Izd. 3-e, pererab. – M. : Chemistry, 1974.

2. **Kafarov, V. V.** Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology : A Textbook / V. V. Kafarov. – 4 th ed., Pererab. and additional. – M. : Chemistry, 1985.

3. **Golovanchikov, A. B.** Algorithm for calculating the packed distillation column with allowance for longitudinal mixing in the liquid phase / A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, V. N. Karev // Izvestiya Volgograd State Technical University. – 2016. – № 3(182). – P. 14 – 17.

4. **Golovanchikov, A. B.** Calculation of variance of reproducibility in the absence of parallel experiments / A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko // Izvestiya Volgograd State Technical University. – 2016. – № 11(190). – P. 13 – 16.

5. **Golovanchikov, A. B.** Modeling of material balance taking into account longitudinal diffusion in the rectifying column / A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko // News of VolgGTU. Ser. Actual problems of control, computer technology and computer science in technical systems. – Volgograd, 2018. – № 5(215). – P. 18 – 21.

УДК 621.9.06

Кроль О. С., Соколов В. И.
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,
Украина, г. Северодонецк
(Тел. +380957131879, e-mail: krolos.snu.edu@ gmail.com)

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ ШПИНДЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Krol O. S., Sokolov V. I.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,
Ukraine, Severodonetsk
(Тел. +380957131879, e-mail: krolos.snu.edu@ gmail.com)

3D-MODELLING OF ANGULAR SPINDLE HEAD OF THE MACHINING CENTRE

Аннотация. Рассмотрена унифицированная конструкция угловой шпиндельной головки обрабатывающего центра сверлильно-фрезерно-расточного типа. Выполнено трехмерное моделирование сборочной конструкции угловой головки в САПР КОМПАС-3D с использованием специализированного приложения «Валы и механические передачи 3D», включая трехмерное представление кинематической схемы обрабатывающего центра. Использован модуль фотореалистичной визуализации Artisan Rendering, который интегрирован в контур САПР КОМПАС-3D для создания презентаций и продвижения на рынок станкостроения рассматриваемой конструкции. Предложена двухэтапная процедура анализа конструкции по критерию жесткости: на начальных этапах проектирования матричным методом начальных параметров; на этапе рабочего проекта методом конечных элементов в модуле APM FEM. Реализована процедура определения напряженно-деформированного состояния шпинделя угловой головки с использованием концевых фрез.

Ключевые слова: угловая шпиндельная головка, обрабатывающий центр, 3D-модель, рендеринг, жесткость, метод конечных элементов.

Abstract. The unified design of the angular spindle head of the machining centre for drilling-milling and boring type is considered. Three-dimensional modeling of the angular head assembly in CAD KOMPAS-3D is performed using a specialized application «Shafts and 3D mechanical transmissions» including a three-dimensional representation of the machining centre kinematic scheme. The photorealistic visualization module Artisan Rendering, which is integrated into the KOMPAS-3D CAD contour, was used to create presentations and promote this construction to the machine tool industry. A two-stage procedure for analyzing the structure by the stiffness criterion is proposed: at the early stages of the design by the matrix initial parameters method; at the stage of the working project by the finite element method in the APM FEM module. The procedure for determining the stress-strain state of the angular head spindle with end mills realized.

Keywords: angular spindle head, machining centre, 3D-model, rendering, rigidity, finite element method.

Введение. В практике машиностроительного производства встречается множество деталей со сложной геометрией и с труднодоступными для обработки поверхностями. Традиционные компоновки обрабатывающих центров сверлильно-фрезерно-расточного типа не могут реализовать полный цикл технологии обработки корпусных деталей такой конфигурации. Актуальным становится необходимость расширения технологических возможностей металлорежущего оборудования с использованием специальных угловых шпиндельных головок. Часто сменяемые инструментальные блоки, монтируемые в угловых головках (УГ), и выдвигаемые требования к повышению точности изготавливаемых изделий приводят к необходимости проведения исследований по критериям прочности и жесткости шпиндельного узла УГ.

В работе по исследованию жесткости формообразующих узлов рассматриваются конструкции обрабатывающих центров среднего типоразмера [1]. Для них предлагается процедура «зондирования» показателей податливости шпинделя с инструментом в рамках рабочей зоны обработки с учетом типоразмера станка. При этом рассматриваются традиционные технологические операции фрезерования с «открытым» доступом к обрабатываемым поверхностям. Исследование касалось фиксированного варианта наладки главного привода станка и не учитывает влияние инструментальных блоков на изменения базисной жесткости, что особенно свойственно обрабатывающим центрам.

В работе [2] рассматривается процедура комплексного исследования упругой системы «патрон–деталь» в токарных прутковых автоматах. Приводится модель на базе метода начальных параметров, на основе которой оценивается работоспобность конструкции оснастки токарных автоматов по критериям жесткости и виброустойчивости. Вместе с тем, по сравнению с токарными прутковыми автоматами, в многоцелевых станках значительно расширяются типы применяемой оснастки.

Влияние типа, количества и расположения подшипников на эффективность шпиндельного узла рассмотрено в работе [3]. Автор ввел понятие статического формуляра, представляющего аналитическую зависимость податливости узла шпиндель-опоры от параметров инструментального блока.

Аналитическая зависимость характеристик перемещения исполнительного органа от конструктивных параметров станков-гексаподов представлена в статье [4]. Подробный анализ влияния опор качения легких серий на точность и жесткость быстроходных прецезионных шпиндельных узлов проведен [5].

Комплексному использованию CAD SOLIDWORKS и CAE ANSYS software для построения 3D-модели шпинделя и исследования ее методом конечных элементов посвящена работа [6]. При формализации шпинделя используется 10-узловая стержневая модель с тремя степенями свободы в каждом узле. Анализ динамических характеристик на 5 собственных частотах и формах колебаний шпинделя с учетом изменяющейся нагрузки дает возможность прогнозировать поведение этого изделия вне зоны резонанса и давать оценку показателя жесткости при доминировании изгибных напряжений.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследовательские задачи, в том числе по критерию жесткости, проводят как на начальных этапах создания станочного оборудования, так и на заключительных стадиях рабочего проекта. Причем на начальных этапах многовариантного проектирования требуются экспресс-процедуры оценки жестко-

сти, в то время как на этапе рабочего проекта необходимо проводить достаточно трудоемкое исследование методом конечных элементов. В вышеперечисленных работах такой подход не рассматривается.

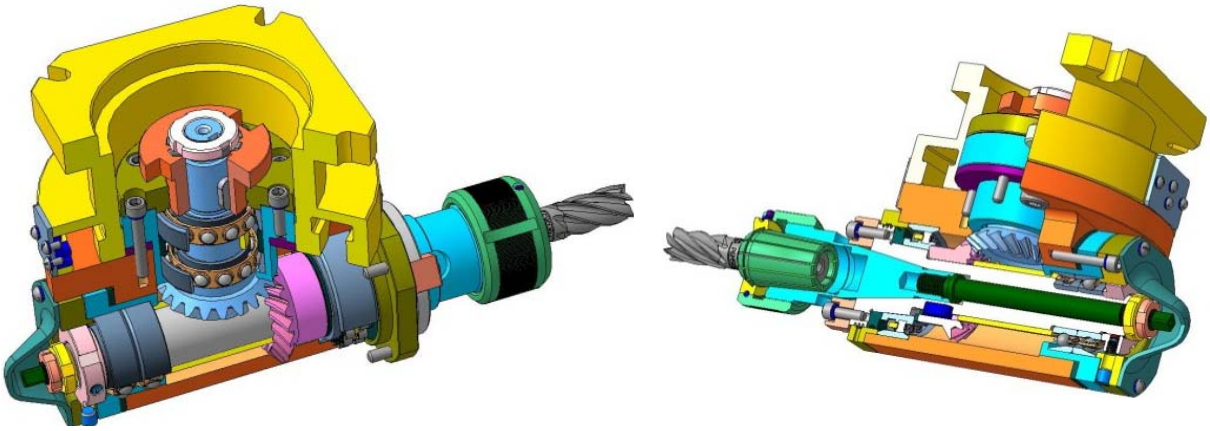
Постановка задачи исследования. В данной работе ставится задача комплексного исследования конструкции угловой шпиндельной головки, расширяющей технологические возможности металлорежущего оборудования и повышающей степень концентрации технологических операций на одном рабочем месте. Для исследования работоспособности проектируемой угловой головки по критерию жесткости предлагается двухшаговая процедура оценки жесткости:

1) процедура определения податливости шпиндельного узла УГ на стадии эскизного проекта с помощью экспресс-метода начальных параметров в матричной постановке;

2) процедура комплексного исследования напряженно-деформированного состояния оптимального варианта шпиндельного узла УГ методом конечных элементов, принятого в качестве основного, на стадии рабочего проекта.

Трехмерное моделирование угловой шпиндельной головки. Шпиндельный узел УГ как ее основной формообразующий компонент представляет собой замкнутую динамическую систему, использующую модульные комплекты оснастки [7]. Для исследования напряженно-деформируемого состояния и использования методов конечных элементов [7 – 9] необходимо построить 3D-модели отдельных деталей и сборки ШУ в интегрированной САПР КОМПАС-3D со встроенным модулем APM FEM [3]. На первом этапе исследования построены 3D-модели угловой головки (УГ) в интегрированной САПР КОМПАС-3D. В процессе построения были задействованы такие ресурсы КОМПАС, как прикладные библиотеки (в особенности «Валы и механические передачи 2D и 3D») и полнофункциональное геометрического ядро C3D [3], которое помимо 3D-моделера, поддерживает средства черчения, трехмерного поверхностного и твердотельного моделирования, параметрические возможности, а также средства конвертации в большинство основных форматов данных [10].

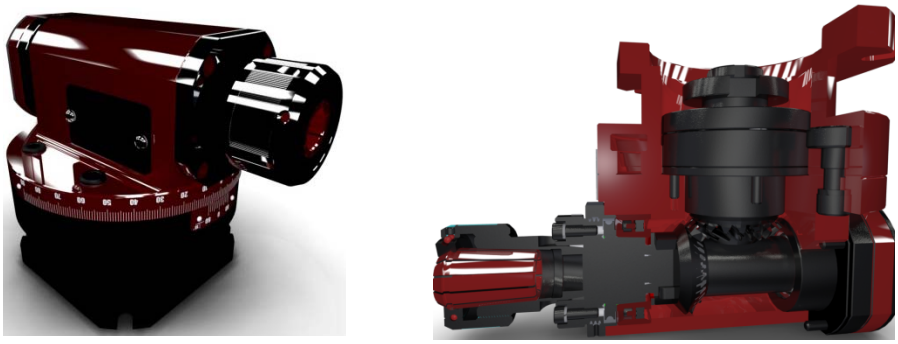
Разработанная 3D-модель угловой шпиндельной головки представлена на рис. 1.



а) *б*)

Рис. 1. 3D-модель угловой головки:
а – общий вид сборки; *б* – сечение

Для создания фотореалистического изображения и анализа внешнего вида будущей конструкции УГ используется модуль Artisan Rendering [8, 11], интегрированный в систему КОМПАС-3D. При этом появляется возможность подобрать материалы с учетом расцветки и фактуры. Важным является создание последующей обратной связи в ходе корректировки геометрии изделия для его совершенствования. На рисунке 2 показан рендеринг УГ в сборе.



а) *б*)

Рис. 2. Рендеринг угловой головки:
а – общий вид; *б* – сечение

В состав модульной оснастки, которая позволяет расширить технологические возможности металлорежущих станков, часто включают угловую головку. С ее помощью осуществляется процесс фрезерования в различном диапазоне углов поворота (вокруг вертикальной оси на 360°). Особенностью угловой головки является ее использование для высокоскоростной обработки (при частотах вращения шпинделя до 4000 мин$^{-1}$) плоскостей, лысок и разнообразных пазов в труднодоступных участках заготовок. Данный типоразмер головки (рис. 1) оснащается набором концевых фрез с диаметром в диапазоне 3…25 мм.

Для оценки напряженно-деформированного состояния шпинделя угловой головки необходимо проанализировать кинематические цепочки, реализующие движение формообразования при торцевом фрезеровании и силовые параметры на каждой ступени передачи движения. На рисунке 3 представлена 3D-кинематическая схема широкоуниверсального обрабатывающего центра второго типоразмера.

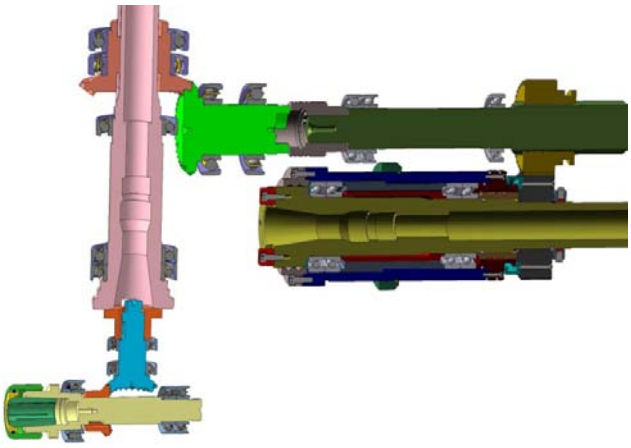


Рис. 3. 3D-кинематическая схема передачи движения на угловую головку

Вращение от электродвигателя через поликлиновой ремень передается через двухступенчатую коробку скоростей на распределительный вал, с которого вращение передается на муфту вертикальной головки либо на шестерню горизонтального шпинделя. Через вертикальную головку движение передается на рассматриваемую угловую головку, в которой монтируются концевые фрезы. Для таких фрез, в случае предельных режимов, главная составляющая силы фрезерования составляет: $P_{z\text{ф}}$ = 2516 Н, горизонтальная составляющая P_h = 755 Н, вертикальная P_v = 2265 Н и радиальная P_y = 910 Н. Шпиндель угловой головки (рис.1) монтируется на двух опорах: передняя – подшипник 3182108 роликовый радиальный двухрядный с короткими цилиндрическими роликами; задняя – подшипник 246205 – шариковый радиально-упорный сдвоенный, наружные кольца которого обращены друг к другу широкими торцами с углом контакта 26°. Комплект подшипников фиксирует вал и корпус в обоих осевых направлениях и обеспечивает более жесткую угловую фиксацию вала, чем соответствующий подшипник 346205.

Экспресс-анализ характеристик податливости угловой головки. На начальных этапах проектирования УГ, когда генерируется множество проектных альтернатив на компоновочном уровне необходимо разработать методы и процедуры быстрого оценивания выходных технико-экономических характеристик. Для экспресс-оценки податливости шпинделя УГ воспользуемся подходом, предложенным в работе [3], который учитывает многообразие типоразмеров инструментальной оснастки и ограниченное количество конструктивных вариантов ШУ (характеризуемых длиной межопорной части ℓ, длиной консольной части ℓ_1, и диаметром d). Для этого формируется статический формуляр в виде двухкомпонентной аналитической зависимости. Первый компонент представлен в упругодеформационной модели в виде статического формуляра $\delta = (\Delta_2 + \Delta_3)$, т.е. в виде аналитической зависимости перемещения опор Δ_2 и собственно шпинделя Δ_3 от длины ℓ_k консоли (инструментального фрезерного блока УГ). Для его построения используется система из четырех линейных уравнений с граничными условиями [3]. Второй компонент Δ_1 – переменный компонент, настраиваемый на различную номенклатуру изготавливаемых изделий, представленный в виде инструментального фрезерного блока с различными диаметрами концевых фрез. Для данной конструкции УГ в математической среде MAPLE получены в символьной форме величины реакций и моментов на задней и передней опорах $\{R_z, R_p, m_z, m_p\}$:

$$R_z = -0{,}042 + 0{,}0029\,\ell_k; \quad R_p = 0{,}95 + 0{,}0029\,\ell_k;$$

$$m_z = -24{,}44 + 0{,}0057\,\ell_k; \quad m_p = 91{,}18 + 0{,}74\,\ell_k.$$

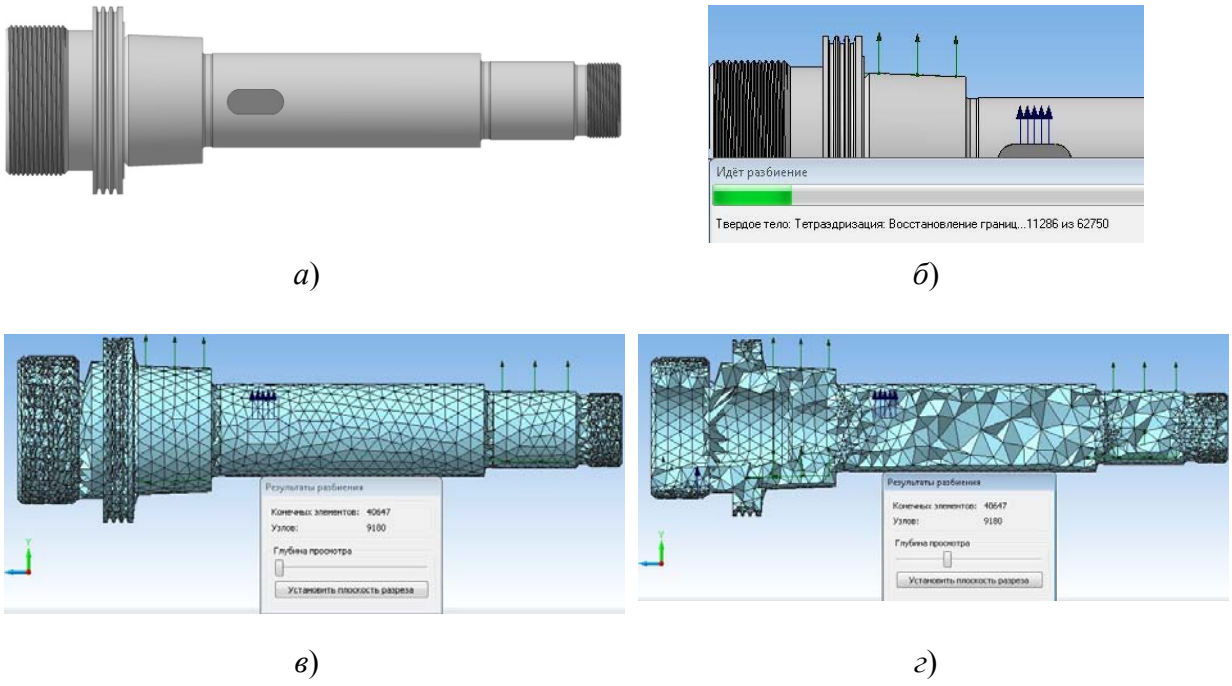
Программа построения статического формуляра для рассматриваемой конструкции в среде MAPLE представлена в монографии [7]. Вычисленные значения реакций позволяют определить прогиб $y(x)$ и угол поворота $y'(x)$ на консольном конце шпинделя ($x = \ell + \ell_1$) и сформировать статический формуляр в функции от длины ℓ_k условной консоли:

$$\delta = -(1377 + 9{,}58\,l_k + 0{,}062\,l_k^2)\cdot 10^{-8}.$$

В ряде случаев неточность определения общей податливости шпиндельного узла связана с отсутствием в расчетной модели данных об упругих свойствах подшипниковых опор. Если рассмотреть ориентировочное 20%-ное отклонение линейной и угловой

податливости, то на основании построенных зависимостей δ от l_k можно утверждать, что даже значительное (до 35%) отклонение линейной податливости A_0 одного подшипника в обе стороны (завышения или занижения) от номинального значения мало влияет на податливость системы шпиндель–консоль в целом. Вместе с тем, если не учитывать угловой жесткости одинарного подшипника ($a_0 \to \infty$), то учет угловой податливости одинарного подшипника оказывается необходимым, так как расчетное значение δ шпиндельного узла возрастает в 3,2 раза. Кроме того, как видно из расчетов, изменение линейной податливости A_z и A_p опор шпинделя в достаточно широких пределах без соответствующего изменения его диаметра не вносит существенных изменений в податливость шпиндельного узла (не превышает 3,5%).

Комплексный инженерный анализ напряженно-деформированного состояния. На этапе рабочего проекта после выбора оптимального варианта конструкции проектируемого изделия необходим комплексный анализ шпинделя УГ обрабатывающего центра СФ68ВФ4 (рис. 3). В среде модуля APM FEM [9, 11] осуществим моделирование конструкции УГ по критерию жесткости. Данный модуль оснащен генератором конечно-элементной сетки, входящим в CAE-библиотеку, которая реализует решения инженерных задач методом конечных элементов (МКЭ). В процессе моделирования осуществляется крепление в передней и задней опорах, а также задаются прикладываемые нагрузки (рис. 4, *б*); определяются совпадающие грани (для КЭ-анализа сборки); осуществляется генерация КЭ-сетки (рис. 4, *в*) методом MT Frontal (с использованием многоядерности процессора); выполняется расчет и просмотр результатов в виде карт напряжений и перемещений. В процессе МКЭ имеется возможность оценки и анализа разбиения при различных величинах глубины просмотра (рис. 4, *г*).



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 4. Процедуры метода конечных элементов:
а – 3D-модель шпинделя; *б* – опоры и нагрузки, действующие на шпиндель;
в – конечно-элементная сетка; *г* – глубина просмотра

В рамках модуля APM FEM осуществлены все вышеперечисленные действия и получены для случая предельных режимов резания:

– поля эквивалентных напряжений по Мизесу (четвертая теория прочности), представленных на рис. 5;

– поля перемещений (рис. 6) на множестве сечений шпинделя.

Для оценки доли деформаций отдельных элементов шпиндельного узла целесообразно провести анализ баланса упругих перемещений составляющих в рабочей зоне резания. Для шпинделя УГ с d = 40 мм при консольном инструменте на долю деформации шпинделя и опор приходится 37%, конического соединения оправки и концевой фрезы – 52% и оправки – 11%.

Результаты статического расчета

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Эквивалентное напряжение по Мизесу	SVM [МПа]	0.000606	4803.127843

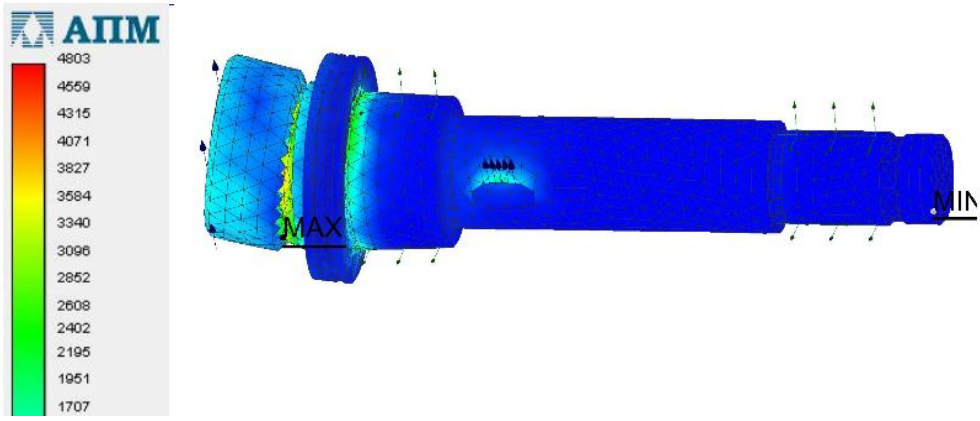


Рис. 5. Напряженное состояние шпинделя

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Суммарное линейное перемещение	USUM [мм]	0	1.160879

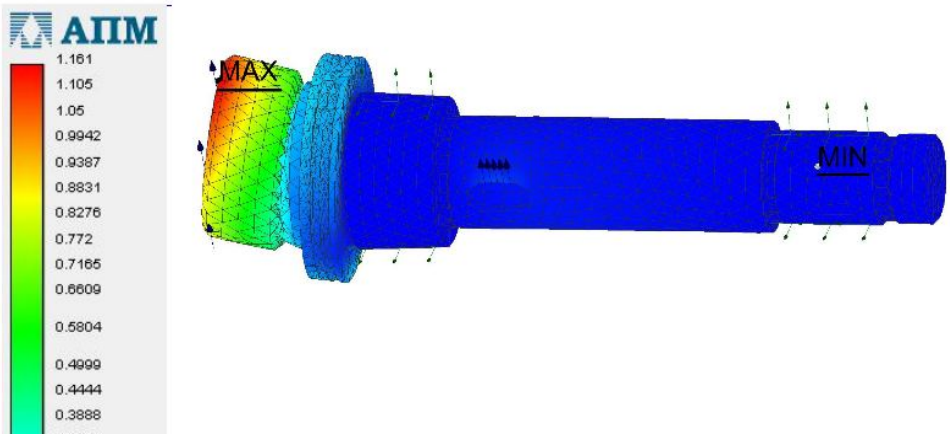


Рис. 6. Суммарные линейные перемещения

Заключение. Разработан 3D-проект угловой шпиндельной головки обрабатывающего центра в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D. Проведено комплексное исследование конструкции угловой головки с использованием аналитических зависимостей ее податливости на начальных этапах многовариантного проектирования. Построена статическая модель унифицированного шпиндельного узла УГ, учитывающая общие свойства двухопорных конструкций на радиально-упорных подшипниках качения. С помощью такой модели сформирован статический формуляр в символьном виде в программной среде MAPLE. Это значительно понижает трудоемкость расчетных работ и открывает перспективы масштабных исследований в области моделирования и совершенствования современных конструкций шпиндельных узлов.

Проведено комплексное исследование оптимальной конструкции шпиндельного узла УГ с помощью инструментария метода конечных элементов на этапе рабочего проекта с использованием модуля APM FEM. Получены поля напряжений и перемещений различных сечений шпинделя, нагруженного предельными силами резания при фрезеровании концевой фрезой и силами, возникающими в конической передаче УГ. Дана оценка баланса податливости шпинделя, опор и конического соединения оправки и концевой фрезы.

Список использованных источников

1. **Угринов, П.** Жесткость обрабатывающих центров среднего типоразмера / П. Угринов // Автоматизация и управление в машиностроении. – 2001. – № 5. – С. 43 – 47.

2. **Кузнецов, Ю. Н.** Новое в теории и практике проектирования зажимных механизмов / Ю. Н. Кузнецов // Вестник Киевского национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – М. : Машиностроение, 1998. – Вып. 33. – С. 85 – 106.

3. **Попов, В. И.** Динамика станков / В. И. Попов, В. И. Локтев. – Киев : Техника, 1975. – 136 с.

4. **Павленко, И. И.** Характеристики перемещений станков с параллельной кинематикой / И. И. Павленко, И. А. Валявский // Сборник научных трудов КНТУ. – 2008. – Вып. 21. – С. 304 – 310. – ISSN 2409-9392.

5. **Данильченко, Ю. М.** Прецизионные шпиндельные узлы на опорах качения (теория и практика) / Ю. М. Данильченко, Ю. Н. Кузнецов. – Киев : Экономическая мысль, 2003. – 344 с.

6. **Kong, J.** Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. J. Advances in Engineering Research (AER) / J. Kong, X. Cheng. – 2017. – Vol. 148. – P. 318 – 321. – ISSN 2352-5401.

7. **Кроль, О. С.** Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов : монография / О. С. Кроль. – Луганск : ВНУ им. В. Даля, 2014. – 154 с.

8. **Krol, O.** DEVELOPMENT OF MODELS AND RESEARCH INTO TOOLING FOR MACHINING CENTERS. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies / O. Krol, V. Sokolov. 3(1(93)), 12 – 22. – 2018. – URL : https://doi.org/10. 15587/1729-4061.2018.131778.

9. **Krol, O.** 3D-modeling and optimization spindle’s node machining centre SVM1F4 / O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 3. – Lublin, Poland. – P. 114 – 119.

10. **Nemtinov, V.** Automation of the early stages of plating lines design MATEC Web of Conferences / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Y. Nemtinova. – 2017. 129, 01009. doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901012

11. **Замрий, А. А.** Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine : учебно-методическое пособие / А. А. Замрий. – М. : АПМ, 2007. – 144 с.

References

1. **Ugrinov, P.** Zhestkost obrabatyivayuschih tsentrov srednego tiporazmera / P. Ugrinov // Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii. – 2001. – № 5. – P. 43 – 47. – ISSN 2542-1719.

2. **Kuznetsov, Yu. N.** Novoe v teorii i praktike proektirovanie zazhimnyih mehanizmov / Yu. N. Kuznetsov // Vestnik Kievskogo natsionalnogo tehnicheskogo universiteta Ukrainyi «Kievskiy politehnicheskiy institut». – M. : Mashinostroenie. – 1998. – Vyip. 33. – P. 85 – 106. – ISSN 2409-5966 (Online), ISSN 2305-9001 (Print).

3. **Popov, V. I.** Dinamika stankov / V. I. Popov, V. I. Loktev. – Kiev : Tehnika, 1975. – 136 p.

4. **Pavlenko, I. I.** Harakteristiki peremescheniy stankov s parallelnoy kinematikoy / I. I. Pavlenko, I. A. Valyavskiy // Sbornik nauchnyih trudov KNTU. – 2008. – Vyip. 21. – P. 304 – 310. – ISSN 2409-9392.

5. **Danilchenko, Yu. M.** Pretsizionnyie shpindelnyie uzlyi na oporah kacheniya (teoriya i praktika) / Yu. M. Danilchenko, Yu. N. Kuznetsov. – Kiev : Ekonomicheskaya myisl, 2003. – 344 p.

6. **Kong, J.** Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. J. Advances in Engineering Research (AER) / J. Kong, X. Cheng. – 2017. – Vol. 148. – P. 318 – 321. – ISSN 2352-5401.

7. **Krol, O. S.** Metodyi i protseduryi dinamiki shpindelnyih uzlov : Monografiya / O. S. Krol. – Lugansk : VNU im. V. Dalya, 2014. – 154 p. – ISBN 978-617-11-0039-8.

8. **Krol, O.** DEVELOPMENT OF MODELS AND RESEARCH INTO TOOLING FOR MACHINING CENTERS. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies / O. Krol, V. Sokolov. 3(1(93)), 12 – 22. – 2018. – URL : https://doi.org/10. 15587/1729-4061.2018. 131778.

9 **Krol, O.** 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 / O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 3. – Lublin, Poland. – P. 114 – 119. – ISSN 1641-7739.

10. **Nemtinov, V.** Automation of the early stages of plating lines design MATEC Web of Conferences / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Y. Nemtinova. – 2017. 129, 01009. doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901012

11. **Zamriy, A. A.** Prakticheskiy uchebnyiy kurs SAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie / A. A. Zamriy. – M. : APM, 2007. – 144 p.

УДК 681.5

Тугашова Л. Г.
Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, Альметьевск
(Тел. (8553)310151, e-mail: tugashova@ yandex.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Tugashova L. G.
Almetyevsk State Oil Institute, Russia, Almetyevsk
(Tel. (8553)310151, e-mail: tugashova@yandex.ru)

APPLICATION OF THE KALMAN FILTER FOR IDENTIFICASTION OF REFINING PROCESS PARAMETERS

Аннотация. Приведено сравнение разновидностей фильтра Калмана. Предложено применение сигма-точечного фильтра Калмана для фильтрации зашумленных данных в нелинейных системах. Рассмотрен алгоритм фильтрации для повышения точности идентификации параметров процессов нефтепереработки. Приведен пример полученных результатов нелинейной фильтрации в среде *Matlab*.

Ключевые слова: нефтепереработка, математическая модель, *unscented*-преобразование, сигма-точечный фильтр Калмана.

Abstract. A comparison of varieties of the Kalman filter is given. A Kalman sigma-point filter is proposed for filtering noisy data in nonlinear systems. A filtering algorithm is considered to improve the accuracy of identifying the parameters of oil refining processes. An example of the results of nonlinear filtering in the Matlab environment is given.

Keywords: oil refining, mathematical model, *unscented*-conversion, Kalman sigma-point filter.

При решении задач управления установками нефтепереработки важным условием является получение достоверных данных о текущих параметрах процесса. Объекты нефтепереработки в основном являются нелинейными и многомерными.

Например, на установке первичной переработки нефти можно выделить следующие группы параметров:

– вектор управляющих воздействий **U**: расход острого орошения, расход циркуляционного орошения, расход перегретого пара;

– вектор возмущающих воздействий **V**: расход сырья (нефти), состав сырья (нефти);

– векторы режимных параметров: вектор температур ректификационной колонны **T**, определяющий температурный профиль; вектор уровней во флегмовой емкости и в кубе колонны **H**;

– векторы выходных (управляемых) параметров: вектор показателей качества нефтепродуктов **Q** (фракционный состав бензиновой фракции; фракционный состав

дизельного топлива), вектор отборов фракций **F** (отбор бензиновой фракции, отбор дизельного топлива и др.).

Например, отборы нефтяных фракций, температуры профиля ректификационной колонны и расход сырья связаны следующим образом:

$$F = (b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2) \cdot G;$$

где F – отбор нефтяной фракции; T – температура отбора нефтяной фракции; G – расход сырья; $b_0 \ldots b_2$ – коэффициенты.

Обеспечение точности определения параметров в условиях воздействия помех достигается применением различных способов фильтрации, например фильтра Калмана. Фильтр Калмана применяется в различных областях, в том числе для анализа и синтеза систем управления технических и социально-экономических систем. Перечислим некоторые его разновидности:

– адаптивный фильтр Калмана [1];
– расширенный фильтр Калмана (*EKF*, *Extended Kalman filter*) [2];
– сигма-точечный фильтр Калмана (*UKF*, *Unscented Kalman filter*) [3];
– *Ensemble Kalman filter* (*EnKF*) и др.

Для нелинейных систем применяются *EKF*- и *UKF*-фильтры. Необходимо задание системы в виде модели:

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}) + q_{k-1}; \\ y_k &= h(x_k) + r_k, \end{aligned} \tag{1}$$

где f – функция перехода; h – функция наблюдения; q_{k-1} – шум процесса; r_k – шум измерений.

Работа фильтра включает этапы экстраполяции и коррекции. При применении расширенного фильтра Калмана выполняется линеаризация нелинейных моделей путем разложения в ряд Тейлора. В этом случае требуется вычисление частных производных, что может вызывать трудности. Сигма-точечный фильтр Калмана использует *unscented*-преобразование для выбора набора точек (называемых сигма-точками) со средним значением $\overline{x}$ и ковариационной матрицей P_x. Алгоритм *UKF* в отличие от *EKF* не использует непосредственно функциональные зависимости (1), а подвергает нелинейному преобразованию каждую точку введенного набора χ_i [4]:

$$\begin{aligned} &\chi_0 = \overline{x}; \\ &\chi_i = \overline{x} + \left(\sqrt{(L+\lambda)\cdot P_x}\right)_i; i = 1,\ldots, L; \\ &\chi_i = \overline{x} - \left(\sqrt{(L+\lambda)\cdot P_x}\right)_i; i = L,\ldots, 2L. \end{aligned} \tag{2}$$

Путем нелинейного преобразования сигма-точек $Y = g(\chi)$ получают набор преобразованных сигма-точек Y_i, для которого вычисляется взвешенное выборочное среднее и взвешенная выборочная ковариация [3].

Алгоритм фильтрации с помощью *UKF* следующий:

– формирование набора сигма-точек по заданным начальным данным по выражениям (2);
– получение преобразованных значений сигма-точек по функции перехода f;

– экстраполяция состояния системы и ковариации по преобразованным сигма-точкам с учетом весов.

Веса W для состояния системы и ковариации определяются следующим образом [4]:

$$W_m^0 = \frac{\lambda}{L+\lambda};$$

$$W_c^0 = \frac{\lambda}{L+\lambda} + \left(1-\alpha^2+\beta\right);$$

$$W_m^i = W_m^i = \frac{1}{2\cdot\left(L+\lambda\right)};$$

$$\lambda = \alpha^2\cdot\left(L+k\right) - L.$$

Принимаем $\alpha = 0{,}001$; $\beta = 2$; $k = 0$;

– определение преобразованных значений сигма-точек с помощью функции наблюдения h;

– экстраполяция измерения и ковариации по преобразованным сигма-точкам с учетом весов;

– расчет коэффициента усиления;

– коррекция оценки вектора состояния системы;

– вычисление ковариационной матрицы оценки вектора состояния системы.

На рисунке 1 приведен пример результата применения сигма-точечного фильтра Калмана для фильтрации зашумленных сигналов. Фильтр учитывает расчетные значения, полученные по нелинейной математической модели процесса первичной переработки нефти [5 – 7], и данные датчиков температуры, расхода, давления. Алгоритм реализован в среде *Matlab*.

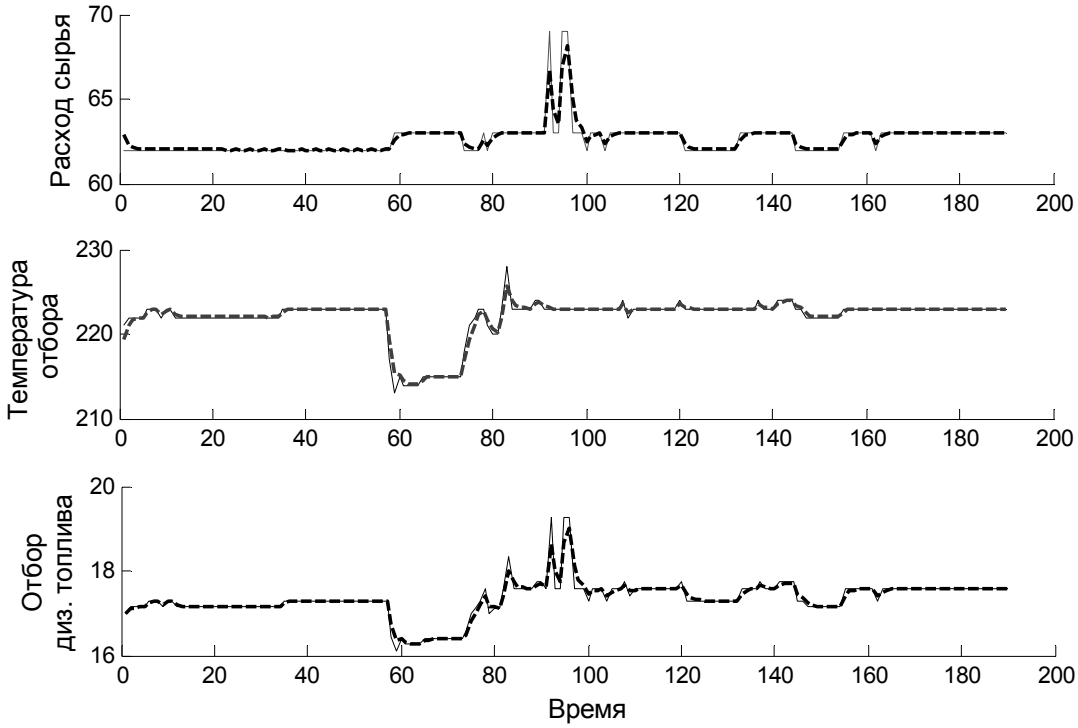


Рис. 1. Результат применения сигма-точечного фильтра Калмана:
пунктирная линия – значения оценки; сплошная линия – измеренные значения

Таким образом, сигма-точечный фильтр Калмана является эффективным инструментом фильтрации данных для нелинейных систем.

Список использованных источников

1. **Сергиенко, А. Б.** Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB / А. Б. Сергиенко // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 1. – С. 18 – 28.

2. **Пилипенко, Н. В.** Применение фильтра Калмана в нестационарной теплометрии : учебное пособие / Н. В. Пилипенко. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 36 с.

3. **Кудрявцева, И. А.** Анализ эффективности расширенного фильтра Калмана, сигма-точечного фильтра Калмана и сигма-точечного фильтра частиц / И. А. Кудрявцева // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 224. – С. 43 – 52.

4. **Julier, S. J.** Unscented Filtering and Nonlinear Estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proceedings of the IEEE. – 2004. – V. 92, № 3. – P. 401 – 422.

5. **Тугашова, Л. Г.** Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов / Л. Г. Тугашова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 120 – 131.

6. **Controlling** the Oil Rectification Process in a Primary Oil Refining Unit Using a Dynamic Model / A. V. Zatonskiy, L. G. Tugashova, N. N. Alaeva, K. L. Gorshkova // Petroleum Chemistry. – 2017. – V. 57, № 12. – P. 1121 – 1131.

7. **Дмитриевский, Б. С.** Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения / Б. С. Дмитриевский, А. В. Затонский, Л. Г. Тугашова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 2. – С. 136 – 145.

References

1. **Sergienko, A. B.** Algoritmy` adaptivnoj fil`tracii: osobennosti realizacii v MATLAB / A. B. Sergienko // Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyax. 2003. – №1. – S. 18 – 28.

2. **Pilipenko, N. V.** Primenenie fil`tra Kalmana v nestacionarnoj teplometrii. Uchebnoe posobie / N. V. Pilipenko. – SPb: Universitet ITMO, 2017. – 36 s.

3. **Kudryavceva, I. A.** Analiz e`ffektivnosti rasshirennogo fil`tra Kalmana, sigma-tochechnogo fil`tra Kalmana i sigma-tochechnogo fil`tra chasticz / I. A. Kudryavceva // Nauchny`j Vestnik MGTU GA. – 2016. – № 224. – S. 43 – 52.

4. **Julier, S. J.** Unscented Filtering and Nonlinear Estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92. – № 3. – S. 401 – 422.

5. **Tugashova, L. G.** Issledovanie vozmozhnosti upravleniya processom rektifikacii nefti s primeneniem tipovy`x regulyatorov / L. G. Tugashova // Vestnik YuUrGU. Seriya «Komp`yuterny`e texnologii, upravlenie, radioe`lektronika». – 2016. – V. 16, № 3. – S. 120 – 131.

6. **Controlling** the Oil Rectification Process in a Primary Oil Refining Unit Using a Dynamic Model / A. V. Zatonskiy, L. G. Tugashova, N. N. Alaeva, K. L. Gorshkova // Petroleum Chemistry. – 2017. – V. 57, № 12. – P. 1121 – 1131.

7. **Dmitrievskij, B. S.** Zadacha upravleniya processom rektifikacii nefti i metod ee resheniya / B. S. Dmitrievskij, A. V. Zatonskij, L. G. Tugashova // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2018. – V. 329, № 2. – S. 136 – 145.

УДК 004.94; 681.513.6

Торгашев М. А., Страшнов Е. В.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)7632168, e-mail: mtorg@mail.ru)

МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫМИ РОБОТАМИ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ СЕНСОРНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ

Torgashev M. A., Strashnov E. V.
Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)7632168, e-mail: mtorg@mail.ru)

METHODS OF ADAPTIVE CONTROL OVER VIRTUAL ROBOTS ON THE BASIS OF THE SENSORY SYSTEM

Аннотация. Рассмотрена задача разработки методов адаптивного управления виртуальными роботами в имитационно-тренажерных комплексах. С помощью реализованных виртуальных датчиков адаптивное управление роботом применяется для решения некоторых технологических задач. Управление движением робота в объезд препятствий осуществляется на основе теории нечеткой логики, показаний дальномеров и датчиков положений. В свою очередь перемещение рабочего органа манипулятора реализовано с применением решения задачи инверсной кинематики, ПД-регуляторов, датчиков положения и ориентации. Захват и перенос объекта захватным устройством манипулятора осуществляется с помощью управления, которое формируется в соответствии с измерениями датчиков силы и касания. Предложенные методы адаптивного управления были реализованы в имитационно-тренажерном комплексе, предназначенном для моделирования виртуальных роботов.

Ключевые слова: системы адаптивного управления, датчики, нечеткая логика, инверсная кинематика, виртуальные роботы, имитационно-тренажерный комплекс.

Abstract. This paper considers the problem of development of adaptive control methods for virtual robots in training simulators. With the use of implemented virtual sensors, the adaptive robot control is applied to solve some technological tasks. The robot motion control around obstacles is based on the fuzzy logic theory, measures of rangefinders and position sensors. In turn, the motion of the manipulator end effector is realized using the inverse kinematics problem solution, PD controllers, and position and orientation sensors. The capture and relocation of object by the gripper of manipulator is realized by the control formed according to the measurements of the force and touch sensors. The proposed adaptive control methods were implemented in training simulators designed for the virtual robot simulation.

Keywords: adaptive control systems, sensors, fuzzy logic, inverse kinematics, virtual robots, training simulator.

Введение. Одной из важнейших задач в робототехнике является разработка систем управления роботами, предназначенных для решения основных технологических задач. В настоящее время большинство современных роботов функционируют по принципу обратной связи [1], то есть синтез управления роботами осуществляется на основе получаемой информации о среде. При этом важно рассматривать недетерминированную

среду с неопределенностью рабочих условий, для которых заранее неизвестна последовательность действий, выполняемых роботом. В настоящей работе рассматривается адаптивное управление мобильными роботами, при котором параметры среды определяются с помощью датчиков сенсорного очувствления роботов. Такое управление роботами осуществляется на основе заранее составленных программ, запускаемых в зависимости от значений, поступающих от датчиков роботов. Актуальным направлением является использование систем виртуального окружения, в которых можно апробировать разрабатываемые методы управления роботами при реализации необходимых технологических операций. Поэтому задача, решаемая в данной работе, состоит в разработке методов адаптивного управления виртуальными роботами в рамках имитационно-тренажерного комплекса.

Датчики в имитационно-тренажерном комплексе. Имитационно-тренажерный комплекс представляет собой программный комплекс, состоящий из нескольких подсистем: управления, динамики и визуализации. Подсистема управления включает в себя редактор функциональных схем, в котором с помощью специальных блоков осуществляется построение систем управления роботами и другими механизмами. В рамках данного подхода выполняется расчет функциональных схем с вычислением на выходе исполнительных органов (колес, электрических и реактивных двигателей и т.п.) управляющих воздействий (напряжений, сил тяги и т.п.). Эти управляющие воздействия передаются в подсистему динамики, в которой осуществляется имитационное моделирование роботов и объектов виртуального окружения, после чего определяются их новые координаты (положения и ориентации). Новые координаты объектов поступают в подсистему визуализации, которая осуществляет синтез изображения с частотой не менее 25 кадров в секунду, что необходимо для обеспечения режима реального времени.

В рамках рассматриваемого имитационно-тренажерного комплекса были реализованы следующие датчики [2]: датчик положения, датчик ориентации, дальномер, датчик касания и датчик силы. Датчик положения определяет координаты своего положения в м.с.к. (мировой системе координат), а датчик ориентации углов поворотов Эйлера для его л.с.к. (локальной системы координат) относительно м.с.к. Дальномер определяет расстояние до ближайшего объекта вдоль заданного направления. Датчик касания определяет наличие взаимодействия одного объекта с другим. Датчик силы в общем случае измеряет три компоненты силы и три компоненты момента, действующие на объект, но нас здесь интересует однокомпонентный датчик силы, устанавливаемый на рабочий орган робота.

Методы адаптивного управления роботами. Реализация систем адаптивного управления с применением датчиков сенсорного очувствления осуществляется на основе решении ряда технологических задач. Эти задачи в свою очередь можно декомпозировать на более мелкие подзадачи, в которых задействовано минимальное количество параметров от датчиков. В данной работе в качестве примера мы рассматриваем задачу захвата и переноса груза мобильным роботом, которую можно разделить на задачи движения робота в заданное положение в объезд препятствий, подведение рабочего органа манипулятора к грузу, захват, перенос и опускание груза в требуемое положение. В задаче объезда роботом препятствий используются показания дальномеров и датчиков положения робота, в то время как для перемещения рабочего органа манипулятора требуется его положение и ориентация. Захват и перенос груза манипулятором

робота осуществляется с применением показаний датчиков силы и касания, установленных на рабочем органе робота. Вышеприведенные задачи образуют последовательность операций, выполняемых роботом, в которых переход от одной операции к другой осуществляется при завершении предыдущей. Далее рассмотрим методы решения этих задач.

Нечеткая логика. Задача движения мобильного робота состоит в том, чтобы переместить мобильный робот в требуемое положение в объезд препятствий и сориентировать его так, чтобы он смог захватить или положить груз. Отметим, что мобильный робот представляет собой колесное или гусеничное транспортное средство, управление движением которого осуществляется с помощью электродвигателей ведущих колес. Предполагается, что окружающая обстановка заранее неизвестна и робот не оснащен системой компьютерного зрения, то есть информацию о расположении объектов робот получает только на основе показаний дальномеров и датчиков положения. Кроме того, мы рассматриваем ситуацию, когда объекты окружающей обстановки являются статическими, а робот движется строго в горизонтальной плоскости.

Предлагаемое решение этой задачи базируется на применении теории нечеткой логики [3, 4] для управления движением колесного робота. В качестве входных переменных этой теории выбраны значения показаний дальномеров и датчиков положения. Предполагается, что дальномеры располагаются на каждой стороне робота, а датчики положения устанавливаются таким образом, чтобы определить его положение, ориентацию и габариты. В основе теории нечеткой логики выделяются три этапа: фазификация, разработка нечетких правил и дефазификация. Дальномер измеряет расстояния до ближайших объектов, по которым на этапе фазификации можно оценить принадлежность к следующим введенным термам: «Очень близко», «Близко» и «Далеко». В свою очередь по показаниям датчиков положения вычисляется угол отклонения робота от целевого направления, для которого вводятся термы: «Положительный», «Отрицательный» и «Нулевой». Нечеткие правила определяют логический вывод выходных термов на основе входных термов. Выходные термы представляют собой состояния движения робота: «Вперед», «Назад», «Разворот направо», «Разворот налево» и «Стоп». На этапе дефазификации по полученным выходным термам вычисляются напряжения, подаваемые на электродвигатели колес.

Приведем ниже несколько основных разработанных нечетких правил. При анализе показаний дальномеров на передней части робота и датчиков положения работают следующий правила:

если «Далеко» *и* «Положительный», *то* «Разворот направо»;

если «Далеко» *и* «Отрицательный», *то* «Разворот налево»;

если «Далеко» *и* «Нулевой», *то* «Вперед»;

если «Близко» *и* «Нулевой», *то* «Разворот направо»;

если «Очень близко», *то* «Назад» и т.д.

Для дальномеров, установленных на боковых сторонах робота, вводятся свои правила для объезда препятствий и ухода от столкновения. После достижения цели робот разворачивается так, чтобы в дальнейшем мог схватить или положить целевой объект.

Инверсная кинематика. После того как робот достиг заданного положения, необходимо переместить и ориентировать рабочий орган манипулятора робота в заданную систему координат для совершения захвата или опускания объекта. Это приводит к за-

даче инверсной кинематики, суть которой состоит в вычислении углов поворотов сочленений манипулятора робота, обеспечивающих заданное положение и ориентацию рабочего органа. Предлагается решение, в котором задается траектория, соединяющая начальное положение рабочего органа с конечным. Тогда, применяя метод покоординатного спуска [5] для решения задачи инверсной кинематики, ПД регуляторы и датчики положения и ориентации, осуществляется плавное движение рабочего органа по этой траектории с поддержанием требуемой ориентации.

Синтез управления по силе. Рабочий орган манипулятора мобильного робота представляет собой захватное устройство с двумя губками, которые перемещаются параллельно друг к другу под управлением одного двигателя. Рассматриваемая задача состоит в том, чтобы определить напряжение, подаваемое на вал двигателя, для обеспечения необходимой силы сжатия объекта для его удержания. В общем случае сила сжатия должна не превышать максимального значения так, чтобы не сломать манипулятор и не повредить захватываемый объект (например, при захвате пластиковой бутылки).

Для решения этой задачи предлагается использовать датчики сил и касания, установленные на губках захватного устройства робота. Тогда управление будет формироваться на основе показаний этих датчиков, а также математической модели электродвигателя [6] и закона Кулона для моделирования трения скольжения. Из условия равновесия момента двигателя и моментов сил реакции связи на губках захватного устройства получим следующее соотношение:

$$u = \frac{L(f_1 + f_2)}{M_П}, \tag{1}$$

где u – напряжение, подаваемое на вал двигателя; $M_П$ – пусковой момент; f_1 и f_2 – показания датчиков сил на губках; L – плечо сил сжатия губок (из симметрии захватного устройства это плечо одинаково для обеих губок).

Для удержания объекта силы трения на губках захватного устройства должны превышать силу тяжести объекта. Применяя закон Кулона для сил трения, получим следующее неравенство:

$$f_1 + f_2 \geq mg / \mu, \tag{2}$$

где m – масса груза; g – ускорение свободного падения; μ – коэффициент трения скольжения для двух материалов (губок и груза).

Алгоритм управления губками захватного устройства будет следующим. После фиксации губками объекта, определяемой на основе датчиков касания, напряжение, определяемое выражением (1), увеличиваем до $u_{\max}$, пока не будет выполнено неравенство (2). Из выражений (1) и (2) для $u_{\max}$ будет справедливо неравенство

$$u_{\max} \geq \frac{mgL}{\mu M_П}. \tag{3}$$

Результаты моделирования. Апробация предложенных в данной работе методов адаптивного управления виртуальными роботами проводилась в рамках имитационно-тренажерного комплекса, разработанного в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Для этого была выбрана виртуальная модель гусеничного робота МФ-4 и виртуальная сцена ангара,

содержащая коробки, бочки и другие препятствия. Решаемая технологическая задача состоит в том, чтобы обезвредить радиоактивный объект, опустив его в специальную урну. Гусеничный робот должен проехать к радиоактивному объекту, схватить его, подъехать к урне и опустить объект в урну. Эта задача разбивается на отдельные подзадачи, решаемые с применением нечеткой логики для движения робота в объезд препятствий, инверсной кинематики для подведения захватного устройства манипулятора и формирования напряжения (3) для удержания объекта. При этом предполагается, что робот в состоянии свободно проехать внутри этого ангара без расчистки от препятствий. На рисунке 1 показано опускание радиоактивного объекта в урну с помощью манипулятора гусеничного робота.

Рис. 1. Опускание объекта в урну

Заключение. В данной работе было рассмотрено несколько примеров технологических задач, выполняемых виртуальным роботом в автоматическом режиме. Предложенные методы адаптивного управления роботом позволяют эффективно решать эти задачи без активного участия человека в процессе управления, обеспечивая при этом необходимую точность и быстроту реакции исполнения. В дальнейшем ожидается расширение базы решаемых задач до более сложных, включая такие задачи, как закручивание роботом гайки, открытие люка и т.п.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-01104.

Список использованных источников

1. **Юревич Е. И.** Основы робототехники / Е. И. Юревич – 4-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 304 с.

2. **Михайлюк, М. В.** Моделирование датчиков в системах виртуального окружения / М. В. Михайлюк, Е. В. Страшнов, Д. М. Логинов // Труды НИИСИ РАН. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 70-76.

3. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.

4. **Ющенко, А. С.** Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами / А. С. Ющенко // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – С. 29 – 43.

5. **Страшнов, Е. В.** Супервизорное управление антропоморфными роботами с применением инверсной кинематики / Е. В. Страшнов, М. А. Торгашев // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2017. – Вып. 4, Т. 1. – С. 186 – 190.

6. **Страшнов, Е. В.** Моделирование динамики электроприводов виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах / Е. В. Страшнов, М. А. Торгашев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 11. – С. 762 – 768.

References

1. **Jurevich, E. I.** Osnovy robototehniki / E. Jurevich – 4-e izd. – Spb. : BHV-Peterburg, 2018. – 304 p.

2. **Mihajljuk, M. V.** Modelirovanie datchikov v sistemah virtual'nogo okruzhenija / M. V. Mihajljuk, E. V. Strashnov, D. M. Loginov // Proceedings of SRISA RAS. – 2018. – V. 8, № 2 – P. 70 – 76.

3. **Piegat, A.** Fuzzy modeling and control / A. Piegat. – 2-e izd. – M. : BINOM. Laboratorija znanij, 2013. – 798 p.

4. **Juschenko, A. S.** Metody nechetkoj logiki v upravlenii mobil'nymi manipuljacionnymi robotami / A. S. Juschenko // Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. "Priborostroenie". – 2012. – P. 29 – 43.

5. **Strashnov, E. V.** Supervizornoe upravlenie antropomorfnymi robotami s primeneniem inversnoj kinematiki / E. V. Strashnov, M. A. Torgashev // Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn : materials of the IV international scientific and practical conference. – 2017. – № 4, Vol. 1. – P. 186 – 190.

6. **Strashnov, E. V.** Modelirovanie dinamiki elektrprivodov virtual'nyh robotov v imitacionno-trenazhernyh kompleksah / E. V. Strashnov, M. A. Torgashev // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2016. – V. 17, № 11. – P. 762 – 768.

УДК 004.94

Страшнов Е. В., Мальцев А. В.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

РАЗРЕШЕНИЕ КОЛЛИЗИЙ СИСТЕМ ШАРНИРНО СВЯЗАННЫХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЛОЧНОГО ПОДХОДА

Strashnov E. V., Maltsev A. V.
Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

COLLISION RESPONSE OF ARTICULATED BODY SYSTEMS WITH BLOCK SOLVER APPLICATION

Аннотация. Рассмотрена задача моделирования разрешения коллизий шарнирно связанных тел в системах виртуального окружения. Моделирование динамики систем тел осуществляется с помощью метода составных тел и его модификаций на основе импульсов. Предлагается решение, в котором разрешение коллизий осуществляется с применением блочного подхода для каждой пары тел с последующей формулировкой в виде задачи LCP (задача с линейными дополнениями) относительно неизвестных импульсов. Вычисленные аналитически импульсы задачи LCP используются в алгоритме итерационного метода последовательных импульсов с обобщенными координатами. Разработанные методы и алгоритмы разрешения коллизий системы шарнирно связанных тел с помощью блочного подхода были реализованы в имитационно-тренажерном комплексе, предназначенном для моделирования виртуальных роботов.

Ключевые слова: метод составных тел, блочный подход, задача LCP, метод последовательных импульсов, системы виртуального окружения.

Abstract. This paper considers the problem of collision response simulation for articulated bodies in virtual environment systems. Multibody dynamics simulation is performed by the articulated-body method and its modifications on the basis of impulses. A solution is proposed in which the collision response with a block approach is realized for each pair of bodies with subsequent LCP (Linear Complementarity Problem) formulation with respect to unknown impulses. The analytically calculated impulses of the LCP are used in the algorithm of iterative sequential impulses method with generalized coordinates. The developed methods and algorithms for collision response of articulated body systems with a block solver were implemented in the training simulator designed for simulation of virtual robots.

Keywords: articulated-body method, block solver, LCP problem, sequential impulses method, virtual environment systems.

Введение. Моделирование динамики шарнирно связанных тел является важной и актуальной задачей в видеотренажерных комплексах и системах виртуального окружения. Это связано с тем, что в этих системах часто необходимо моделировать движение

манипуляторов роботов, подвесок колес, рук или ног антропоморфных роботов, сложных механизмов и т.д. В процессе моделирования звенья системы шарнирно связанных тел могут взаимодействовать друг с другом, а также с другими объектами окружающей обстановки. Рассматриваемая проблема приводит к задаче разрешения коллизий систем шарнирно связанных тел с учетом наличия контакта, удара и трения между телами. Для решения этой задачи в данной работе предлагается задействовать метод составных тел [1] и его модификации [2, 3] на основе импульсов с реализацией разрешения коллизий тел с помощью блочного подхода.

Метод составных тел. Моделирование динамики шарнирно связанных тел осуществляется с применением рекурсивного метода составных тел. В этом методе система тел описывается с помощью обобщенных координат, определяющих относительное движение тел. На каждом шаге моделирования динамики рассматриваемого метода вычисляются обобщенные ускорения. Алгоритм метода составных тел реализуется в три прохода по дереву системы тел, поэтому имеет сложность $O(N)$, где N – количество тел в системе. Вычисленные с помощью метода составных тел обобщенные ускорения в дальнейшем используются в схеме интегрирования уравнений движения для определения обобщенных скоростей и координат.

Метод составных тел применим только для систем шарнирно связанных тел со структурой в виде дерева и не позволяет моделировать замкнутые кинематические цепи и ограничения различного типа. Для преодоления этой проблемы разработано несколько модификаций рассматриваемого метода, основанные на передаче воздействий импульса по всей системе тел. Опишем идею этого подхода. При рассмотрении некоторого ограничения относительно скоростей тел составляется уравнение для величины импульса p_f:

$$p_f = m_{eff}\Delta v = m_{eff}(v^d - v^c), \tag{1}$$

где m_{eff} – эффективная масса; v^c – текущая скорость; v^d – желаемая скорость.

Первая модификация метода составных тел состоит в том, чтобы определить эффективную массу m_{eff}. Для этого применяется единичный импульс $p_f = 1$, по которому определяется изменение скорости ограничения Δv. Тогда искомая эффективная масса вычисляется как $m_{eff} = 1/\Delta v$.

Вторая модификация метода составных тел реализована для вычисления обобщенных скоростей после применения импульса p_f из уравнения (1). С помощью алгоритма метода последовательных импульсов с обобщенными координатами [3] процедура обеспечения выполнения ограничений состоит в вычислении импульсов с последующим изменением скоростей. Это позволяет моделировать ограничения различного типа, возникающие при рассмотрении замкнутых кинематических цепей, коллизий звеньев системы тел и т.д.

Блочный подход для разрешения коллизий тел. В силу того, что в общем случае требуется обеспечить выполнение большого количества ограничений для системы шарнирно связанных тел, применение импульса p_f из выражения (1) может оказаться

вычислительно затратным. Альтернативным решением является одновременное рассмотрение всех ограничений с решением задачи LCP [4] (задача с линейными дополнениями). Однако в этом случае потребуется сначала определить все элементы матрицы системы LCP высокой размерности, а затем решить LCP с помощью прямых или итерационных методов, что тоже может привести к большим накладным расходам. В данной работе предлагается промежуточное решение, суть которого состоит в формировании и аналитическом решении нескольких задач LCP небольшой размерности, составленных при рассмотрении контакта пар тел. Этот подход имеет место в силу того, что существующие алгоритмы определения коллизий пары тел [5] возвращают небольшое количество точек контактного взаимодействия (не более четырех). Тогда неизвестные импульсы контакта пары тел вычисляются одновременно с последующим изменением скоростей тел.

Аналитическое решение задачи LCP основано на переборе всевозможных решений при контакте двух тел. Для размерности задачи M получаем 2^M возможных решений, перебор которых осуществляется на основе анализа текущего варианта решения. Найденное решение задачи LCP контакта пары тел используется в модификации метода составных тел для того, чтобы определить новые скорости тел. Полеченные скорости далее используются при рассмотрении следующих по очереди ограничений метода последовательных импульсов. Данная процедура выполняется по всем ограничениям и повторяется до тех пор, пока не будет выполнен один из критериев окончания итераций.

Заключение. Предложенные методы и алгоритмы моделирования разрешения коллизий систем шарнирно связанных тел с помощью блочного подхода были реализованы в виде программных модулей имитационно-тренажерного комплекса, разработанного в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Этот программный комплекс осуществляет в масштабе реального времени имитационное моделирование динамики и управление виртуальными мобильными и антропоморфными роботами. На рисунке 1 показан пример выполнения

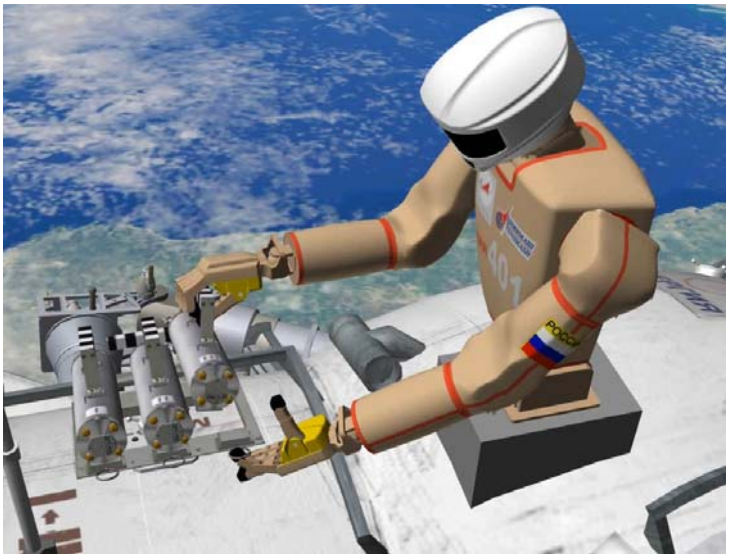


Рис. 1. Извлечение контейнера антропоморфным роботом

операции извлечения контейнера прибора «Биориск» с помощью антропоморфного торсового робота. Полученные результаты показывают, что применение блочного подхода для разрешения коллизий тел позволило повысить качество моделирования, а также уменьшить время вычислений и количество итераций метода последовательных импульсов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00137.

Список использованных источников

1. **Featherstone, R.** Rigid body dynamics algorithms / R. Featherstone. – New Jork : Springer-Verlag, 2008. – 280 p.
2. **Mirtich, B.** Impulse-based dynamic simulation of rigid body systems / B. Mirtich. – PhD thesis, University of California, Berkeley, 1996.
3. **Mikhaylyuk, M. V.** Algorithms of multibody dynamics simulation using articulated-body method, Mathematica Montsinigri / M. V. Mikhaylyuk, E. V. Strashnov, P. Yu. Timokhin. – 2017. – Vol. XXXIX. – P. 133 – 145.
4. **Murty, K. G.** Linear complementarity, linear and nonlinear programming / K. G. Murty. – Helderman-Verlag, Berlin, Germany, 1988.
5. **Moravanszky, A.** Fast contact reduction for dynamics simulation. In Game Programming Gems 4. Charles River Media / A. Moravanszky, P. Terdiman. – 2004. – P. 253 – 263.

УДК 004.946

Мальцев А. В., Страшнов Е. В.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ 3D-ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИХ МАТЕРИАЛОВ

Maltsev A. V., Strashnov E. V.
Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

METHODS FOR 3D OBJECT VISUALIZATION WITH REGARD TO PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Аннотация: Предложены оригинальные методы и подходы для выполнения на GPU реалистичной визуализации объектов трехмерной виртуальной среды. Они основаны на приближенной имитации физических свойств отражения света материалами объектов. Для описания таких свойств используется набор специально подготавливаемых текстурных карт. Предлагаемые подходы, с одной стороны, позволяют достичь более высокой реалистичности синтезируемых изображений по сравнению с классическими методами на базе модели расчета освещенности Блинна–Фонга, а с другой – имеют значительно меньшую трудоемкость, чем известные глобальные модели фотореалистичной визуализации. Рендеринг трехмерных сцен в масштабе реального времени, необходимом для правильной работы систем виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексов, обеспечивается применением возможностей распределенных вычислений на современных многоядерных графических процессорах.

Ключевые слова: трехмерная сцена, виртуальный объект, материал, физические свойства, визуализация, шейдеры, отраженный свет.

Abstract. This paper proposes original methods and approaches for realistic GPU visualization of 3D virtual environment objects. They are based on approximate imitation of physical properties of light reflection by objects' materials. To describe such properties, a set of specially prepared texture maps is used. The proposed approaches allow achieving higher realism of synthesized images compared with classic methods based on illumination calculation by means of the Blinn-Phong shading model, on the one hand ,and have much less laboriousness than known global models of photorealistic visualization, on the other. Rendering of 3D scenes in real time mode is needed for correct functioning of virtual environment systems and training simulators is provided by using ability of distributed computing on modern multi-core GPU.

Keywords: three-dimensional scene, virtual object, material, physical properties, visualization, shaders, reflected light.

Введение. В настоящее время во многих научных и технических областях используется компьютерное моделирование и визуализация трехмерных виртуальных сцен. Такое моделирование широко применяется в системах виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексах управления сложными техническими системами.

Одна из основных задач, решаемых в ходе компьютерного рендеринга трехмерных сцен, заключается в расчете освещения объектов синтезируемой виртуальной среды. Двумя основными направлениями решения этой задачи являются использование некоторых упрощенных моделей расчета света, отраженного от поверхностей объектов (например, Фонга [1], Блина [2] и т.п.), и применение глобальных моделей освещения [3 – 5]. Первое направление хорошо изучено, однако получаемый результат не обеспечивает достаточной реалистичности получаемых изображений. Использование же глобальных моделей относится к высоко реалистичной визуализации. Такой подход требует больших вычислительных мощностей и, как правило, не обеспечивает работу системы визуализации в масштабе реального времени, требуемом для корректного функционирования тренажерных комплексов и систем виртуального окружения.

В данной работе предлагаются новые распределенные методы и алгоритмы реалистичного рендеринга объектов виртуальной среды на современных многоядерных графических процессорах в реальном времени. Разработанные решения являются промежуточным вариантом между классической визуализацией трехмерных сцен с расчетом освещения виртуальных объектов с помощью модели Блинна-Фонга и рендерингом по глобальным моделям. В основе предлагаемых подходов лежит приближенная имитация физических свойств отражения света материалами объектов.

Моделирование отражения света от виртуальных объектов. Распределенная имитация физически корректного отражения света от поверхностей виртуальных объектов в данной работе выполняется попиксельно на графических процессорах с поддержкой шейдеров последнего поколения. Интенсивность света, отраженного в точке поверхности, рассчитывается во фрагментом шейдере с помощью разработанной нами оригинальной математической модели (подробное ее описание можно найти в работе [6]), в основе которой лежит BRDF-модель Кука–Торренса [7]. Вычисления производятся параллельно для множества точек каждого объекта. Преимущества данной модели заключаются в возможности реализации в виртуальной среде нескольких типов источников освещения, а также теней различной плотности и мягкости.

Чтобы описать физические параметры материала визуализируемого объекта, используемые при вычислении интенсивности отраженного света по упомянутой модели, такие как отражательная способность, диффузный цвет, шероховатость и микрорельеф поверхности и т.д., предлагается применять специальный набор текстур. Общее количество текстурных карт в таком наборе может варьироваться для разных материалов, но четыре из них являются базовыми: карта основного цвета (или *альбедо*), карта металлических свойств материала, карта шероховатости поверхности и карта нормалей.

Описание физических параметров материалов в виде текстур. В предлагаемом подходе материалы объектов виртуальной среды классифицируются на металлы и диэлектрики. Это связано с существенными различиями в физических свойствах отражения света данными двумя классами. Чистые металлы обладают высокой отражательной способностью, поэтому хорошо отражают падающие на их поверхность световые лучи. Преломленный свет при этом полностью поглощается, в связи с чем в отраженном световом потоке отсутствует диффузная составляющая. Неметаллы (диэлектрики), наоборот, имеют низкую отражательную способность, а основную долю отраженного от них света представляет именно диффузный свет, возникающий в результате многочисленных переотражений преломленных лучей внутри материала и выхода их вновь в окру-

жающую среду вблизи точек преломления. Определение металлических и диэлектрических участков поверхности каждого объекта виртуальной среды производится с помощью карты металлических свойств материала (*metallic map*) – текстуры в оттенках серого цвета, в которой белый цвет соответствует чистому металлу, а черный задает диэлектрик. Промежуточные оттенки используются для моделирования коррозии и загрязнений различной степени, которые приводят к смещению отражательных свойств изначального металла в сторону диэлектрика. Отметим, что в используемом подходе покрашенный металл также трактуется как диэлектрик. Значение интенсивности серого цвета из описанной текстуры используется для вычисления долей зеркально отраженной и диффузной компонент в отраженном от поверхности объекта свете.

Карта основного цвета (*albedo map*) представляет собой RGB-текстуру. Пикселы этой текстуры, соответствующие металлическим участкам в карте металлических свойств материала, кодируют значения F_0 коэффициентов Френеля для R, G и B компонент светового луча в случае его падения перпендикулярно поверхности объекта (т.е. угол падения равен 0°). Пикселы, относящиеся к диэлектрическим участкам, задают коэффициенты диффузного отражения света (диффузный цвет) моделируемым материалом. Отметим, что текстура альбедо, как правило, создается дизайнерами в цветовом пространстве sRGB, что позволяет точнее отображать ее цвета на мониторах. В связи с этим перед использованием данных этой карты для расчета интенсивности отраженного в точке объекта света необходимо выполнять гамма-коррекцию значения каждого цветового канала R, G и B по формуле:

$$k_{linear} = \left(k_{sRGB} / 255\right)^{\gamma},$$

где $k_{sRGB} \in [0,255]$ – считываемое из пиксела текстуры значение канала (в пространстве sRGB); $k_{linear} \in [0.0,1.0]$ – результирующее значение в линейном пространстве; γ – параметр коррекции (обычно равен 2,2).

В предлагаемом подходе расчета интенсивности отраженного света также применяется моделирование шероховатости и микрорельефа поверхности. Шероховатость материала задается с помощью коэффициента шероховатости и определяет степень рассеивания отраженного от объекта света. Чем она больше, тем шире и тусклее блики, и наоборот. Коэффициенты шероховатости в каждой точке поверхности объекта записываются в карте шероховатости (*roughness map*) – текстуре в оттенках серого цвета. Белый цвет в ней задает наибольшую степень шероховатости, а черный – идеально гладкую поверхность. Микрорельеф моделируется с помощью карты нормалей (*normal map*), в каждом пикселе которой в цветовом формате закодирован вектор нормали, соответствующий точке поверхности.

Заключение. В результате проведенных исследований были разработаны методы и подходы для распределенного рендеринга трехмерных сцен с имитацией физически корректного отражения света от поверхностей виртуальных объектов. На основе предложенных решений были созданы программные модули, широко использующие распределенные вычисления на современных многоядерных GPU и обеспечивающие реалистичную визуализацию объектов трехмерной виртуальной среды в масштабе реального времени. Данные модули прошли успешную апробацию в составе системы визуализации, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, которая подтвердила возможность

применения полученных в исследовании научных и практических результатов при разработке имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00950.

Список использованных источников

1. **Phong, B. T.** Illumination for computer generated pictures / B. T. Phong // Communications of ACM 18. – 1975. – № 6. – P. 311 – 317.
2. **Blinn, J. F.** Models of light reflection for computer synthesized pictures / J. F. Blinn // Proceedings of 4th annual conference on computer graphics and interactive techniques. – 1977. – P. 192 – 198.
3. **Ritschel, T.** The state of the art in interactive global illumination / T. Ritschel, C. Dachsbacher, T. Grosch, J. Kautz // Computer Graphics Forum. – V. 31(1). – P. 160 – 188.
4. **Jensen, H. W.** Global illumination using photon maps / H. W. Jensen // In Proceedings of the 7th Eurographics Workshop on Rendering. – 1996. – P. 21 – 30.
5. **Keller, A.** Instant radiosity / A. Keller // Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1997. – P. 49 – 56.
6. **Мальцев, А. В.** Модель расчета отраженного света для имитации на GPU физически корректного освещения объектов виртуальной среды / А. В. Мальцев, Д. В. Омельченко // Труды НИИСИ РАН. – 2018. – Т. 8, № 4.
7. **Cook, R. L.** A reflectance model for computer graphics / R. L. Cook, K. E. Torrance // ACM Transactions on Graphics. – 1982. – № 1(1). – P. 7 – 24.

References

1. **Phong, B. T.** Illumination for computer generated pictures / B. T. Phong // Communications of ACM 18. – 1975. – № 6. – P. 311-317.
2. **Blinn, J. F.** Models of light reflection for computer synthesized pictures / J. F. Blinn // Proceedings of 4th annual conference on computer graphics and interactive techniques. – 1977. – P. 192 – 198.
3. **Ritschel, T.** The state of the art in interactive global illumination / T. Ritschel, C. Dachsbacher, T. Grosch, J. Kautz // Computer Graphics Forum. – V. 31(1). – P. 160 – 188.
4. **Jensen, H. W.** Global illumination using photon maps / H. W. Jensen // In Proceedings of the 7th Eurographics Workshop on Rendering. – 1996. – P. 21 – 30.
5. **Keller, A.** Instant radiosity / A. Keller // Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1997. – P. 49 – 56.
6. **Maltsev, A. V.** Model rascheta otrazhennogo sveta dlia imitatsii na GPU fizicheski korrektnogo osveshcheniia obieektov virtualnoi sredy / A. V. Maltsev, D. V. Omelchenko // Trudy NIISI RAN. – 2018. – V. 8, № 4.
7. **Cook, R. L.** A reflectance model for computer graphics / R. L. Cook, K. E. Torrance // ACM Transactions on Graphics. – 1982. – № 1(1). – P. 7 – 24.

УДК 004.946

Мальцев А. В., Тимохин П. Ю.
ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

МЕТОДЫ НАХОЖДЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ СИСТЕМ ЧАСТИЦ С ОБЪЕКТАМИ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ

Maltsev A. V., Timokhin P. Yu.
Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

METHODS TO FIND COLLISIONS OF PARTICLE SYSTEMS WITH VIRTUAL ENVIRONMENT OBJECTS

Аннотация. Предложены два распределенных подхода для моделирования столкновений объектов, образованных совокупностью мелкоразмерных частиц, с другими объектами виртуальной среды. Первый из них заключается в использовании аппаратного *z*-буфера графического конвейера для синтеза карты глубины трехмерной сцены из положения эмиттера системы частиц и применении этой карты при поиске точек коллизий частиц с поверхностями объектов. Метод эффективен для систем частиц, элементы которых перемещаются по траекториям, близким к параллельным прямым. Второй подход является более трудоемким, но и более универсальным. Он основан на применении пространственного разбиения виртуальной сцены на непересекающиеся области с помощью регулярной сетки и поиске коллизий каждой частицы только с теми полигонами объектов, которые пересекают пройденные частицей ячейки сетки. Поиск точек столкновения в обоих случаях, а также построение сетки выполняются на GPU с использованием архитектуры параллельных вычислений CUDA.

Ключевые слова: виртуальная среда, система частиц, коллизия, карта глубины, регулярная сетка, шейдеры, CUDA.

Abstract. This paper proposes two distributed approaches to simulation of particle system collisions with other objects in the virtual environment. The first one is to apply hardware z-buffer of graphics pipeline for scene depth map synthesis from a position of particle system emitter and to find particle collision points with object surfaces by means of this map. The method is applicable, if the particle system elements move along almost parallel straight trajectories. The second approach is more computationally laborious, but more universal. It is based on the virtual scene spatial subdivision by means of a regular grid and search for each particle collisions only with the object polygons which cross grid cells passed by this particle. Search of collision points in both cases and the grid construction are performed on GPU with using CUDA architecture of parallel computing.

Keywords: virtual environment, particle system, collision, depth map, regular grid, shaders, CUDA.

Введение. Одним из наиболее часто происходящих типов взаимодействия объектов виртуальной среды являются столкновения, или коллизии [1]. Решение задачи поиска и обработки таких коллизий зависит от типа сталкивающихся объектов, их формы и т.д. В целях ускорения вычислений применяются различные методики, в том числе, например, использование аппроксимирующих объемов [2, 3]. Особый интерес представляют коллизии объектов, образованных системами мелкоразмерных частиц, с поверхностями других объектов в трехмерных сценах. Количество элементов в каждой из таких систем может достигать десятков миллионов, поэтому традиционные методы и алгоритмы поиска коллизий, как правило, не могут обеспечить выполнение расчетов в масштабе реального времени. Однако последнее является особенно актуальным в области систем виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексов.

Перспективным направлением для эффективного моделирования столкновений сложных объектов является использование многоядерных графических процессоров (GPU), позволяющих обеспечить высокую степень параллелизма вычислений. Например, в исследовании [4] для нахождения коллизий систем частиц предложены методы и алгоритмы, использующие шейдеры и *z*-буфер видеокарты. Недостатком описанного подхода является использование шейдеров для выполнения вычислений, не относящихся к визуализации сцены, поскольку возникает необходимость хранения данных в виде массива текстур, а каждую из них надо обновлять в отдельном проходе рендеринга.

В данной работе предлагаются два новых распределенных метода поиска на GPU точек коллизий систем частиц с объектами трехмерных сцен, использующих возможности архитектуры параллельных вычислений CUDA. Первый метод основан на image-based-технологии с применением карт глубины и ориентирован на системы частиц, элементы которых перемещаются прямолинейно по траекториям, близким к параллельным. Его преимуществами являются высокая степень параллелизма, скорость выполнения и экономное использование видеопамяти. Второй метод использует пространственное разбиение в виде регулярной сетки и является более универсальным. Он применим для частиц с произвольными траекториями движения. Несмотря на довольно высокую вычислительную трудоемкость, плюсом данного подхода является то, что одна и та же сетка может использоваться для всех систем частиц в сцене. Оба предлагаемых решения поддерживают выполнение в масштабе реального времени. Рассмотрим каждый из методов подробнее.

Метод на основе карт глубины. Идея предлагаемого метода состоит в размещении в эмиттере E системы частиц фиктивной виртуальной камеры с ортографическим проецированием. Вектор направления взгляда данной камеры совпадает с направлением $\boldsymbol{D}$ движения частиц и перпендикулярен плоскости эмиттера. Пирамида видимости задается так, чтобы она охватывала область распространения частиц. Для этого левая l_p, правая r_p, нижняя b_p и верхняя t_p плоскости отсечения устанавливаются по границам E. Здесь и далее мы будем рассматривать эмиттер в виде прямоугольника с размером $W \times H$. Тогда $l_p = -W/2$, $r_p = W/2$, $b_p = -H/2$, $t_p = H/2$. Ближняя плоскость отсечения должна располагаться на небольшом расстоянии n_p от E, например, 0,1 (в единицах измерения, установленных при создании виртуальной сцены). Дальняя – на некотором расстоянии f_p, значение которого больше, чем длина максимального пути, проходимого

произвольной частицей системы за время ее жизни. Заданная таким образом виртуальная камера имеет видовую систему координат *VCS* с началом в точке P_e – центре прямоугольника *E*, показанную на рис. 1.

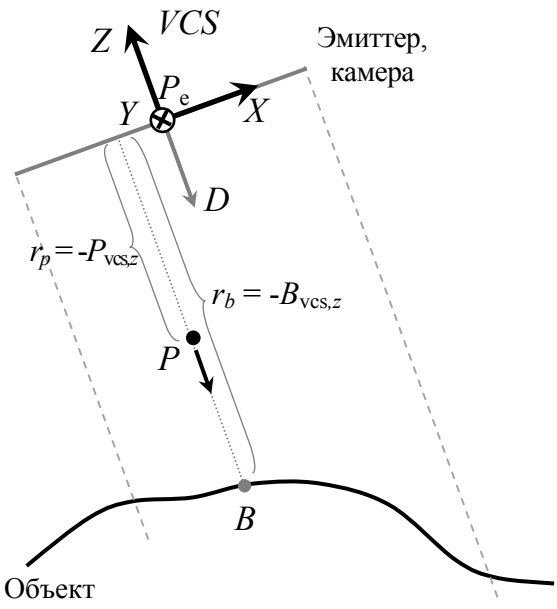


Рис. 1. Анализ наличия коллизии частицы с объектом

Перед каждым расчетом параметров системы частиц, выполняемом на CUDA-совместимом GPU по описанным в работе [5] методам и алгоритмам, производится визуализация сцены из выставленной фиктивной камеры. Каждый пиксел получаемого в результате *z*-буфера содержит нормализованное расстояние $d \in [0.0, 1.0]$ от плоскости эмиттера *E* до некоторой точки *B* ближайшего к ней объекта в направлении ***D*** по линии, проходящей через этот пиксел. Благодаря использованию технологии FBO (*framebuffer object*), запись данных *z*-буфера осуществляется напрямую в текстуру – карту глубины T_{depth}. Для дальнейшего использования значения *d* в каждом пикселе текстуры конвертируются в расстояния r_b (рис. 1) в единицах системы *VCS* с помощью дополнительного шейдера по формуле

$$r_b = -B_{vcs,z} = n_p + d\left(f_p - n_p\right)$$

и сохраняются в виде одноканальной текстуры T_r совместимого с CUDA формата *GL_R32F*. Данная текстура передается в CUDA-ядро расчета параметров частиц системы. Каждый вычислительный поток этого ядра обрабатывает одну частицу, вычисляя для ее центральной точки *P* текущее положение, скорость и другие необходимые параметры. Рассчитав в текущий момент времени новое положение частицы в мировой системе координат *WCS*, поток определяет также ее координаты P_{vcs} в видовой системе

VCS виртуальной камеры, размещенной в эмиттере *E*. Далее он сравнивает расстояние $r_p = -P_{vcs,z}$ от плоскости эмиттера до частицы с расстоянием r_b (считывается из текстуры T_r) от эмиттера до точки *B* некоторого объекта сцены по лучу, проходящему через *P* и перпендикулярному *E* (рис. 1). Если $r_b \le r_p$, то глубина частицы относительно *E* больше, чем глубина некоторой точки *B* поверхности объекта сцены, значит существует коллизия частицы и объекта. Координаты точки *B* столкновения в мировой системе координат *WCS* при этом определяются по формуле

$$B_{\text{wcs}} = M_{\text{v}}^{-1}\left(P_{\text{vcs},x}, P_{\text{vcs},y}, -r_b\right),$$

где M_v – видовая матрица фиктивной камеры, переводящая из системы *WCS* в систему *VCS*.

Метод на основе регулярной сетки. Задача нахождения коллизий систем частиц с объектами трехмерных виртуальных сцен обладает схожими чертами с проблемой трассировки световых лучей. Поэтому одним из эффективных способов ее решения является использование пространственных структур данных, аналогичных тем, которые применяются в процессе трассировки. К числу таких структур относятся регулярные сетки, представляющие собой разбиение виртуальной сцены плоскостями, параллельными координатным плоскостям мировой системы координат *WCS*, на трехмерные ячейки-вокселы. Для каждого воксела составляется список пересекающих его полигонов (треугольных граней объектов). Таким образом, определив какие вокселы пролетает частица за некоторый промежуток времени, мы будем искать ее коллизии не со всеми объектами виртуальной среды, а только с теми полигонами объектов, которые относятся к этим ячейкам.

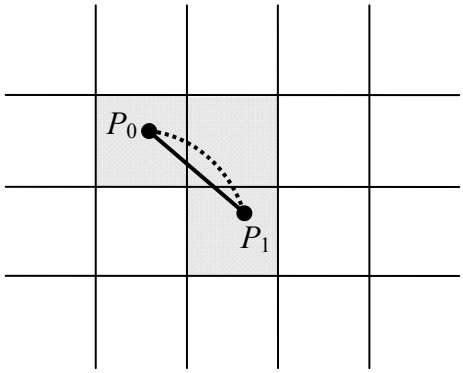


Рис. 2. Аппроксимация пути частицы между точками расчета

Синтез данных для регулярной сетки трехмерной сцены включает несколько основных этапов, а именно: построение ограничивающего параллелепипеда *AABB* сцены, стороны которого параллельными плоскостям системы *WCS*, разделение этого *AABB* на вокселы и составление списков индексов полигонов, пересекающих каждую ячейку. Сложность задачи заключается в том, что для динамических сцен, где объекты с течением времени перемещаются, появляются и исчезают, требуется выполнять перечисленные операции перед визуализацией каждого кадра в масштабе реального времени, необходимом для правильной работы имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения. Решением в данной ситуации является использование распределенных вычислений на современных многоядерных GPU с поддержкой архитектуры CUDA. Методы и алгоритмы распределенного построения регулярной сетки на таких GPU подробно представлены нами в работе [6].

Данные, синтезированные при построении регулярной сетки, передаются в CUDA-ядро, вычисляющее состояние системы частиц. Каждый поток (*thread*) на GPU рассчи-

тывает параметры (положение, скорость, время жизни и т.д.) одной частицы в текущий момент времени, рассматривая ее как точку виртуального пространства – центр соответствующей модели частицы [5]. После определения нового положения P_1 частицы поток производит поиск ее коллизий с объектами сцены на пути между данной точкой и предыдущим положением P_0. Так как расчет состояния и отображение системы частиц производятся в момент синтеза очередного кадра изображения с частотой не менее 25 раз в секунду, то путь между указанными точками можно аппроксимировать отрезком P_0P_1 (рис. 2). CUDA-поток последовательно просматривает вокселы регулярной сетки, пересекаемые отрезком P_0P_1, начиная с воксела, в котором лежит точка P_0. В каждом из таких вокселов выполняется анализ наличия пересечения отрезка с приписанными к ячейке полигонами. В случае наличия хотя бы одного пересечения, которое лежит внутри текущего воксела, проход по вокселам останавливается. Точка пересечения при этом устанавливается в качестве точки коллизии частицы с объектом. Если пересечений несколько, то выбирается ближайшее из них к предыдущему положению P_0 частицы.

Заключение. В результате проведенных исследований были созданы эффективные методы и алгоритмы моделирования коллизий систем частиц с объектами трехмерной виртуальной среды в масштабе реального времени, широко использующие распределенные вычисления на современных многоядерных GPU. На основе предложенных методов и алгоритмов были созданы программные модули, обеспечивающие реализацию коллизий частиц в системах визуализации трехмерных виртуальных сцен. Также была проведена апробация этих модулей в составе системы визуализации, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, которая подтвердила применимость полученных в исследовании решений в системах виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексах.

Рисунки 3 и 4 показывают примеры моделирования коллизий систем частиц с объектами виртуальной среды с использованием описанных методов на основе карты глу-

Рис. 3. Определение коллизий снежинок с объектами с помощью карты глубины

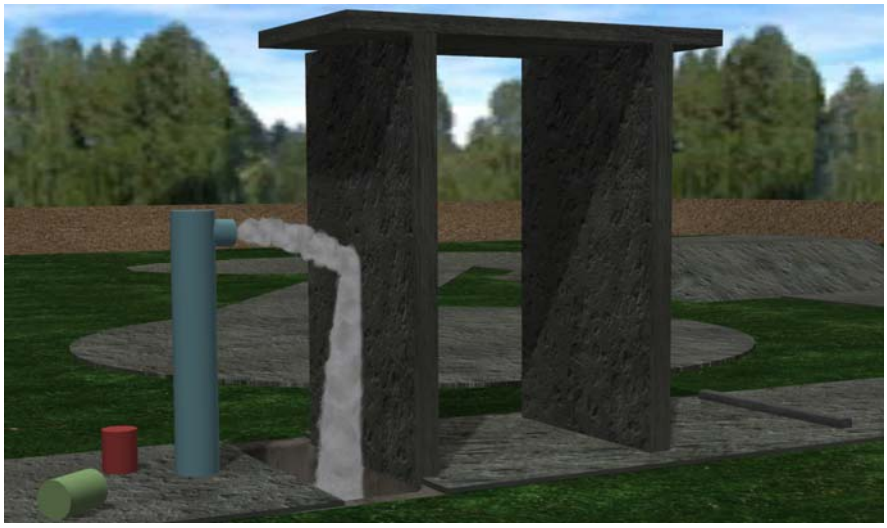


Рис. 4. Коллизии частиц пены с бетонной стеной на основе регулярной сетки

бины и регулярной сетки. Так, на рис. 3 наблюдатель находится в укрытии под бетонными плитами, куда не проникает падающий снег. Рисунок 4 демонстрирует взаимодействие струи пены, реализованной с помощью частиц, с твердой поверхностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00796.

Список использованных источников

1. **Ming, C. L.** Collision detection between geometric models: a survey / C. L. Ming, S. Gottschalk // Proc. of IMA conference on mathematics of surfaces. – 1998. – V. 1. – P. 602 – 608.

2. **Variational** sphere set approximation for solid objects / R. Wang, K. Zhou, J. Snyder, X. Liu, H. Bao, Q. Peng, B. Guo // Visual Computer. – 2006. – № 22(9). – P. 612 – 621.

3. **Трушин, А. М.** Определение коллизий аппроксимирующих капсул и сфер трехмерных виртуальных динамических объектов / А. М. Трушин, М. В. Михайлюк // Труды НИИСИ РАН. – 2016. – Т. 6, № 2. – С. 42 – 45.

4. **Kolb, A.** Hardware-based Simulation and Collision Detection for Large Particle Systems / A. Kolb, L. Latta, C. Rezk-Salama // In Proc. of the ACM SIGGRAPH/ EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware. – 2004. – P. 123 – 131.

5. **Мальцев, А. В.** Реализация системы частиц в реальном времени на GPU / А. В. Мальцев // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 57 – 62.

6. **Мальцев, А. В.** Построение адаптивной регулярной сетки трехмерной сцены в реальном режиме времени / А. В. Мальцев // Программные продукты и системы. – 2010. – № 4. – С. 41 – 45.

References

1. **Ming, C. L.** Collision detection between geometric models: a survey / C. L. Ming, S. Gottschalk // Proc. of IMA conference on mathematics of surfaces. – 1998. – V. 1. – P. 602 – 608.

2. **Variational** sphere set approximation for solid objects / R. Wang, K. Zhou, J. Snyder, X. Liu, H. Bao, Q. Peng, B. Guo // Visual Computer. – 2006. – № 22(9). – P. 612 – 621.

3. **Trushin, A. M.** Opredelenie kollizii approksimiruiushchikh kapsul i sfer trekhmernykh virtualnykh dinamicheskikh obiektov / A. M. Trushin, M. V. Mikhaylyuk // Trudy NIISI RAN. – 2016. – V. 6, № 2. – P. 42 – 45.

4. **Kolb, A.** Hardware-based Simulation and Collision Detection for Large Particle Systems / A. Kolb, L. Latta, C. Rezk-Salama // In Proc. of the ACM SIGGRAPH/ EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware. – 2004. – P. 123 – 131.

5. **Maltsev, A. V.** Realizatsiia sistemy chastits v realnom vremeni na GPU / A. V. Maltsev // Programmnye produkty i sistemy. – 2014. – № 4. – P. 57 – 62.

6. **Maltsev, A. V.** Postroenie adaptivnoi reguliarnoi setki trekhmernoi stseny v realnom rezhime vremeni / A. V. Maltsev // Programmnye produkty i sistemy. – 2010. – № 4. – P. 41 – 45.

УДК 621.646:519.87

Соколов В. И., Кроль О. С., Степанова О. Г.
Восточноукраинский национальный университет
им. В. Даля, Украина, г. Северодонецк
(Тел. (+38050)8115265, e-mail: sokolov.snu.edu@gmail.com)

НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Sokolov V. I., Krol O. S., Stepanova O. G.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine, Severodonetsk
(Tel. (+38050)8115265, e-mail: sokolov.snu.edu@ gmail.com)

NON-LINEAR SIMULATION OF ELECTROHYDRAULIC DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Аннотация. Для исследования нестационарных рабочих процессов в электрогидравлическом следящем приводе с дроссельным регулированием разработана нелинейная математическая модель, адаптированная на приводы технологического оборудования, построенные с применением стандартных модулей. Оценка основных параметров математической модели производится с использованием паспортных данных устройств привода. Даны рекомендации по заданию исходных данных для проведения численного моделирования. Представлен пример расчета динамических характеристик электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием.

Ключевые слова: технологическое оборудование, электрогидравлический следящий привод, дроссельное регулирование, математическая модель, динамические характеристики.

Abstract. The non-linear mathematical model for investigation of the non-stationary work processes in theelectrohydraulic servo drive with throttle regulation has been developed. The model adapted for drives of the technological equipment built using standard modules.The estimation of the basic parameters of the mathematical model is carried out using the passport data of the drive devices. The recommendations are given on setting initial data for numerical simulation. The example of the calculation of the dynamic characteristics for the electrohydraulic servo drive with throttle regulation is presented.

Keywords: technological equipment, electrohydraulic servo drive, throttle regulation, mathematical model, dynamic characteristics.

Современное технологическое оборудование, в частности, оборудование для механической обработки, предъявляет всевозрастающие требования [1 – 4] к характеристикам приводов по точности реализации оптимальных законов движения выходного звена. Достижение произвольной кинематики рабочих органов в оборудовании мощностью до 8 кВт обеспечивается применением электрогидравлического следящего привода (ЭГСП) с дроссельным регулированием [2, 3].

Известные математические модели для исследования динамических характеристик ЭГСП [1, 2, 5 – 7] требуют задания параметров, которые не могут быть оценены из паспортных данных входящих устройств или выявлены на стадии предварительного про-

ектирования. Ряд моделей ориентирован на определенные конструкции устройств привода, в частности, электрогидравлических усилителей. Так как проектирование приводов чаще всего осуществляется на базе стандартных модулей [2, 3], то в этой связи возникает потребность разработки универсальной типовой математической модели ЭГСП, которая должна адекватно отражать рабочие процессы в приводе и быть построена на основе параметров, содержащихся в технических данных серийно выпускаемых устройств.

Целью работы является разработка типовой нелинейной математической модели нестационарных рабочих процессов в ЭГСП с дроссельным регулированием, позволяющей производить исследование динамических характеристик привода с использованием паспортных данных входящих устройств.

Выделим основные элементы ЭГСП: гидроцилиндр (ГЦ), электрогидравлический усилитель (ЭГУ), включающий электромеханический преобразователь (ЭМП) и гидроусилитель (ГУ), датчик обратной связи (ОС), электронный блок (ЭБ). В дальнейшем рассматриваем расчетную схему привода, представленную на рис. 1.

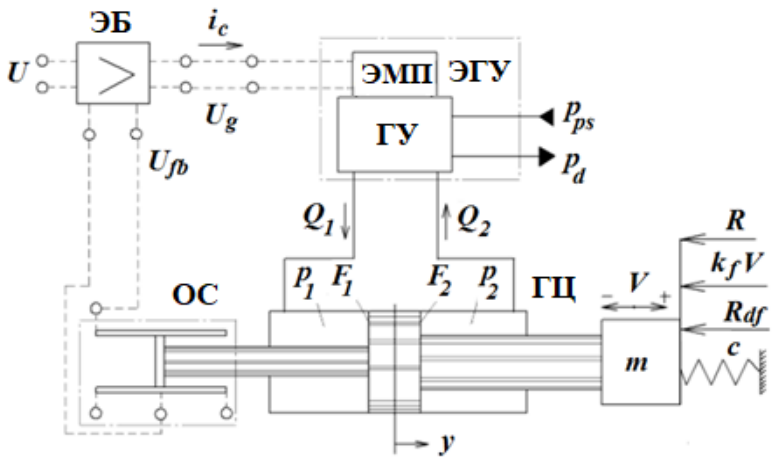


Рис. 1. Расчетная схема ЭГСП

Динамические характеристики для гидроцилиндра с двухсторонним штоком общепринято [1, 2, 5] описывать системой уравнений, включающей уравнения движения поршня и уравнений баланса расходов в полостях ГЦ с учетом сжимаемости рабочей жидкости:

$$m\frac{dV}{dt} = p_1F_1 - p_2F_2 - cy - k_fV - R - R_{df}\,\mathrm{sign}V\,; \tag{1}$$

$$\frac{dy}{dt} = V,\ \ -H/2 \le y \le H/2; \tag{2}$$

$$\frac{W_p + F_1(H/2+y)}{E_f}\frac{dp_1}{dt} = Q_1 - F_1V\,; \tag{3}$$

$$\frac{W_d + F_2(H/2-y)}{E_f}\frac{dp_2}{dt} = -Q_1 + F_1V\,. \tag{4}$$

В уравнениях (1 – 4): y, V – перемещение и скорость поршня (обычно перемещение поршня принято отсчитывать от его среднего положения); p_1, p_2 – давления в полостях

гидроцилиндра; m – приведенная масса подвижных частей; F_1, F_2 – эффективные площади; c – жесткость позиционной нагрузки; k_f – коэффициент силы вязкого трения; R_{df} – сила сухого трения; R – нагрузка; H – ход поршня;Q_1, Q_2 расходы жидкости в линиях ЭГУ; E_f – модуль упругости рабочей жидкости; W_p, W_d – «мертвые» объемы напорной и сливной магистралей.

ОС принято описывать линейным безинерционным звеном, связывающим напряжение обратной связи U_{fb} и перемещение y:

$$U_{fb} = k_{fb}y; \tag{5}$$

где k_{fb} – коэффициент передачи ОС.

ЭГУ в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как дросселирующие гидрораспределители и распределители с пропорциональным управлением [3]. В выходном каскаде усиления ЭГУ обычно используется золотниковый гидроусилитель, расчетная схема выходного каскада которого приведена на рис. 2. Предлагается связывать смещение золотника от нейтрального положения x_s с током в обмотке управления i_c линейным динамическим звеном второго порядка

$$T_{2a}^2 \frac{d^2 x_s}{dt^2} + T_{1a} \frac{dx_s}{dt} + x_s = k_{xi} i_c, \tag{6}$$

где k_{xi} – коэффициент передачи ЭГУ.

Постоянные времени T_{2a}, T_{1a} известным образом [2, 5] определяются по частотам ν_1, ν_2 сдвига по фазе соответственно на –45 и –90°:

$$T_{2a} = \frac{1}{2\pi\nu_2}; \; T_{1a} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2}. \tag{7}$$

Перемещение золотника имеет ограничения

$$|x_s| \le x_{\max}, \tag{8}$$

где $x_{\max}$ – максимальное смещение золотника от нейтрального положения.

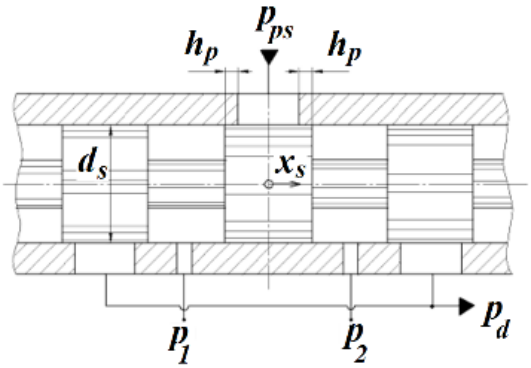


Рис. 2. Расчетная схема выходного каскада ЭГУ

Уравнения для расходов в линиях, связывающих ЭГУс ГЦ, с учетом положительного перекрытия поясками золотника окон в распределительной втулке (см. рис. 2) имеют вид:

$$Q_1 = \begin{cases} \mu_s \pi d_s k_n \left(x_s - h_p\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|p_{ps} - p_1\right|}\,\mathrm{sign}\left(p_{ps} - p_1\right), x_s > h_p; \\ 0, \left|x_s\right| \le h_p; \\ \mu_s \pi d_s k_n \left(x_s + h_p\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|p_1 - p_d\right|}\,\mathrm{sign}\left(p_1 - p_d\right), x_s < -h_p; \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_2 = \begin{cases} \mu_s \pi d_s k_n \left(x_s - h_p\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|p_2 - p_d\right|}\,\mathrm{sign}\left(p_2 - p_d\right), x_s > h_p; \\ 0, \left|x_s\right| \le h_p; \\ \mu_s \pi d_s k_n \left(x_s + h_p\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|p_{ps} - p_2\right|}\,\mathrm{sign}\left(p_{ps} - p_2\right), x_s < -h_p, \end{cases} \quad (10)$$

где p_{ps}, p_d – давление насосной станции и на сливе; h_p – величина положительного перекрытия; μ_s – коэффициент расхода [1, 8] щели золотника; d_s – диаметр золотника; k_n – коэффициент полноты использования периметра золотника; ρ – плотность рабочей жидкости.

ЭБ на стадии предварительного проектирования ЭГСП рассматривается как идеальный усилитель

$$U_g = k_g(U - U_{fb}), \quad (11)$$

где U – входное (управляющее) напряжение; U_g – напряжение на выходе ЭБ; k_g – коэффициент усиления ЭБ.

Выходной каскад ЭБ соединен с управляющей обмоткой ЭГУ и образует с ней единую электрическую цепь, содержащую как активное, так и индуктивное сопротивление. Поэтому без учета противо-ЭДС для обмотки управления имеем следующее дифференциальное уравнение

$$L_c \frac{di_c}{dt} + R_e i_c = U_{fb}, \quad (12)$$

где L_c – индуктивность обмотки управления; R_e – активное сопротивление электрической цепи.

Также ЭБ ограничивает ток в электрической цепи максимальным значением $i_{\max}$ для управляющей обмотки ЭГУ:

$$|i_s| \le i_{\max}. \quad (13)$$

Таким образом, типовую нелинейную математическую модель нестационарных рабочих процессов в ЭГСП с дроссельным регулированием можно представить системой уравнений (1 – 13).

Для численного моделирования динамических характеристик можно дать следующие рекомендации по заданию исходных параметров. Поскольку на стадии предварительного проектирования были выбраны серийно выпускаемые узлы привода, то на

данном этапе известны либо оценены такие параметры, как ход поршня H; приведенная масса подвижных частей m; давления насосной станции p_{ps} и на сливе p_d; модуль упругости рабочей жидкости E_f; «мертвые» объемы напорной W_p и сливной W_d магистралей; жесткость позиционной нагрузки c; коэффициент усиления ЭБ k_g. По техническим данным гидроцилиндра оцениваются эффективные площади F_1, F_2; коэффициент силы вязкого трения k_f; сила сухого трения R_{df}. Коэффициент передачи ЭБ k_{fb} оценивается по техническим данным датчика ОС. С использованием паспортных данных ЭГУ устанавливаются постоянные времени T_{1a}, T_{2a}; индуктивность обмотки управления L_c; активное сопротивление электрической цепи R_e (сопротивление обмотки управления ЭГУ с учетом сопротивления выходного каскада ЭБ); максимальный ток $i_{\max}$ (либо номинальный ток $i_{\text{ном}}$); максимальный расход $Q_{\max}$ (либо номинальный расход $Q_{\text{ном}}$). Максимальное перемещение $x_{\max}$ золотника можно оценить из выражений (9), (10), а значение коэффициента передачи k_{xi} по уравнению (6) в статике как $k_{xi} = x_{\max}/i_{\max}$.Отметим, что величину безразмерного перекрытия $h_p/x_{\max}$ допустимо взять равной относительному току зоны нечувствительности (в серийно выпускаемых ЭГУ не более 0,02).

В сравнении с известными нелинейными моделями ЭГСП [1, 2, 7], учитывающими основные факторы, обуславливающие нестационарные процессы, представленная модель требует меньшего числа исходных параметров и является универсальной для приводов, построенных по типовой схеме, приведенной на рис. 1.

Учет основных нелинейностей дает заметный выигрыш в точности расчета по сравнению с линейными моделями. Это показывают результаты численного моделирования переходных процессов при различных уровнях входного сигнала, представленные в безразмерном виде на рис. 3. Как видно, от величины безразмерного скачка $\overline{U}$ управляющего напряжения зависит не только длительность процесса, но и его характер и качество.

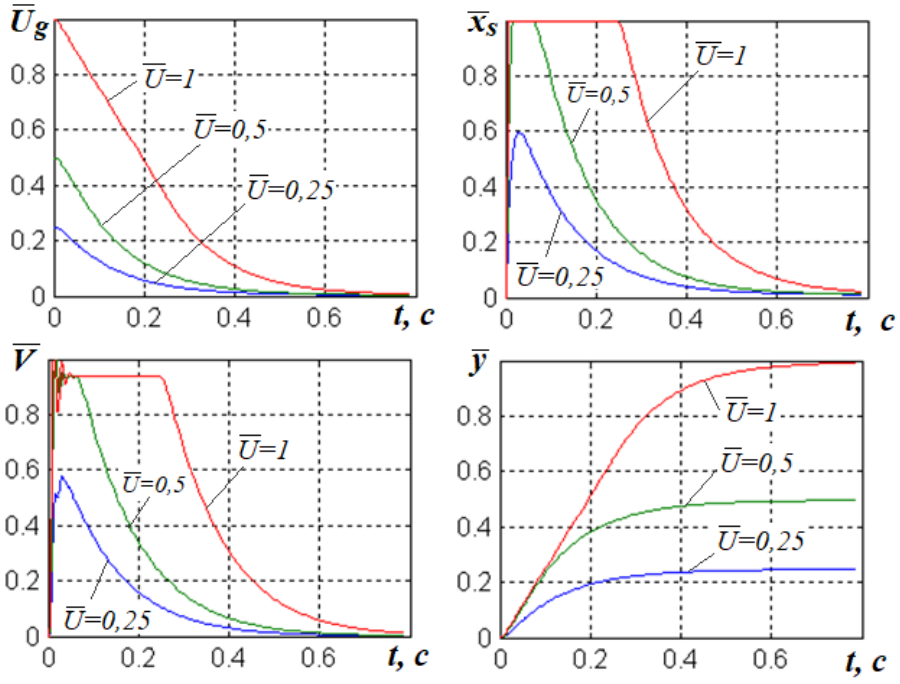


Рис. 3. Результаты численного моделирования динамических характеристик ЭГСП

Приведенные расчеты выполнены для следующих основных исходных данных: $F_1 = F_2 = 0{,}00915$ м^2 (что соответствует диаметру поршня 125 мм и диаметрам штоков 63 мм); $H = 0{,}5$ м; $p_{ps} = 32 \cdot 10^6$ Па; $p_d = 0{,}2 \cdot 10^6$ Па; $E_f = 10^9$ Па; $W_p = W_d = 0{,}002$ м^3; $R = -5 \cdot 10^3$ Н (тянущее усилие); $R_{df} = 0$; $c = 0$; $k_f = 5 \cdot 10^4$ кг/с; $m = 500$ кг; $k_{fb} = 54$ В/м; $Q_{\max} = 0{,}00638$ м^3/с; $p_{\max} = 32 \cdot 10^6$ Па; $T_{1a} = 0{,}00117$ с; $T_{2a} = 0{,}00127$ с (что соответствует сдвигу по фазе на –45 и –90° при частотах $\nu_1 = 80$ Гц и $\nu_2 = 125$ Гц); $h_p/h_{\max} = 0{,}01$; $L_c = 1{,}0$ Гн; $R_e = 100$ Ом; $i_{\max} = 0{,}3$ А; $k_g = 6$.

В целом результаты расчетов на основе полученной математической модели хорошо согласуются с результатами расчетов на более полных нелинейных моделях и экспериментальными данными других авторов [1, 2], что позволяет судить об адекватности представленного математического описания ЭГСП.

Таким образом, предложена типовая нелинейная математическая модель нестационарных рабочих процессов в ЭГСП с дроссельным регулированием. Математическая модель адаптирована на приводы технологического оборудования для механической обработки, которые построены на основе стандартных модулей, и позволяет исследование динамических характеристик привода с использованием паспортных данных входящих устройств.

Список использованных источников

1. **Попов, Д. Н.** Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1987. – 464 с.

2. **Навроцкий, К. Л.** Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов / К. Л. Навроцкий. – М. : Машиностроение, 1991. – 384 с.

3. **Свешников, В. К.** Станочные гидроприводы : справочник / В. К. Свешников, А. А. Усов. – М. : Машиностроение, 1988. – 512 с.

4. **Krol, O.** Development of models and research into tooling for machining centers / O. Krol, V. Sokolov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – V. 3. – Is. 1(93). – P. 12 – 22.

5. **Sokolov, V.** Determination of transfer functions for electrohydraulic servo drive of technological equipment / V. Sokolov, O. Krol // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. – 2019. – P. 364 – 373.

6. **Sokolov, V.** Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive / V. Sokolov, Y. Rasskazova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 2. – Is. 2(80). – P. 44 – 50.

7. **Sokolov, V.** Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive / V. Sokolov, O. Krol // Procedia Engineering. – 2017. – V. 206. – P. 936 – 943.

8. **Соколов, В. І.** Гідравліка / В. І. Соколов, О. С. Кроль, О. В. Єпіфанова. – Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.

References

1. **Popov, D. N.** Dinamika i regulirovaniegidro- i pnevmosistem / D. N. Popov. – M. : Mashinostroenie, 1987. – 464 s.

2. **Navrotskiy, K. L.** Teoriya i proektirovaniegidro- i pnevmoprivodov / K. L. Navrotskiy. – M. : Mashinostroenie, 1991. – 384 s.

3. **Sveshnikov, V. K.** Stanochnyie gidroprivodyi : Spravochnik / V. K. Sveshnikov, A. A. Usov. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 512 s.

4. **Krol, O.** Development of models and research into tooling for machining centers / O. Krol, V. Sokolov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – V. 3. – Is. 1(93). – P. 12 – 22.

5. **Sokolov, V.** Determination of transfer functions for electrohydraulic servo drive of technological equipment / V. Sokolov, O. Krol // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. – 2019. – P. 364 – 373.

6. **Sokolov, V.** Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive / V. Sokolov, Y. Rasskazova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 2. – Is. 2(80). – P. 44 – 50.

7. **Sokolov, V.** Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive / V. Sokolov, O. Krol // Procedia Engineering. – 2017. – V. 206. – P. 936 – 943.

8. **Sokolov, V. I.** Gidravlika / V. I. Sokolov, O. S. Krol, O. V. Yepifanova. – Syevyerodoneczk : SNU im. V. Dalya. – 2017. – 160 s.

УДК 62-762.4; 303.094.7

Кушнир А. П.,[1] Асадова Ю. С.[2]
[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, г. Москва
(Тел. +79169521579, e-mail: gurinmura@yandex.ru),
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, г. Москва
(Тел. +79154506733, e-mail: kunaka@bk.ru),

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЙ НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Kushnir A. P.,[1] Asadova Yu. S.[2]
[1]MIREA – Russian University of Technology, Russia, Moscow
(Tel. +79169521579, e-mail: gurinmura@yandex.ru),
[2]MIREA – Russian University of Technology, Russia, Moscow
(Tel. +79154506733, e-mail: kunaka@bk.ru),

SIMULATION OF SEALS FIXED JOINTS

Аннотация. Статья посвящена исследованию работы уплотнений неподвижных соединений, в частности, герметизации плоских стыков аппаратов химического и энергетического машиностроения. Рассмотрены механизмы возникновения утечки при разных значениях шероховатости и давлений на поверхностях стыка с учетом реальной площади контакта. Проведено моделирование процесса возникновения утечки в зависимости от указанных условий. Показано, что полная герметичность жестких стыков недостаточна даже при низкой шероховатости, обеспечиваемой финишной обработкой (тонким шлифованием), и отсутствии отклонений формы поверхностей стыка.

Ключевые слова: моделирование, герметичность, неподвижное соединение, утечка, шероховатость, давление.

Abstract. The article deals with the research into sealing of flat joints of devices of chemical and power mechanical engineering. The mechanisms of leakage at different values of roughness and pressure at the joint surfaces are considered taking into account the real contact area. The simulation of the leakage life process was performed depending on the conditions. It is shown that the complete tightness of rigid joints, ensured by finishing (fine grinding) and the absence of abnormalities in the shape of the joint surfaces is not sufficient.

Keywords: modeling, tightness, fixed connection, leakage, roughness, pressure.

Проблема герметизации подвижных и неподвижных соединений деталей машин является крайне актуальной для всех отраслей техники, в которых присутствуют жидкие или газообразные фракции. Это и гидравлические машины, подводные и надводные корабли, химические и космические аппараты. Несмотря на общие задачи, только в недавнее время начала формироваться наука, изучающая механизмы возникновения и предотвращения утечек – герметология. Например, почти до конца XX века ученые и практики не могли объяснить механизм попадания загрязнений внутрь шпиндельного узла станка при отсутствии перепада давления на уплотнении.

Вопросы герметизации неподвижных соединений также изучена недостаточно. В качестве теоретической базы для описания рабочего процесса обычно принимают работы Дарси, Жуковского и других исследователей. Однако в большей степени рассматриваемые проблемы относятся к теории фильтрации грунтовых вод, движению газа и нефти в пористой среде и т.п.

Для описания течения жидкой среды в неподвижном стыке воспользуемся теорией Козени–Кармана, в которой пористая среда представляется в виде набора капиллярных трубок равной длины и произвольного сечения. Такой метод позволяет провести аналитический анализ реальной герметичности устройства путем использования апробированных соотношений из механики жидкости.

Так как скорости течения жидкости при фильтрации обычно невелики, следует предположить, что режим течения в стыке будет ламинарным. В этом случае для получения модели можно воспользоваться системой уравнений Навье–Стокса для вязких сред, зависимостями Бернулли или Дарси. Нетрудно показать, что для принятого набора капиллярных трубок и условий работы (пьезометрические высоты пренебрежимо малы по сравнению с пьезометрическим напором на уплотнении, местные потери на несколько порядков меньше потерь по длине) полученное решение не будет зависеть от первоначального выбора системы уравнений. Для принятых условий выражение для утечки (в системе СИ) можно представить (без учета эффектов облитерации, поверхностного натяжения и упругопластичных свойств жидкости) в следующем виде:

$$Q = \sum \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \rho \nu l} = \frac{\pi \Delta p}{128 \rho \nu l} \sum d^4 , \qquad (1)$$

где Q – величина утечки через уплотнение; d – гидравлический диаметр щелевого зазора; Δp – перепад давления на уплотнении; ρ – плотность жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости; l – длина капиллярных трубок.

Гидравлический диаметр щелевого зазора в зависимости от геометрии щели рассчитывается как

$$d = \frac{4F}{\chi} , \qquad (2)$$

где F – площадь капиллярной трубки; χ – смоченный периметр.

Достоинством уравнений (1), (2) является применимость для сечений произвольной формы (круглой, прямоугольной, овальной, треугольной и т.д.).

В рассматриваемом случае сечения образуются как совокупность микронеровностей на стыкуемых поверхностях и могут быть описаны эквивалентным параметром шероховатости Rz [1, 2].

Под действием приложенной внешней нагрузки (номинальное давление в стыке) будет происходить деформация и сближение поверхностей стыка. Оценить смещение поверхностей контакта можно по зависимостям, полученным в работе [3]. Для оценочных расчетов можно воспользоваться инженерным соотношением

$$\delta = Rz\sqrt{\frac{8p_H}{\sigma_T}}, \tag{3}$$

где $p_H = F/S_H$ – номинальное давление в стыке; σ_T – предел текучести материала стыка.

В предположении, что микронеровности имеют треугольную форму, из уравнений (1) – (3) с учетом дополнительных отклонений зазора вследствие технологических погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка h следует

$$Q = \frac{\pi\Delta p}{648\rho\nu kL}\sum(Rz + h - \delta)^4, \tag{4}$$

где k – коэффициент извилистости; L – длина щели уплотнения.

Полученное уравнение показывает, что величина утечки пропорциональна приложенному к уплотнению перепаду давления, обратно пропорциональна вязкости жидкости, а также длине и извилистости щели уплотнения. При этом герметичность уплотнения существенно зависит от шероховатости и погрешности поверхностей, а также от их смещения под действием усилия сжатия (номинального давления в стыке).

Расчет по выражениям (3) – (4) осложняется случайным характером изменения величины зазора в уплотнении (шероховатости поверхностей), поэтому для получения частных решений в системе Matlab–Simulink была разработана имитационная модель уплотнения, рис. 1.

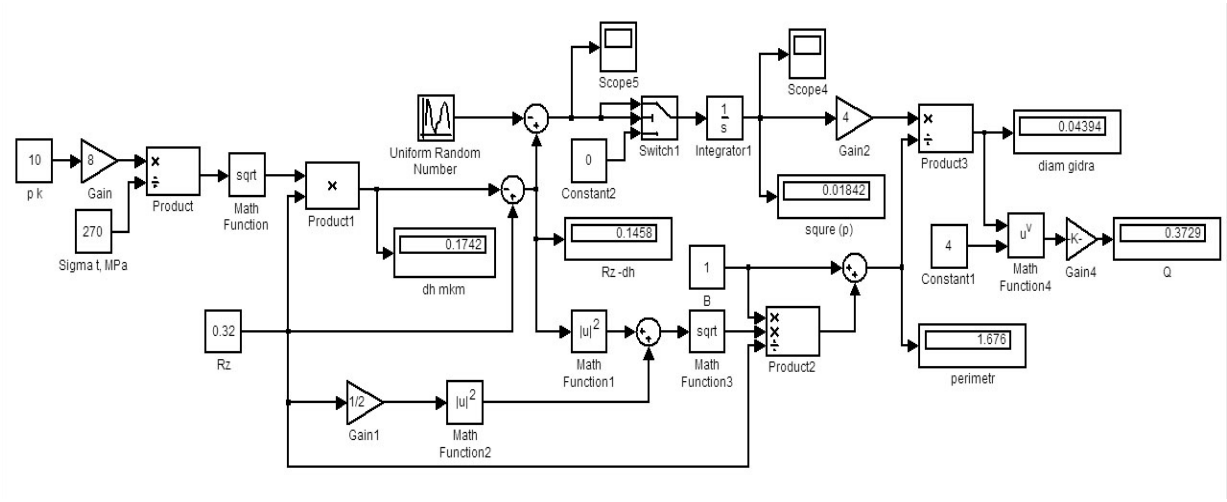


Рис. 1. Модель герметичности неподвижного соединения

Особенностью модели является использование генератора случайных чисел, имитирующего вариацию значений параметра шероховатости поверхности. Результаты моделирования (без учета погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка) представлены на рис. 2, 3.

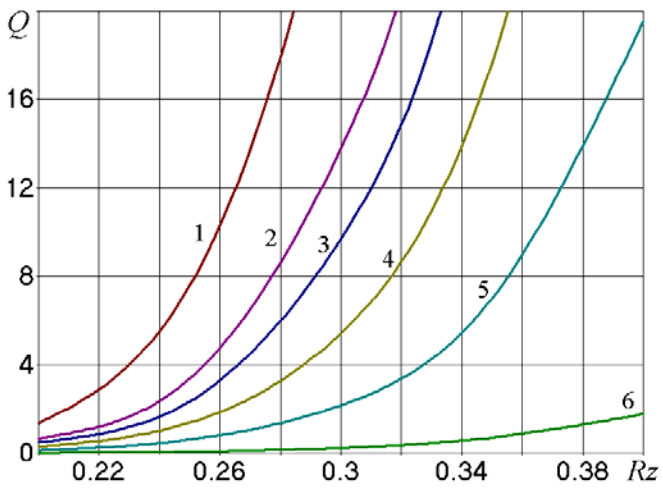


Рис. 2. Утечка через уплотнение в зависимости от шероховатости поверхностей

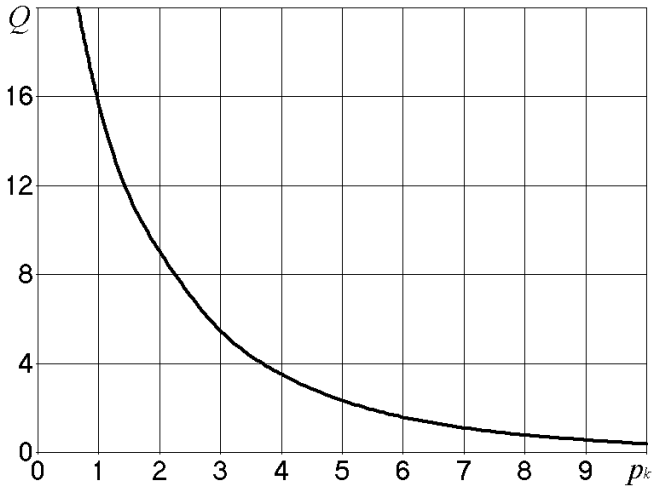


Рис. 3. Утечка через уплотнение в зависимости от контактного давления в стыке

Зависимости на рис. 2 построены при нескольких значениях контактного давления в стыке (графики на рисунке соответствуют условиям: *1* – 0 МПа; *2* – 0,5 МПа; *3* – 1 МПа; *4* – 2 МПа; *5* – 4 МПа; *6* – 10 МПа).

Зависимость на рис. 3 построена для значения шероховатости Rz = 0,32 мкм.

Выводы

1. Получены теоретические зависимости, позволяющие оценить герметичность неподвижного соединения в зависимости от основных параметров уплотнения – шероховатости и погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка, их физико-механических свойств, характеристик герметизируемой жидкости, в том числе перепада давления, а также номинального давления в стыке.

2. На герметичность уплотнения существенное значение влияют шероховатости и погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка, а также величина смещения, создаваемая за счет номинального давления в стыке.

Список использованных источников

1. **Албагачиев, А. Ю.** Сборка прецизионных уплотнительных устройств с учетом податливости стыков. Сборка в машиностроении, приборостроении / А. Ю. Албагачиев, А. П. Кушнир. – 2011. № 1. С. 8 – 12.

2. **Албагачиев, А. Ю.** Контактная жесткость прецизионных уплотнительных устройств с учетом качества поверхностного слоя / А. Ю. Албагачиев, А. П. Кушнир // Вестник МГУПИ. Вып. 34. – М. : МГУПИ, 2011. С. 3 – 9.

3. **Албагачиев, А. Ю.** Теоретическая оценка податливости контакта реальных поверхностей. Тяжелое машиностроение / А. Ю. Албагачиев, А. П. Кушнир. – 2010. – № 12. – С. 32–33.

4. **Албагачиев, А. Ю.** Вероятностная оценка точности изготовления. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» : сб. научных трудов IV Международной научной конференции 24 – 26 ноября 2015 г., ИМАШ РАН / А. Ю. Албагачиев, А. П. Кушнир. – М. : Издательский дом «Спектр», 2015. – С. 27 – 29.

References

1. **Albagachiev, A. Yu.** Sborka precizionnyh uplotnitel'nyh ustrojstv s uchetom podatlivosti stykov. Sborka v mashinostroenii, priborostroenii / A. Yu. Albagachiev, A. P. Kushnir. – 2011. – № 1. – P. 8 – 12.

2. **Albagachiev, A. Yu.** Kontaktnaya zhestkost' precizionnyh uplotnitel'nyh ustrojstv s uchetom kachestva poverhnostnogo sloya / A. Yu. Albagachiev, A. P. Kushnir // Vestnik MGUPI. – Vol. 34. – M. : MGUPI, 2011. P. 3 – 9.

3. **Albagachiev, A. Yu.** Teoreticheskaya ocenka podatlivosti kontakta real'nyh poverhnostej. Tyazheloe mashinostroenie / A. Yu. Albagachiev, A. P. Kushnir. – 2010. – № 12. – P. 32–33.

4. **Albagachiev, A. Yu.** Veroyatnostnaya ocenka tochnosti izgotovleniya. «Fundamental'nye issledovaniya i innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii» : sb. nauchnyh trudov IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii 24 – 26 noyabrya 2015, IMASH RAN / A. Yu. Albagachiev, A. P. Kushnir. M. : Izdatel'skij dom «Spektr», 2015. – P. 27 – 29.

УДК 621.396.6.001.66

Глотова Т. С., Ромащенко М. А., Федоров С. М., Глотов В. В.
Воронежский государственный технический университет, Россия, г. Воронеж
(Тел. 8(980)541-66-43, e-mail: vadik-livny@mail.ru)

ОСНОВНЫЕ УРОВНИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Glotova T. S., Romashchenko M. A., Fedorov S. M., Glotov V. V.
Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh
(Tel. 8(980)541-66-43, e-mail: vadik-livny@mail.ru)

BASIC LEVELS OF MAINTAINING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Аннотация. Рассмотрены роли и значения характеристик электромагнитной совместимости при решении задач обеспечения электромагнитной совместимости. Дан краткий обзор уровней электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, внутриаапаратурная, межсистемная.

Abstract. The articleconsiders the roles and values of the characteristics of electromagnetic compatibility when solving problems of ensuring electromagnetic compatibility. A brief overview of the levels of electromagnetic compatibility is given.

Keywords: electromagnetic compatibility, intra-interconnection, intersystem.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в различных электронных средствах (ЭС) относится к одной из наиболее актуальных на сегодняшних дней тем, по причинам возрастания общего числа ЭС и их миниатюризации.

Подход к определению роли и значения какой-либо характеристики ЭМС при решении задачи обеспечения ЭМС зависит от уровня, на котором решается задача. Так, в источнике [1] предлагается рассматривать четыре уровня: межсистемной ЭМС, внутрисистемной ЭМС, внутриаппаратурной ЭМС и внутрикомпонентной ЭМС.

1. Межсистемная ЭМС. На этом уровне происходит обеспечение ЭМС между отдельными автономными системами, источник помех которой находится в системе, не относящийся к рассматриваемой, включающий рецептор (например, помехи, которые могут быть созданы системой космической радиосвязи системе наземной радиорелейной связи), поскольку обе системы работают в одном и том же диапазоне на одинаковых частотах. Комплекс организационных и технических мероприятий, выполняемых на этом уровне, заключается в рациональном выборе (распределении) частот радиоканалов для различных радиослужб и установлении частотно-пространственного разнесения между ЭС с конкретными характеристиками ЭМС, определении места размещения средств и т.д. При этом выполняются соответствующие расчеты с учетом функциональных характеристик и характеристик ЭМС применяемых ЭС, а также электромагнитного обеспечения [2, 3].

2. Внутрисистемная ЭМС. На данном уровне происходит обеспечение ЭМС внутри сложного радиоэлектронного комплекса, источник помех которой находится внутри

рассматриваемой системы, но вне рецептора (например бортовой навигационный приемник – рецептор, в системе электрорадиооборудования самолета, которому могут создавать помехи другие элементы этой же системы). Основные задачи, решаемые на внутрисистемном уровне ЭМС:

– анализ источников мощных электромагнитных излучений, в целях выявления интенсивностей генерируемых ими полей;

– моделирование процессов и аппаратуры, более адекватно отражающих высокочастотные процессы и пригодных для верификации проектных решений;

– оценка факторов на основе аппаратных моделей, таких как: целостность сигнала, эффективность экранирования с учетом реальных неоднородностей в экранах, оценка уровня излучения от аппаратуры на стадии проектирования, развитие виртуальных сертификационных испытаний для отладки проектов [2, 3].

3. Внутриаппаратурная ЭМС. На этом уровне обеспечение ЭМС происходит внутри отдельного прибора, блока, модуля, компоненты которого взаимодействуют друг с другом. На основе анализа электромагнитных процессов и синтеза оптимальных технических решений на внутриаппаратном уровне применяются следующие методы: организационно-технические, схемотехнические, топологические, конструкторско-технологические и программные.

На организационно-техническом этапе проводят следующие мероприятия:

– решение задач целенаправленного планирования работ;

– разработки норм, координация и контроль, сбор и обобщение опыта работ по обеспечению требований ЭМС;

– рассматриваются вопросы назначения ответственных лиц и формулировки их должностных обязанностей.

На схемотехническом этапе выполняются следующие задачи: компенсирование помех, ограничение наводок по спектру, ограничение наводок по амплитуде, применение неэлектрической развязки и электрическое симметрирование.

К топологическому этапу относится выбор элементной базы, сортировка электрорадиоэлементов по рабочим частотам, группировка быстродействующих компонентов, минимизация излучающих петель, резервирование места под экраны и фильтры, размещение внешних соединений, развязка цепей питания, разделение аналоговых и цифровых цепей, применение многослойных печатных плат, процесс технологии поверхностного монтажа, корректное заземление, применение дифференциальных пар.

Конструкторско-технологические методы в свою очередь делятся на конструктивные и технологические. К конструктивным относится следующие методы:

– экранирование печатных плат, проводников и блоков;

– заземление и зануление;

– трассировка проводников;

– проектирование корпуса, соединителей, фильтров;

– компоновка внутренних блоков.

На технологическом этапе решаются следующие задачи:

– технология создания электрических контактов;

– технология применения уплотнительных элементов;

– технология изготовления экранов;

– технология монтажа, крепления, сборки;
– применяемые материалы и покрытия [1, 4].

4. Внутрикомпонентная ЭМС. На данном уровне решаются вопросы ЭМС во внутренней компоновки микроэлектронных устройств (МЭУ), то есть для устройств типа «система в корпусе» и «система на кристалле». В процессе уменьшения технологических норм и размеров элементов увеличивается число цепей, интегрируемых в едином конструктиве МЭУ, образуя так называемые «системы в корпусе» (SiP) и 3D-сборки, в результате чего внутри такой структуры формируется сложная и насыщенная электромагнитная обстановка. Проблематикой этого уровня является распределение питания конструкций МЭУ. Слои питания/заземления используются для обеспечения постоянным напряжением питания цепей МЭУ. Сигнальные проводники часто прокладываются с разных сторон относительно слоев питания/заземления, а их возвратный ток протекает в соответствующем слое питания/заземления точно под сигнальным проводником. При прохождении проводника сквозь различные слои возвратный ток также переходит с одного слоя на другой и, как следствие, между различными слоями индуцируется вертикальный ток смещения, поддерживающий непрерывность возвратного тока. Этот ток смещения будет возбуждать помеховое электромагнитное поле, распространяющееся внутри слоев питания/заземления и оказывающее влияние на другие сигнальные проводники, проходящие сквозь этот слой, а через зазоры в слоях питания/заземления и периметр конструкции МЭУ проникать и в окружающее пространство. Такие наводки могут быть дополнительно усилены при попадании спектра помехи в собственную резонансную частоту какого-либо конструктива, например объемного резонатора, создаваемого системой слоев питания/заземления [5].

Таким образом, на каждом уровне ЭМС необходимы свои методы и подходы к решению подобных задач, как правило, принципиально отличающиеся друг от друга [5 – 7].

Так, на внутриаппаратурном уровне ЭМС конструкций радиоэлектронных средств требуется комплексная формализация и системная методология решения задач, что побуждает к активным прикладным и научным исследованиям.

Список использованных источников

1. **Макаров, О. Ю.** Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств : монография / О. Ю. Макаров, А. В. Муратов, М. А. Ромащенко. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2013. – 234 с.

2. **Ромащенко, М. А.** Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения / М. А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 106 – 109.

3. **Лаборатория** ЭМС [Персональная страница М. А. Ромащенко] / Лаборатория ЭМС. – Воронеж. гос. техн. ун-т. – URL : http://www.emc-problem.net

4. **Кечиев, Л. Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.

5. **Ромащенко, М. А.** Моделирование ближнего электромагнитного поля конструкций электронных систем с использованием численных методов / М. А. Ромащенко,

П. П. Чураков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 109 – 112.

6. **Ромащенко, М. А.** Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости : автореф. дис. … д-ра техн. наук / М. А. Ромащенко. – Воронеж, 2014. – 36 с.

7. **Судариков, А. В.** Анализ электромагнитных воздействий радиоэлектронных средств с помощью систем автоматизированного проектирования категории CAD/CAE / А. В. Судариков, М. А. Ромащенко, А. В. Муратов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 8. – С. 135 – 137.

References

1. **Makarov, O. U.** Provide methods vnutriapparaturnoy EMC and immunity in the construction of electronic means : Monograph / O. U. Makarov, A. B. Muratov, M. A. Romashenko. – Voronezh : VPO «VGTU», 2013. – 234.

2. **Romashchenko, M. A.** Basic EMC software analysis tasks in designs REM and the principles of its implementation. Bulletin of Voronezh State Technical University / M. A. Romashchenko. – 2011. – Vol. 7, № 4. – S. 106 – 109.

3. **Laboratoriy** EMC [Personalnaya stranitsa M. A. Romashenko] / Voroneg. gos. texn. yn-t. – URL : http://www.emc-problem.net

4. **Kechiev, L. N.** Proektirovanie pechatnix plat dly cifrovix bistrodeistvyuchei apparaturi. – M. : OOO «Gruppa ITD», 2007. – 616 c.

5. **Romashchenko, M. A.** Simulation of the near electromagnetic field of electronic systems constructions using numerical methods / M. A. Romashchenko, P. P. Churakov // Vestnik Voronezh State Technical University. – 2012. – V. 8, № 3. – P. 109 – 112.

6. **Romashchenko, M. A.** Methods of optimal design of radio electronic devices with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity : abstract of the thesis. ... doct. tech. sciences. – Voronezh, 2014. – 36 p.

7. **Sudarikov, A. V.** Analysis of electromagnetic effects of radio electronic means using CAD / CAE CAD systems / A. V. Sudarikov, M. A. Romashchenko, A. V. Muratov // Vestnik Voronezh State Technical University. – 2010. – V. 6, № 8. – P. 135 – 137.

УДК 621.941

Дежа А. А.,[1] Соколов М. В.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (8900) 4961773, e-mail dezha.anton@yandex.ru),
[2](Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Dezha A. A.,[1] Sokolov M. V.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (8900) 4961773, e-mail dezha.anton@yandex.ru),
[2](Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

A METHOD OF IMPROVING THE QUALITY OF MACHINING OF PARTS FROM ALUMINUM ALLOYS ON CNC LATHES

Аннотация. Проведено исследование способов обработки алюминия на токарном станке с ЧПУ, были подобраны благоприятные режимы резания и инструмент, проведен анализ СОЖ.

Ключевые слова: обработка алюминия на токарных станках с ЧПУ.

Abstract. The research into methods of machining of aluminum on a CNC lathe has been carried out; favorable cutting conditions and tools have been selected; a coolant analysis has been performed.

Keywords: machining of aluminum on CNC lathes.

Токарная обработка – наиболее распространенный метод изготовления деталей типа тел вращений (валов, дисков, осей, пальцев, фланцев, втулок, гаек, муфт и др.) на токарных станках. На них можно производить обтачивание и растачивание цилиндрических, конических, шаровых поверхностей этих деталей, подрезание торцов, вытачивание канавок, нарезание наружних и внутренних резьб, накатывание рифлений, сверление, развертывание отверстий, зенкерование и другие виды токарных работ.

Алюминий – мягкий и пластичный металл, который, в общем случае, хорошо поддается механической обработке на токарных станках с ЧПУ (токарная обработка, сверление и фрезерование). Режимы резания при этом могут быть гораздо больше, чем при обработке, например конструкционных сталей. С одной стороны, это обусловлено меньшими нагрузками при снятии стружки, с другой – высоким коэффициентом теплопроводности алюминия, благодаря которому тепло из зоны резания хорошо отводится вместе со стружкой, не вызывая перегрева инструмента.

Иногда при обработке алюминия можно столкнуться и с негативными эффектами.

Первый – высокая вязкость некоторых сплавов. В этом случае существует тенденция к формированию длинной стружки, которая наматывается на инструмент, что приводит к поломке режущего инструмента.

Второй негативный эффект – наростообразование. Это явление, при котором происходит точечная наплавка обрабатываемого материала на режущую кромку инстру-

мента в зоне резания. Следствием этого является притупление режущего клина и увеличение нагрузки на инструмент, а также затрудненный сход стружки из-за ухудшения шероховатости передней поверхности инструмента. При наплавке материала происходит затупление режущей кромки, перегрев инструмента, что может привести к заклиниванию и, как следствие, к поломке дорогостоящего инструмента.

На степень и глубину наплавки материала влияют режимы резания, геометрия режущего инструмента, степень его затупления, т.е. все факторы, определяющие протекание пластической деформации в зоне резания. Увеличение скорости резания способствует уменьшению глубины и степени наплавки, а подачи и глубины резания – к их увеличению!

Для механической обработки на токарных станках с ЧПУ чаще всего используют марки дюрали Д16 либо Д16Т (Д16ТН). Д16Т лучше всего подходит для механической обработки на токарных станках. Благодаря термообработке данный материал имеет более хрупкую структуру, что положительно влияет на режимы его резания. Сплав Д16 также удобен для механической обработки. Основным отличием данного сплава относительно термообработанного Д16Т является чуть более высокий параметр вязкости. При некорректных режимах резания либо при неправильно подобранном инструменте может происходить наматывание стружки на инструмент. Самым сложным для токарной обработки является чистый алюминий и его сплав с магнием (АМГ). Данные сплавы имеют удовлетворительную прочность, хорошую пластичность и высокую коррозийную стойкость. С ростом содержания магния существенно увеличивается прочность АМГ. Из всех сплавов алюминия данный сплав является самым вязким. При обработке АМГ либо на токарных станках с ЧПУ оператор может сталкиваться с проблемой забивания канавок инструмента стружкой. Для обработки АМГ необходимо более тщательно подбирать режимы резания: подачи и скорость вращения. Обязательно использование непрерывной подачи СОЖ в зону резания и специального инструмента. Соблюдая эти правила, можно обрабатывать АМГ без опасности для инструмента и получать необходимую шероховатость поверхности [1].

Остальные сплавы алюминия не так распространены при механической обработке на токарных станках с ЧПУ.

Способы повышения качества обработки деталей из алюминиевых сплавов:

1. Применение смазочно-охлаждающих средств.

Увеличение срока службы инструмента в результате снижения мощности источника тепла при охлаждении, а также уменьшение адгезии и диффузии; уменьшение работы резания за счет снижения работы трения и деформации в результате смазывания; вымывание с рабочих поверхностей инструмента продуктов износа инструмента, мелкой стружки и других отходов.

2. Оптимизация режимов резания.

Удовлетворение заданных критериев производительности, себестоимости и качества за счет оптимизации режимов резания, увеличение износостойкости инструмента, снижение напряжений и температур на обрабатываемой поверхности.

3. Применение высокоскоростной обработки.

Увеличение производительности обработки; достижение высокого качества обработанной поверхности.

4. Совершенствование геометрии режущего инструмента.

Возникновение в режущей пластине благоприятных сжимающих напряжений, необходимых для увеличения хрупкой прочности режущей пластины; улучшение шероховатости обработанной поверхности; при определенных геометрических параметрах инструмента происходит уменьшение работы резания за счет снижения работы трения и деформации.

5. Увеличение износостойкости и прочности инструментального материала.

Повышение твердости, прочности (износостойкости) и теплостойкости режущего интрумента, позволяющие увеличить режимы обработки и изменить геометрию инструмента на более благоприятную с точки зрения работы трения и деформации при резании.

6. Нанесение на режущий инструмент износостойких покрытий.

Возможность повышения скорости резания; для инструментов из инструментальных сталей и твердых сплавов повышение твердости контактных площадок инструмента и снижение их адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом; для инструментов из керамики и сверхтвердых материалов «залечивание» поверхностных дефектов и торможение развития трещин, идущих из глубины пластины в направлении поверхности [2].

В условиях развития технологического уклада шестого уровня сокращение сроков проектирования и подбор оптимальных параметров процесса резания – это важнейшие требования, предъявляемые к разработке технологического процесса. Разработка и внедрение современных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет решить эти проблемы в большинстве случаев когда технолог самостоятельно применяет решение о выборе тех или иных режимов резания, руководствуясь собственным опытом [3 – 5].

Исследования проводятся в соответствии со следующими направлениями научной деятельности, которые развиваются на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»: прогрессивные технологии и оборудование машиностроительного производства; выбор, создание новых и адаптация интеллектуальных обучающих систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки и сборки [6, 7].

Список использованных источников

1. **TGM.** Technograv machines. – URL : http://technograv.ru/articles/13-alyuminij-i-ego-splavy-primenenie-kharakteristiki-osobennosti-obrabotki/42-osobennosti-obrabotki-alyuminiya-i-ego-splavov/

2. **Главный инженер.** – URL : http://chiefengineer.ru/tehnologii-metaloobrabotki/tehnologii-obrabotki-metalla/povyshenie-effektivnosti-mehanoobrabotki/

3. **Алтунин, К. А.** Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки / К. А Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.

4. **Алтунин, К. А.** Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 122 – 133.

5. **Altunin, K. A.** Development of information support for intelligent CAD cutting processes / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Advanced Materials & Technologies. – 2017. – № 2. – P. 67 – 77.

6. **Пестрецов, С. И.** Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С. И. Пестрецов, К. А. Алтунин, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 221 с.

7. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения : монография / К. А. Алтунин. М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.

References

1. **TGM.** Technolograv machines. – URL : http://technograv.ru/articles/13-alyuminij-i-ego-splavy-primenenie-kharakteristiki-osobennosti-obrabotki/42-osobennosti-obrabotki-alyuminiya-i-ego-splavov/

2. **Glavnyj inzhener.** – URL : http://chiefengineer.ru/tehnologii-metaloobrabotki/tehnologii-obrabotki-metalla/povyshenie-effektivnosti-mehanoobrabotki/

3. **Altunin, K. A.** Razrabotka sistemy podderzhki prinyatiya reshenij vybora rezhimnyh I konstruktivnyh-parametrov tokarnoj obrabotki / K. A. Altunin, M. V. Sokolov. – Tambov : Studiya pechati Pavla Zolotova. – 2016. –132 s.

4. **Altunin, K. A.** Primenenie nejronnyh setej dlya modelirovaniya processa tokarnoj obrabotki / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Vestnik tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo-universiteta – 2016. – V. 22, № 1. – S. 122 – 133.

5. **Altunin, K. A.** Development of information support for intelligent CAD cutting processes / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Advanced Materials & Technologies. – 2017. – № 2. – P. 67 – 77.

6. **Pestrecov S. I.** Koncepciya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proektiro vaniya processov rezaniya v tekhnologii mashinostroeniya / S. I. Pestrecov, K. A. Altunin, M. V. Sokolov, V. G Odnolko. – M. : Izdatelskij dom Spektr. – 2012. – 221 p.

7. **Altunin, K. A.** Koncepciya sozdaniya informacionnogo obespecheniya intellektu alnoj-sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya processov rezaniya v tekhnologii-mashinostroeniya / K. A. Altunin. M. V. Sokolov. – Monografiya : Tambov. Studiya pechati Pavla Zolotova. – 2015. – 112 p.

УДК 621.941

Долотов С. В.,[1] Соколов М. В.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (89004) 929333, e-mail: dolotov068@gmail.com),
[2](Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Dolotov S. V.[1], Dolotov S. V.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (89004) 929333, e-mail: dolotov068@gmail.com),
[2](Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

A METHOD OF INCREASING THE QUALITY OF BLANKS FROM ALUMINUM ALLOYS FOR CNC LATHES

Аннотация. Приведены рекомендации по выбору деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ, были разобраны виды алюминиевых сплавов, также выявлены виды резки алюминия, обработка алюминия на токарном станке с ЧПУ.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы для токарных станков ЧПУ.

Abstract. The article gives recommendations on selecting parts manufactured on CNC machines; types of aluminum alloys are discussed; types of aluminum cutting, machining of aluminum on a CNC lathe are described.

Keywords: aluminum alloys for CNC lathes.

Основным условием эффективного использования станков с ЧПУ является рациональный подбор номенклатуры деталей, подлежащих изготовлению на этих станках. Ниже приводятся основные требования по выбору деталей для обработки на станках с ЧПУ.

Детали должны иметь сложную форму или криволинейные поверхности, для изготовления которых на универсальных станках требуется специальная технологическая оснастка, фасонный режущий инструмент и затрачивается значительное вспомогательное время.

Конфигурация деталей должна позволять концентрировать как можно большее число операций в одну. Число операций, выполняемых на универсальном станке, должно быть больше, чем при обработке на станке с ЧПУ. У корпусных деталей обрабатываемые поверхности должны быть сосредоточены на четырех боковых сторонах детали, что позволяет обработать деталь за одну установку на поворотном столе. Остальные две поверхности не должны обрабатываться или подвергаться минимальной обработке.

Возможность установки и закрепления заготовки на станке посредством простейших приспособлений.

Обрабатываемые детали не должны иметь длинных расточек, требующих применения борштанг, так как на станках с ЧПУ расточка производится на коротких жестких оправках.

Требования к сносности отверстий в противоположных стеках не должны быть строгими. При этом если ось отверстия не проходит через центр стола, дополнительно требуется перемещение стола по горизонтальной координате.

Обработка не должна содержать операций, требующих настройки инструментов в процессе работы станка.

Общее число инструментов, требующихся для обработки детали, должно быть минимальным. Это достигается унификацией размеров отверстий, резьбы, канавок и т.д.

К заготовкам деталей изготовляемых на станке с ЧПУ предъявляются дополнительные требования.

Припуски и допуски должны быть минимальными. Рекомендуется их уменьшить на 10…30 по сравнению с обработкой на станке с ручным управлением.

Твердость заготовок должна колебаться в небольших пределах для возможности регулировать время смены инструментов.

Наличие технологических баз, удовлетворяющих условию совмещения координатных осей заготовки с осями координатной системы станка.

Ужесточение требований по точности и свойствам материала заготовок, обрабатываемых на станках с ЧПУ, объясняется необходимостью уменьшить нагрузку на станок [1].

Алюминий – наиболее популярный и востребованный из многочисленных металлов, используемых в производстве современной техники. Главной причиной его широкого использования является подходящая плотность (это достаточно легкий материал). Алюминий не поддается коррозии, при этом пластичность материала сохраняется длительное время. Токарная обработка алюминия в чистом виде – трудоемкий процесс. Поэтому достаточно часто для работы на токарном оборудовании используются разнообразные сплавы с алюминием.

Алюминиевые сплавы делят на два типа: деформируемые – служат для изготовления листов, труб, плит, профилей и др.; литейные – используются для фасонного типа литья (в основном хорошо поддаются резке).

Они классифицируются на такие группы, как: сплав с кремнием (силумин); сплав с медью (механические характеристики повышаются после термической обработки); сплав с магнием (применяются в авиастроении и токарной обработке деталей из-за высоких антикоррозийных свойств).

С позиции легкости осуществления процесса токарной обработке алюминия, сплавы можно классифицировать на два вида: мягкие сплавы, которые вызывают проблемы при резке; относительно твердые и прочные сплавы, легко поддающиеся обработке на токарном станке (часто они могут быть обработаны стандартным инструментом общего использования, но для повышения скорости и качества обработку можно производить с помощью определенных инструментов).

На сегодняшний день широко используются такие виды резки алюминия, как:

– лазерная резка, которая зачастую используется для обрезания периметра изделия, раскройки листового алюминия;

– плазменная резка, которая используется для того, чтобы раскроить детали изделия;

– гидроабразивная резка, которая подходит для шлифовки металла и высокоточной обработки;

– механическая обработка (распил, сверление, обработка алюминия на токарном станке, фрезерная резка и т.д.).

Токарная обработка алюминия – это самый распространенный сегодня вид механической обработки металла. Принцип токарных работ – снять лишний слой и довести заготовку до нужной формы и размера. Выделяют несколько видов токарной обработки, исходя из поставленных перед специалистом задач: автоматная; лоботокарная; резьботокарная; токарная с ЧПУ; винторезная; карусельная; револьверная.

Самым применяемым видом резки является обработка алюминия на токарном станке с ЧПУ, когда для работы с данным материалом используют определенные режимы резки и типы фрез. По сравнению с многими другими металлами, алюминий более мягкий, что требует специального подхода при работе с ним. Алюминий может забить фрезу длинной стружкой, имеющей вязкую тягучую структуру, которая при этом может обмотать устройство.

Поэтому при обработке алюминия на токарном станке с ЧПУ рекомендуется использовать специализированную концевую фрезу, защищенную от прилипания металлической стружки. Ручная обработка без специально предназначенных для этого материалов нуждается в особом внимании. Необходимо вовремя очищать фрезу, чтобы избежать повреждения механизма. От типа сплава зависит подача смазки и охлаждающего раствора. Обработка алюминия на токарном станке характеризуется как способностью вязкой стружки забивать инструмент, так и количеством полученного материала. Поэтому при токарной обработке алюминия следует продумать систему удаления лишней стружки с механизма. При работе на станке с ЧПУ необходимо кроме технического еще и программное разрешение задачи. Оно подразумевает настройку конкретного подходящего режима, применение специальной фрезы (двухзаходной или трехзаходной). Нужно предусмотреть и использование широких углублений для отходов. Капризный алюминий требует особенного подхода. Поэтому использование специальной фрезы поможет избежать повреждений и заломов [2].

В настоящее время сокращение сроков проектирования и подбор оптимальных параметров процесса резания – это важнейшие требования, предъявляемые к разработке технологического процесса. Применение современных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет удовлетворить их лишь частично, так как в большинстве случаев технолог самостоятельно применяет решение о выборе тех или иных режимов резания, руководствуясь собственным опытом [3].

На кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» активно развивается следующее направление научной деятельности: прогрессивные технологии и оборудование машиностроительного производства; выбор, создание новых и адаптация интеллектуальных обучающих систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки и сборки [4].

Список использованных источников

1. **Коган, Б. И.** Технологическая подготовка обработки деталей на станках с ЧПУ / Б. И. Коган. – Кемерово, ГУ КузГТУ, 2003. – 3 с.

2. **FindPatent** [Электронный документ]. – URL : http://www.findpatent.ru/patent/263/2639105.html (дата обращения: 21.06.2018).

3. **Пестрецов, С. И.** Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С. И. Пестрецов, К. А. Алтунин, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 221 с.

4. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения : монография / К. А. Алтунин. М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.

References

1. **Kogan, B. I.** Tekhnologicheskaya podgotovka obrabotki detaley na stankakh s CHPU / B. I. Kogan. – Kemerovo GY KyzGTY, 2003 – 3 s.

2. **FindPatent** [Elektronnyy gokument]. – URL:http://www.findpatent.ru/patent/263/2639105.html (data obrasheniya: 21.06.2018)

3. **Pestrecov, S. I.** Koncepciya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proektiro vaniya processov rezaniya v tekhnologii mashinostroeniya / S. I. Pestrecov, K. A. Altunin, M. V. Sokolov, V. G Odnolko. – M. : Izdatelskij dom Spektr, 2012. – 221 p.

4. **Altunin, K. A.** Koncepciya sozdaniya informacionnogo obespecheniya intellektu alnoj-sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya processov rezaniya v tekhnologii-mashinostroeniya : Monografiya / K. A. Altunin, M. V. Sokolov. – Tambov : Studiya pechati Pavla Zolotova, 2015. – 112 p.

УДК 621.9-529.001.2

Бровкин К. А.,[1] Фидаров В. Х.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел.+ 7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Тел.+ 7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ

Brovkin K. A.,[1] Fidarov V. Kh.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel.+ 7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Tel.+ 7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

A STUDY OF THE EEFECT OF CUTTING CONDITIONS AND GEOMETRIC PARAMETERS OF A CUTTER ON SURFACE ROUGHNESS IN FINISH TURNING

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования влияния режимов резания и геометрических параметров резца на шероховатость при чистовом точении и даны рекомендации по оптимальному режиму резания и скорости подачи.

Ключевые слова: чистовое точение, параметры шероховатости, режимы резания, граница износа, порог износа.

Abstract. The paper presents the results of the study of the effect of cutting conditions and geometric parameters of the cutter on the roughness at the finishing turning and recommendations for the optimal cutting mode and feed rate.

Keywords: finishing turning, roughness parameters, cutting data, wear limit, wear threshold.

Введение. Качество деталей машин с геометрической стороны определяется точностью размеров поверхностей и расстояний между ними, точностью относительного расположения поверхностей детали и соответствием формы поверхности своему идеальному прототипу.

В машиностроении возрастает роль поверхности детали в ее функциональном назначении. Ее состояние определяет такие свойства детали, как адгезионные способности, усталостная прочность, светоотражательная способность, плотность соединения, износоустойчивость, контактная жесткость, маслоемкость и т.д.

Величина неровностей поверхностей влияет на чистый размер детали. При ужесточении допусков на размер и форму деталей, возрастают и допуски на пределы шероховатости.

В процессе отработки на поверхностном слое заготовки под действием сил процесса, возникают следы отработки – неровности. Геометрически идеальных поверхностей не существует, а детали, поверхности которых близки к таковым, являются очень дорогими. Таким образом, наличие шероховатости на поверхности детали не избежать.

Требования к шероховатости устанавливаются в зависимости от требуемых функциональных свойств поверхности.

Сейчас часто окончательную деталь получают чистовым точением, точность современных станков это позволяет, следовательно, вопрос о влиянии режимов резания на шероховатость при чистовом точении является актуальным.

Задачи. На шероховатость поверхности оказывают влияния очень многие технологические факторы. При обработке резанием, форма, величина и направление микронеровностей зависят от методов, схемы и режимов обработки. Самое существенное влияние из параметров режимов резания на шероховатость оказывает скорость резания и скорость подачи инструмента.

Скорость резания влияет на захват и отрыв слоев, расположенных под режущей кромкой резца и наростообразование на режущей кромке инструмента.

Влияние подачи инструмента на шероховатость детали можно приближенно определить из двух смежных положений резца, смещенных на величину подачи, по формуле (1).

$$Rz = \frac{S^2}{8r} \text{ (мкм)}, \tag{1}$$

где Rz – параметр шероховатости (средняя высота профиля по 10 точкам); S – величина подачи на оборот; r – радиус при вершине резца [2].

Для скорости резания подобные рекомендации отсутствуют.

Помимо этого на величину шероховатости влияет наличие колебаний, которые возникают во время резания. Параметры же колебаний зависят от скорости резания [5]. Конкретных рекомендаций по выбору скорости в литературе не существует.

Исходя из изложенного выше, становится важным проведение исследования режимов резания, скорости резания и других параметров на чистовую обработку поверхностного слоя и величину шероховатости с целью определения зоны резания со значением параметров, при котором величина шероховатости будет являться минимальной.

Результаты исследования. На кафедре «КИСМ» были проведены исследования по определению зависимости шероховатости поверхностного слоя от скорости резания титанового сплава ВТ1 – 00 при обработке резцом с пластиной твердого сплава VCGX160404-AL H10, при подаче $S = 0{,}1$ мм/об и глубине резания $t = 0{,}3$ мм. Исследования велись на токарном станке 16Б16КА. Параметры шероховатости Ra и Rz измерялись с помощью профилометра.

Зависимости изменения параметров шероховатости поверхности от скорости резания V приведены на рис. 1

По графику видно, что оптимальная скорость резания для обеспечения допустимой шероховатости при точении около 420 м/мин.

Разница между Ra и Rz при малых скоростях резания говорит о том, что шероховатость носит нерегулярный характер. При устойчивом резании соотношение между параметрами Ra и Rz примерно в соотношении 4 к 1: $4Ra \gg Rz$. В зоне наростообразования параметр Rz значительно превышает Ra.

Нарост, выступающий впереди лезвия резца и ниже линии реза, увеличивает шероховатость лезвия, формирующего обработанную поверхность, оставляет на поверхности среза глубокие борозды и разрывы, которые влияют на Rz больше, чем на Ra.

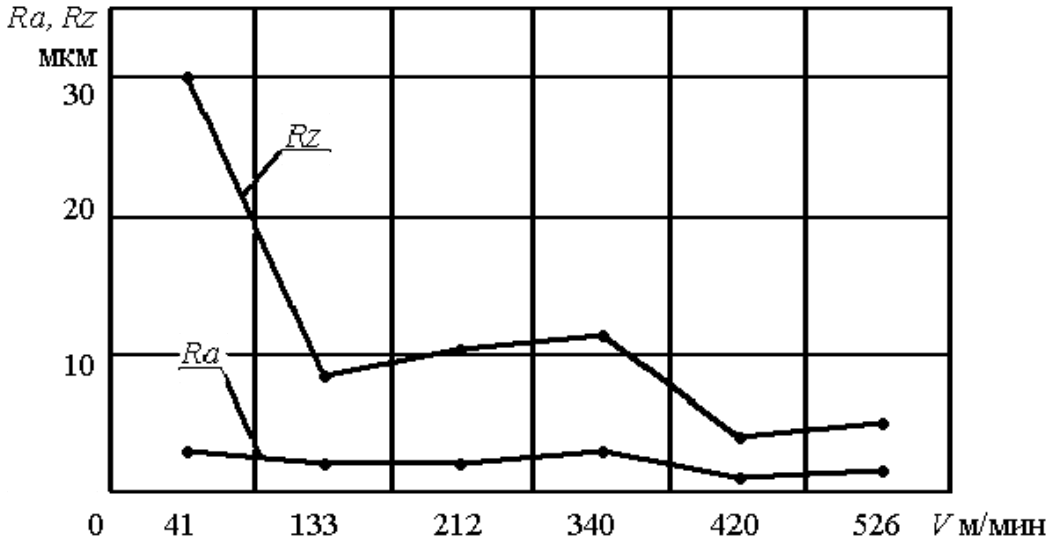


Рис. 1. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении титанового сплава

При увеличении скорости резания увеличивается и амплитуда колебаний, следовательно, и величина шероховатости становится больше. Колебания ухудшают шероховатость поверхности. Шероховатость напрямую зависит от амплитуды колебаний. Параметры *Ra* и *Rz* меняется мало.

Исследования, проведенные с другими сплавами, а именно с алюминиевым сплавом САС – 400 дали аналогичные результаты. Исследование проводилось при следующих режимах: глубина резания 0,1 мм, подачи 0,02 мм/об, скорость резания соответственно менялась и принимала значения 100 м/мин, 200 м/мин, 300 м/мин, 400 м/мин и 600 м/мин. После исследования на профилометре измерялись параметры *Ra* и *Rz* в нескольких точках по всей длине детали и находился средний размер. Зависимости значений параметров шероховатости от скорости резания приведены на рис. 2.

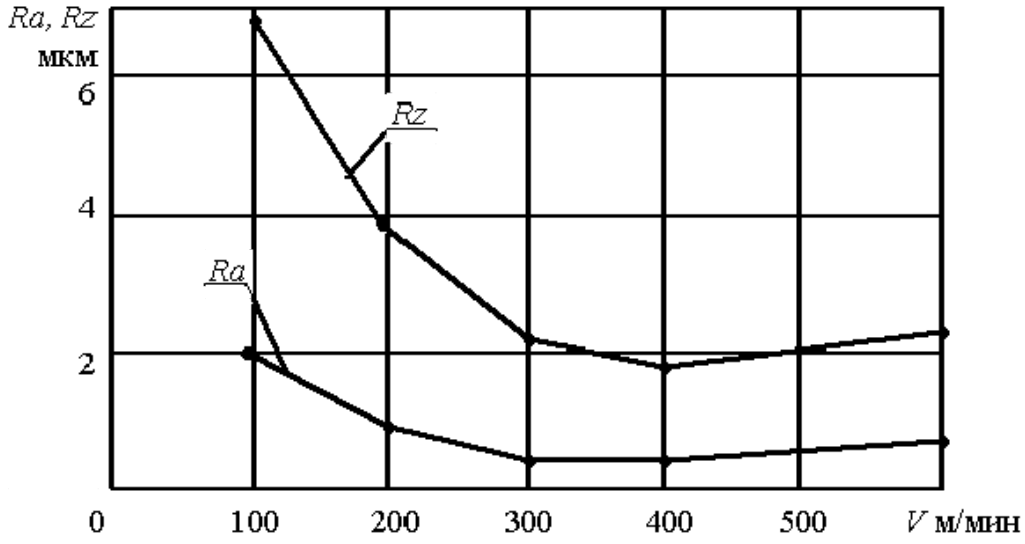


Рис. 2. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении алюминиевого сплава

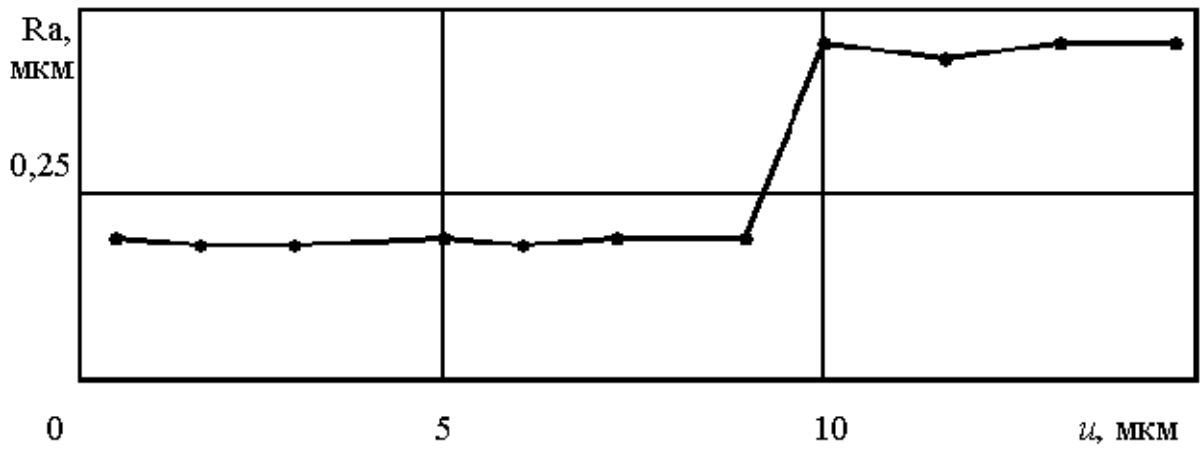


Рис. 3. Зависимость параметра *Ra* от размерного износа инструмента при обработке алюминиевого сплава

Износ инструмента как и предполагалось, также влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности [3]. При износе резца существует определенный порог, определенная величина, до достижения этого порога износа шероховатость меняется мало, а после этой величины резко возрастает.

Чтобы проверить эту гипотезу были проведены эксперименты по определению изменения величины параметра шероховатости *Ra* от размерного износа резца. При точении глубину резания поставили 0,1 мм, подачу поставили 0,02 мм/об и скорость резания 405 м/мин. Зависимость параметра *Ra* от размерного износа u приведена на рис. 3

Как и говорилось выше, величина шероховатости резко увеличивается при достижении определенного порога износа резца. Резкое ухудшение шероховатости происходит при достижении износа резца величины 9 мм. Ra изменился с 0,18 мкм до 0,43 мкм.

Характер износа после этого перепада не изменился, но на задней грани появилась четко различимая фаска.

Теперь этот момент резкого ухудшения шероховатости можно считать границей стойкости инструмента.

Вывод по работе.

1. Зависимость параметров шероховатости поверхности от скорости резания имеет выраженный минимум, когда отсутствует наростообразование и колебание системы. В этой зоне и рекомендуется проводить обработку.

2. В зоне неустойчивого резания существует большая разница между *Ra* и *Rz* и изменения их соотношения, но в зоне устойчивого резания то же соотношение минимально и постоянно. В связи с этим можно говорить об устойчивости процесса резания.

3. Шероховатость от размерного износа самого резца практически не зависит до определенного момента, порога износа. При прохождении этого порога и появлении на задней грани резца фаски, величина шероховатости резко увеличивается. Этот порог резкого ухудшения шероховатости можно считать границей стойкости инструмента при чистовом точении.

Список использованных источников

1. **Анухин, В. И.** Оценка точностных возможностей токарных станков / В. И. Анухин, Т. А. Макарова, С. А. Любомудров // Журнал Вестник ИНЖЕКОНА. Серия технические науки. Вып. 3. – Санкт-Петербург, 2005. – 108 – 111 с.

2. **Жуков, Э. Л.** Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов : учеб. пособие / Э. Л. Жуков и др. ; под общ. ред. С. Л. Мурашкина. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 408 с.

3. **Любомудров, С. А.** Обеспечение качества обработки специальных алюминиевых сплавов при тонком точении / С. А. Любомудров, Т. А. Макарова // Управление качеством: проблемы, исследования, опыт : сборник научных трудов. – Вып. 5. – СПб. : СПбГИЭУ, 2007. – 86 – 97 с.

4. **Табенкин, А. Н.** Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов ; под ред. к.т.н. Н. А. Табачниковой. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.

5. **Технология** машиностроения, колебания и точность при обработке материалов резанием : учеб. пособие / С. Л. Мурашкин, А. Г. Схиртладзе, А. М. Соловейчик, и др. ; под редакцией С. А. Мурашкина. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. – 280 с.

References

1. **Anuhin, V. I.**, Makarova T. A., Lubomudrov S. A. Score accuracy capacity lathes. The Journal Gazette INZhEKONA. A series of technical sciences. – Is. 3. – St. Petersburg, Russia, 2005. – 108 – 111 p.

2. **Zhukov, E. L.** etc. the basics of mechanical engineering. Design stages and accuracy of technological processes : Stud. Manual; under Gen. Ed. S. L. Murashkina. – Spb. : Izd-vo Polytechnic. University, 2008. – 408p.

3. **Lubomudrov, S. A.**, Makarova T. A. quality assurance processing of special aluminum alloys in thin turning. Quality management: problems, research, experience. Collection of scientific papers. ISS. 5. – SPb. : SPbGIJeU, 2007. – 86 – 97 p.

4. **Tabenkin A. N.**, Tarasov S. B., StepanovS. N. Roughness, waviness, profile. International experience / edited by Ph. d. N. A. Tabachnikovoj. – SPb. : Izd-vo Polytechnic. University, 2007. – 136 p.

5. **Manufacturing** Engineering, fluctuations and accuracy when cutting materials processing: Stud. Manual / C. l. Murashkin, A. G. Skhirtladze, A. M. Soloveichik , E. L. Zhukov, I.I.Kozar, B. J. Rozovskiy. Degtyarev. Edited by S. A. Murashkina. – SPb. : Izd-voSpbspu, 2003. – 280 p.

УДК621.9-529.001.2

Бровкин К. А.,[1] Фидаров В. Х.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел.+ 7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Тел.+ 7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ НА ИХ ВНУТРЕННИЕ СВОЙСТВА

Brovkin K. A.,[1] Fidarov V. Kh.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel.+ 7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Tel.+ 7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

THE EFFECT OF MECHANICAL PROCESSIGN OF PARTS ON THEIR INTERNAL PROPERTIES

Аннотация. В статье приводится описание исследований и некоторые экспериментальные данные влияния обработки на свойства детали, описание свойств и некоторые виды обработки.

Ключевые слова: свойства материала, механическая обработка, структура, воздействие.

Abstract. The article describes the research and some experimental data on the effect of mechanical processing of a part on the properties, the description of properties and some types of processing is given.

Keywords: material properties, mechanical processing, structure, effect.

Материал детали (чугун, сталь, цветной сплав, стекло, гранит и другое) выбирает конструктор исходя из служебного назначения детали, механических, физических, химических и технологических свойств материала.

К **механическим свойствам** относятся: временное сопротивление при растяжении и сжатии, предел текучести, относительное удлинение, структура остаточных напряжений и другие.

К **физическим свойствам** относятся: удельный вес, плотность, модуль объемного сжатия, модуль Юнга, температура плавления, температура кристаллизации, теплопроводность, коэффициент линейного расширения, электрическое сопротивление.

Химические свойства материала, прежде всего, определяются его коррозионной стойкостью.

К **технологическим свойствам** относятся обрабатываемость резанием, обрабатываемость давлением, свариваемость, упрочняемость.

Требования к свойствам материала должны задаваться системой номинальных значений и допусками, ограничивающими отклонения показателей их номинальных значений.

На машиностроительных предприятиях детали машин изготавливают из полуфабрикатов. Полуфабрикатами в основном являются изделия металлургических предпри-

ятий: прокат; заготовки, полученные отрезкой из проката, литьем, пластическим деформированием, сваркой; металлические порошки и др.

При изготовлении детали заготовки подвергаются силовым, тепловым, химическим и другими воздействиями. Вследствие этого на каждом из этапов технологического процесса могут меняться химический состав, структура, зернистость материала заготовки, а, следовательно, механические свойства, физические свойства, химические свойства, состояние поверхностного слоя.

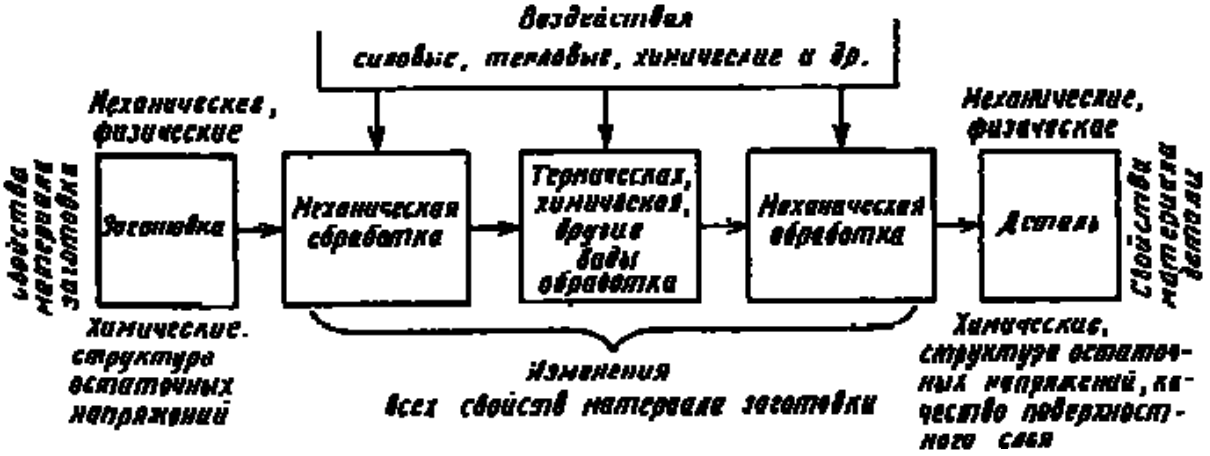
Переход от свойств материала заготовки к свойствам материала готовой детали может быть представлен схемой, приведенной на рис. 1.

Таким образом, для достижения требуемых свойств материала детали необходимо учитывать следующее:

1) строить технологический процесс изготовления детали так, чтобы обеспечить необходимые свойства материала детали наряду с ее геометрической точностью;

2) исходя из требуемых свойств материала детали и с учетом изменения этих свойств в процессе изготовления, предъявить комплекс требований к материалу заготовки (например, жидкотекучесть, хорошая обрабатываемость);

3) обеспечить соблюдение требований к материалу заготовки в технологическом процессе ее изготовления (литья, ковки, штамповки отрезки).



Для того, чтобы осознанно выбрать технологический процесс получения заготовки и обеспечить необходимое качество материала детали в процессе ее изготовления, необходимо знать как формируются свойства материала в процессе получения заготовки и в процессе изготовления детали.

Вид заготовки и способ ее получения выбирают с учетом ее последующей обработки на основе технико-экономического анализа.

На выбор заготовки влияет марка материала и конструкции детали (например, станина или вал). На выбор способа получения заготовки, кроме материала и конструкции детали, влияют размеры детали, требуемая точность размеров детали, качество поверхности заготовки, объем выпуска, тип производства, характер последующей механической и других видов обработки заготовки.

Например, заготовкой для зубчатого колеса может быть:

а) заготовка, полученная одним из нескольких способов резки;

б) поковка, полученная свободной ковкой в открытом штампе, в закрытом штампе, на горизонтально-ковочной машине;

в) отливка, полученная литьем в разовые формы (сырые, сухие), в кокиль, под давлением, центробежным и т.д.

Разные способы получения заготовок приводят к разным свойствам их материала. Структура и размер зерен материала отливки зависит от многих факторов: количества и свойства примесей в чистом металле или легирующих элементов в сплаве, температуры разливки, скорости охлаждения при кристаллизации, конфигурации, теплопроводности, состояния внутренних поверхностей литейной формы.

От структуры и зернистости материала отливки зависят его механические свойства.

Влияние примесей и легирующих элементов на свойства материала подробно изучаются в дисциплине <Материаловедение>.

Свойства материала литой заготовки во многом зависят от ее конфигурации. Конструкция отливки должна создавать возможность одновременного или последовательно направленного затвердения ее частей. Нужно стремиться при проектировании к равномерным сечениям стенок или постепенному увеличению массивности стенок в предполагаемом направлении затвердения материала.

Неравномерность охлаждения различных частей отливок, сопротивление формы и стержней свободной усадки металла приводят к образованию трещин, усадочных раковин и остаточных напряжений.

Быстрое охлаждение тонких стенок приводит к <отбелу> поверхностей.

Пластическое деформирование материала также сопровождается изменением его физико-механических свойств. При прокатке и ковке слитков металла происходит деформирование его дендритной структуры, зерна металла вытягиваются, и его механические свойства в продольном и поперечном направлениях становятся различными, что служит причиной снижения прочности заготовок и появления остаточных напряжений. При пластичном деформировании большое значение имеет температура нагревания. Нарушение теплового режима приводит к образованию трещин, крупнозернистой, дефектной структуре (перегретая сталь) и к неисправимому браку – пережогу (оплавлению и окислению металла по граница зерен). Если деформирование осуществляется без предварительного нагрева, то в металле происходит ряд явлений (возникают остаточные напряжения, разрушаются отдельные кристаллы), в результате которых деталь приобретет наклеп. Наклеп затрудняет пластическое деформирование и приводит к разрушению металла.

Для технологического процесса изготовления детали большое значение имеет обрабатываемость материала резанием.

Обрабатываемость резанием – способность поддаваться обработке резанием – зависит, от химического состава материала заготовки, его структуры, зернистости, а также от свойств материала режущего инструмента.

К показателям обрабатываемости относятся сила резания (момент вращения) по сравнению с эталонным материалом (сталь 45); эффективная мощность, затрачиваемая на резание; склонность к наростообразованию на инструменте; интенсивность изнашивания инструмента; качество поверхностей (шероховатость, остаточное напряжение на поверхностном слое).

Значения показателей обрабатываемости конструкционного материала данного химического состава и структурного состояния определяются твердостью, пределом прочности, относительным удлинением, коэффициентом трения, свойством изнашивания лезвия инструментов, теплопроводностью и т.д.

Для уменьшения недостатков структуры материала в литых заготовках (особенно в стальных), а также в кованных и штампованных заготовках (крупнозернистого строения в результате перегрева и рано законченной ковки, наклепа, остаточного напряжения) заготовки подвергают термической обработке (отжигу и нормализации).

В результате термической обработки улучшают механические и технологические свойства материала. Формирование значения любого показателя свойств материала заготовки является случайным процессом. Поэтому неизбежные отклонения от номинальных значений необходимо ограничивать допусками. Однако назначение допусков возможно лишь с учетом тех изменений, которые свойства материала претерпевают в процессе изготовления детали.

Воздействие механической обработки на свойства материала заготовок. Воздействие механической обработки на свойства материала заготовок определяется действием сил теплоты и химических явлений, сопровождающих процесс формирования поверхностных слоев обрабатываемых поверхностей детали.

При обработке резанием под воздействием силы в поверхностном слое материала заготовки возникают упругие и пластические деформации. Пластическое деформирование материала сопровождается его упрочнением (наклепом) и изменением его механических, физических и химических свойств.

При точении степень наклепа увеличивается с ростом сил резания. Чему способствуют увеличение глубины резания и подачи, переход от положительных передних углов резцов к отрицательным, большие радиусы закругления и затупление резцов. Но в то же время изменение режимов обработки, приводящее к увеличению количества теплоты в зоне резания, создает условия для отдыха материала и снятия наклепа с поверхностного слоя.

Общие закономерности образования наклепа характерны для точения, фрезерования, шлифования и других механических способов обработки. Ориентировочное представление о степени и глубине наклепа при разных способах обработки можно получить из табл 1.

Интенсивность и глубина распространения наклепа зависит также от свойств материала заготовки во взаимосвязи со скоростью резания.

В процессе механической обработки в поверхностных слоях заготовки возникают остаточные напряжения, причинами которых являются различия условий в верхних и нижних соях материала. Под воздействием режущего инструмента в поверхностном слое металла происходит пластическое деформирование, изменения формы кристаллических зерен, нагрев поверхностного слоя до высоких температур, структурные превращения. Эти явления могут сопровождаться изменениями в поверхностном слое плотности объема материала, переформированием кристаллических зерен, тепловыми деформациями. Изменениям состояния поверхностного слоя препятствуют нижележащие слои материала. В результате сложного взаимодействия явлений в поверхностных и нижележащих слоях материала возникают остаточные напряжения противоположных знаков (растяжение и сжатие).

1. Степень и глубина наклепа при разных способах обработки (по данным Э. В. Рыжова)

Вид обработки	Степень наклепа, %	Глубина наклепа, мкм
Точение:		
обычное и скоростное	120...150	30...50
тонкое	140...180	20...60
Фрезерование:		
торцовое	140...180	40...100
цилиндрическое	120...140	40...80
Сверление и зенкерование	160...170	160...200
Развертывание	–	150...200
Протягивание	150...200	20...75
Зубофрезерование и зубодолбление	160...200	120...150
Шевингование зубьев	–	До 100
Шлифование:		
круглое деталей из сталей:		
незакаленной углеродистой	140...160	30...60
низкоуглеродистой	125...130	20...40
закаленной		
плоское	150	16...35

Большое значение в формировании остаточных напряжений имеют химический состав материала и его склонность к структурным изменениям, пластичность, твердость, упругость, теплопроводность и др. механические и физические свойства.

Прямое воздействие на свойства материала поверхностного слоя оказывает теплота, возникающая в зоне резания. Структурные изменения материала поверхностного слоя под воздействием теплоты могут быть различными при разных способах обработки и приводить к дефектам (прижогам, мелким трещинам и т.п.).

Температура в зоне резания влияет и на химический состав материала поверхностного слоя. Если температура нагрева поверхностного слоя превысит температуру плавления какого-либо компонента в сплаве металла, то это может привести к выгоранию легирующего компонента. Нагрев поверхностного слоя интенсифицирует окислительные процессы, происходящие в нем, и приводит к изменению его химического состава.

Обработка методами поверхностно-пластического деформирования (ППД). Методы ППД основаны на пластическом деформировании поверхностного слоя заготовки без снятия слоя материала и относятся к отделочным методам обработки, применяемым для повышения предела выносливости и износостойкости детали.

К методам ППД относят дорнирование, выглаживание, чеканку, дробеструйную обработку, накатывание (раскатывание), обработку стальными щетками. Все методы ППД сводятся к силовому воздействию инструмента на обрабатываемую поверхность, вследствие чего происходит смятие гребешков микронеровностей, образование в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений, повышение механических свойств материала.

Воздействие на свойства материала заготовок термической и химико-термической обработок.

Основной задачей термообработки заготовок является изменение структуры и свойств их материала, направленные, чаще всего, на получение более мелкого зерна. Термической обработке подвергаются слитки, отливки, поковки, сварные соединения, заготовки, полученные из проката, а также детали, изготовленные из разнообразных металлов и сплавов.

Основными видами термической обработки заготовок из сталей являются **отжиг, нормализация, закалка и отпуск**.

Отжиг (нагрев дол температуры выше A_{c3} на 30…50 °С и охлаждение со скоростью 100…200 °С/ч для углеродистых сталей и 20…70 °С/ч – для легированных) заготовок из сталей проводят для снижения твердости, повышения пластичности и получения однородной мелкозернистой структуры.

Нормализация сообщает стали более высокую прочность, чем отжиг, из-за большей скорости охлаждения (после нагрева заготовку охлаждают на воздухе).

Закалка обеспечивает в заготовках из стали структуры наивысшей твердости (после нагрева охлаждение осуществляется погружением заготовки в воду или масло, имеющих температуру 20…25 °С).

Отпуск обеспечивает большую пластичность материала и снятие остаточных напряжений. В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска: низкий (при 120…250 °С), средний (при 350…450 °С) и высокий (при 500…680 °С).

Комбинированную термическую обработку заготовок из конструкционных сталей, состоящую из полной закалки и высокого отпуска, называют **улучшением.**

Получение требуемых свойств материала заготовки, подвергаемой термообработке, зависит от его химического состава, степени его однородности и чистоты, наличия остаточных напряжений, формы и размеров заготовки, правильного выбора и соблюдения режимов термообработки.

Химико-термическую обработку (ХТО) применяют для поверхностного упрочнения и противодействия влиянию на поверхность агрессивных сред. Наибольшее распространение в машиностроении получили процессы**: цементации, цианирования** и **азотирования.**

Цементация представляет собой процесс обогащения поверхностного слоя (0,5…2,2 мм) низкоуглеродистой стали углеродом. Последующая закалка сообщает поверхностному слою высокую твердость (HRC 64:66) и вязкость сердцевины и повышает износостойкость и усталостную прочность детали. Цементацию осуществляют в твердом или газообразном карбюризаторе при температуре 920…1050 °С. Обычно цементации подвергают не все, а лишь отдельные поверхности заготовок, поэтому нецементируемые поверхности должны быть изолированы. Существуют различные способы изолирования: омеднение, применение специальных обмазок, назначение припус-

ков, удаляемых с заготовки после цементации до закалки. В последнем случае в технологическом процессе изготовления детали на первых этапах обрабатывают поверхности заготовки, подлежащие цементации с припуском под обработку после закалки. Остальные поверхности либо не обрабатывают, либо обрабатывают с припуском в 1,5–2 раза превышающим заданную глубину цементированного слоя. После цементации защитные и цементированные слои с этих поверхностей удаляют, и заготовку направляют на закалку, в результате которой высокую твердость приобретут только цементированные поверхности.

Цианирование как и цементация повышает твердость поверхностного слоя, износостойкость и усталостную прочность. Процесс насыщения поверхностного слоя материала углеродом ведут при температуре 820…950 °С с применением в качестве карбюризатора цианистых соединений (жидких, газообразных, твердых). Цианирование обеспечивает большую износостойкость, чем цементация из-за содержания в поверхностном слоя азота.

Азотирование применяют для повышения твердости, износостойкости и предела выносливости деталей машин, изготавливаемых из легированных сталей и чугуна. До азотирования детали подвергают закалке и высокому отпуску, проводят чистовую обработку заготовки, а после азотирования – отделочную обработку (тонкое шлифование, притирку, доводку и т.п.). Насыщение азотом ведут при температуре 500…600 °С в муфелях или контейнерах, через которые пропускают аммиак. Азотированию подвергают лишь отдельные поверхности, все остальные защищают гальваническим лужением. Азотирование – более длительный процесс, чем цементация, требующий 50 – 60 ч выдержки, при толщине азотированного слоя, не превышающего 0,5 мм.

Список использованных источников

1. **Справочник** технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 1 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 914 с.

2. **Справочник** технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, Д. Г. Суслова. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 949 с.

3. **Колесов, И. М.** Основы технологии машиностроения : учебник для машиностроительных вузов. – М. : Машиностроение, 1997. – 592 с.

References

1. **Spravochnik** tekhnologa-mashinostroitelya : v 2 t. T. 1 / Pod. red. A. M. Dal'skogo, A.G. Kosilovoj, R. K. Meshcheryakova, A. G. Suslova – M. : Mashinostroenie-1, 2001. – 914s.

2. **Spravochnik** tekhnologa-mashinostroitelya : v 2 t. T. 2 / Pod red. A. M. Dal'skogo, A. G. Kosilovoj, R. K.Meshcheryakova, D. G.Suslova. – M. : Mashinostroenie-1, 2001 – 949 s.

3. **Kolesov, I. M.** Osnovy tekhnologii mashinostroeniya : uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov. – M. : Mashinostroenie, 1997. – 592 s.

УДК 621.9-529.001.2

Бровкин К. А.,[1] Фидаров В. Х.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. +7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Тел. +7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ОТБЕЛЕННОГО ЧУГУНА

Brovkin K. A.,[1] Fidarov V. Kh.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. +7 953 128 09 76, e-mail:radio.africa@mail.ru),
[2](Tel. +7 9108533961, e-mail:fidval@mail.ru)

A STUDY ON DURABILITY OF TOOL MATERIALS WHEN HANDLING WORKPIECES MADE FROM BLEACHED PIG IRON

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования стойкости инструментальных материалов при механической обработке заготовок деталей машин из отбеленного чугуна и даны рекомендации по повышению производительности обработки и стойкости инструментов при токарной обработке заготовок деталей из отбеленного чугуна.

Ключевые слова: механическая обработка, отбеленный чугун, инструментальный материал, стойкость.

Abstract. The paper presents the results of the study of durability of tool materials under mechanical processing of workpieces of machine parts made from bleached pig iron. Recommendations on improving the performance and durability of tools under turning processing of workpieces made from bleached pig iron are given.

Keywords: mechanical treatment of bleached pig iron, instrumental material, durability.

Развитие техники связано с созданием и освоением технологии обработки заготовок из материалов с высокой удельной прочностью и твердостью поверхностного слоя. К таким заготовкам принадлежат плунжеры вулканизационных прессов завода «Тамбовполимермаш», изготавливаемые из отбеленного серого чугуна. У плунжеров для высокой износостойкости поверхностный слой должен оставаться отбеленным. Отбеленный же слой обладает высокой твердостью и трудно поддается обработке резанием.

По существующим заводским технологиям обработка заготовок из отбеленного чугуна производится стандартными резцами, оснащенными в основном твердосплавными пластинами из твердого сплава ВК8, на малых скоростях резания и при интенсивном износе режущей части инструмента.

Уменьшение скоростей резания для снижения скорости износа инструмента приводит к возрастанию трудоемкости изготовления таких изделий и к уменьшению производительности их механической обработки.

Поэтому разработка обоснованных технологических рекомендаций по выбору рациональных режимов резания и оптимальных конструкций инструмента для операций

механической обработки заготовок из отбеленных чугунов с целью повышения производительности обработки и износостойкости инструмента является актуальной задачей для машиностроения. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Заготовкой плунжера является отливка из чугуна СЧ20 (ГОСТ 1412–79) со следующими размерами: длина 1470 мм, диаметр 340 мм. Глубина отбеленного слоя должна быть не менее 20…25 мм, твердость на поверхности не менее 50 HRC. Из одной заготовки изготавливают две детали. Масса заготовки (на одну деталь) составляет 514,8 кг, коэффициент использования материала $K_м$ = 0,7.

Токарная обработка (черновая и чистовая) плунжеров выполняется на токарных станках модели 165. Заготовка (диаметр 340 мм и длина1470 мм) устанавливается с выверкой в 4-х кулачковом патроне с поджимом в торец задним центром. В качестве режущего инструмента используются проходные призматические ($H \times B$ = 40×25 мм) резцы с напаянными пластиками из твердого сплава ВК8. Точение поверхности плунжера осуществляется с диаметра 340 до диаметра 321,5h12 мм за 6 проходов на следующих режимах резания: глубина резания t = 2-4 мм; скорость подачи S = 1,43…2,04 мм/об; скорость резания V = 5,3 м/мин.

Как показал анализ технологии, трудоемкость механической обработки плунжера (штучное время) составляет на настоящее время 23,67 ч, из них почти 50% трудоемкости (11,09 ч) приходится на долю первых двух токарных операций, связанных с черновой и чистовой обточкой наружной поверхности плунжера. В этой связи повышение производительности токарных операций при обточке плунжеров представляет важную производственную задачу для завода «Тамбовполимермаш».

Целью исследования является повышение производительности токарной обработки деталей из отбеленного чугуна – плунжера 432-381-08-001 и валков 501-001-023 и 501-015-002, не менее, чем в 2 раза по сравнению с существующей на заводе «Тамбовполимермаш» технологией.

Задачами исследования являются: 1) выбор оптимального инструментального материала; 2) выбор конструктивно-геометрических параметров инструментов; 3) оптимизация режимов резания при выполнении токарной обработки.

Для испытания отобраны инструменты из твердых сплавов: 1) на вольфрамовой основе – тип ВК; 2) твердые сплавы серии МС;3) твердые сплавы типа ВП – для предварительного обтачивания по корке и получистового точения; минералокерамики: а) оксидно-карбидной группы (ВОК60, ВОК63, 53; ВОК-71); б) оксидно-нитридной группы (кортинит ОНТ-20) – для получистового и чистового обтачивания;- сверхтвердые материалы – композиты (композит 10, 10Д, композит 05; композит 01) – для получистового и чистового точения.

Все инструментальные материалы использовались в виде механически закрепляемых пластин. Для испытания используются резцы оригинальной конструкции, разработанные в лаборатории «Технология машиностроения» ТГТУ (Тамбовский государственный технический университет).

Исследования проводились при режимах резания, представленных в таблице.

Вид обработки	Марка инструм. матер.	Форма и размеры пластин	Геометрические параметры реж. части	Vрез м/мин	t, мм	S, мм/об
1	2	3	4	5	6	7
Черновая по коре	ВП3325	квадр.	φ=45°;γ=0 °;			
	ВП332	12,5х12,5	α=11°;	10-25	1-2	0,2-0,5
		треуг.		10-25	1-2	0,2-0,5
	ВП332	---	---	---	---	---
	ВП321	---	---	---	---	---
	МС3210	---	---	---	---	---
	МС1255 (ТГ7К9)	квадр. 25х25	φ=45°;γ=5 °; α=5°;	5-20	2-4	0,5-1,5
	ВК-8	---	---	---	---	---
	Т15К6	---	---	---	---	---
	ВК15	Круглая 22	r=11°;γ=-5 °;α=10°;	5-15	2-4	1-4
	ВК-8	Круглая 33	r=16°;γ=-10 °;α=10°;	5-15	2-5	1-5
	ВК-4	Призматич.	r=16°;γ=6°;α=10°;	5-15	2-5	1-5
	ВК-8	Призматич.	r=11°;γ=-6 °;α=10°;	5-15	2-5	1-5
	ВК-8(КиБ)	Квадр.12,7		5-15	1-3	0,5-1,0
	ВК-8	---		---	---	---
Получистовая обработка	ВП3325	Квадр. 12,5-12,5	φ=45°;γ=0 °;α=11°;	10-25	1-2	0,2-0,5
	МС3210	---	---	---	---	---
	ВК-4	Призматич	γ=-6 °;α=-6°;	5-15	2-5	1-5
	ВК-8	Кругл. 33	γ=-10 °;α=-10°;	5-15	2-5	1-5
	Композит 10Д	Кругл. 5,56	γ=-10 °;α=-10°;	50-70	0,5-1	0,3-0,5
	Композит 01	Кругл. 5,56	γ=10 °;α=10°;	50-70	0,3-0,6	0,3-0,5
	ВОК-63	Квадрат	γ=-10 °;α=10°;	30-70	0,5-2	0,1-0,3
	ВОК-71	12,7х12,7	γ=-10 °;α=10°;	30-70	0,5-2	0,1-0,3

По результатам выполненных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Применение специальных резцов конструкции ТГТУ с механическим креплением и регулируемым вылетом пластин из сплава ВК6-ОМ обеспечивает повышение производительности токарной обточки плунжеров в 2,85 раза.

2. Для обработки плунжеров рекомендуются следующие режимы обработки: два черновых прохода: V = 16 мин$^{-1}$; S = 3 мм/об; t = 2 мм; получистовой проход: V = 16 мин$^{-1}$; S = 5 мм/об; t = 2 мм; чистовой проход: V = 19мин$^{-1}$; S = 5 мм/об; t = 0,5…1 мм.

3. Разработанный технологический процесс токарной обточки плунжеров резцами с механическим креплением и регулируемым вылетом пластин из сплава ВК6-ОМ можно рекомендовать к внедрению на заводе «Тамбовполимермаш».

4. Удовлетворительную работоспособность при обточке плунжеров показали пластины из сплава VC28 (США). Резцы, оснащенные пластинами из VC28, можно реко-

мендовать для обточки по корке, получистового и чистового обтачивания. Производительность токарной обработки при режимах обработки: $V = (9{,}5\ldots16)$ мин$^{-1}$; $S = (2\ldots2{,}85)$ мм/об; $t = (1{,}5\ldots2{,}5)$ мм увеличивается в 2–2,5 раза по сравнению с заводской технологией.

5. Результаты опытов показали, что эффективность обработки плунжеров режущими пластинами из твердых сплавов ВК8, Т8К7, ВП неудовлетворительная. Пластины интенсивно изнашиваются, либо разрушаются (сплав ВП).

Список использованных источников

1. **Ванин, В. А.** Разработка технологических процессов изготовления деталей в машиностроении : учебное пособие / В. А. Ванин, А. Н. Преображенский, В. Х. Фидаров. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2008. – 332 с.

2. **Расчет** припусков и операционных размеров в технологии машиностроения : учебник для вузов (Гриф УМО АМ) / В. А. Тимирязев, Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, В. У. Мнацаканян, В. Х. Фидаров. – Тамбов : Студия печати Галины Золотовой, 2015. – 350 с.

3. **Фидаров, В. Х.** Токарная обработка крупногабаритных деталей из отбеленного чугуна / В. Х. Фидаров, В. И. Муратов, А. Н. Преображенский // Машиностроитель. – 1991. – № 10. – С. 11–12.

4. **Фидаров, В. Х.** Технология и инструмент для обработки деталей из отбеленного чугуна / В. Х. Фидаров, В. И. Муратов, А. Н. Преображенский // Автоматизация и современные технологии – 1999. – № 12.

5. **Муратов, В. И.** Выбор оптимальных параметров токарной обработки крупногабаритных деталей из отбеленного чугуна : сб. науч. трудов ТГТУ / В. И. Муратов, В. Х. Фидаров, А. Н. Преображенский. – Тамбов : ТГТУ, 1998. – Т. 1. – С. 198 – 204.

References

1. **Vanin, V. A.** Development of technological processes of manufacture of parts in mechanical engineering : tutorial / V. A. Vanin, A. N. Preobrazhensky, V. Kh. Fidarov. – Tambov : Izd-vo TSTU, 2008. – 332 p.

2. **Calculation** of allowances and operating sizes in mechanical engineering : a textbook for universities (Vulture ULV am) / V. A. Timiryazev, J. M. Radkevich, A. G. Skhirtladze, V. U. Mnatsakanyan, V. Kh. Fidarov. – Tambov : Galina Zolotovoj, print Studio 2015. – 350 p.

3. **Fidarov, V. Kh.** Turning large parts of bleached pig iron / V. Kh. Fidarov, V. I. Muratov, A. N. Preobrazhensky // The machinist. – 1991. – № 10. – P. 11–12.

4. **Fidarov, V. Kh.** Technology and tools for machining parts of bleached pig iron. «Automation and modern technology» / V. Kh. Fidarov, V. I. Muratov, A. N. Preobrazhensky. – 1999. – № 12.

5. **Muratov, V. I.** Selection of optimum parameters of turning large parts of bleached pig iron. Sat. researcher. works of TSTU / V. I. Muratov, V. Kh. Fidarov, A. N. Preobrazhensky. – Tambov : TSTU, 1998. – Vol. 1. – P. 198 – 204.

УДК 53.082.62

Богатырев А. О.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов.
(Тел. (4752)630448, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПОЛИМЕРНО-МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ИЗДЕЛИИ

Bogatyrev A. O.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630448, e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru)

THE STUDY OF TEMPERATURE FIELDS IN A POLYMER-METAL PRODUCT

Аннотация. Представлено распределение температуры в полимерно-металлическом изделии от действия нагревателя постоянной мощности в виде диска, действующего на плоской поверхности покрытия. Приведено решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к одномерному распространению тепла в плоском полупространстве при реализации регулярного режима для двухслойной системы.

Ключевые слова: двухслойное изделие, краевая задача, математическая модель, неразрушающий контроль, температурное поле, тепловой метод, теплопроводность, численный расчет.

Abstract: The temperature distribution in the polymer-metal product caused by the action of a constant power heater in the form of a disk acting on a flat surface of the coating is presented. The solution of the boundary-value problem of non-stationary heat transfer in relation to one-dimensional heat propagation in a flat half-space is given for the realization of a regular regime for a two-layer system.

Keywords: two-layer product, the boundary value problem, the mathematical model, non-destructive testing, temperature field, thermal method, the thermal conductivity, numeric computation.

Тепловые методы неразрушающего контроля (НК) позволяют определять теплофизические свойства (ТФС) твердых материалов по отклику на тепловое воздействие от нагревателя определенной формы [1].

В данной работе численно исследована возможность применения математической модели одномерного распространения тепла в полимерно-металлическом двухслойном изделии для определения ТФС (или толщины) полимерного покрытия при выполнении условия локальной регуляризации тепловых потоков от действий круглого плоского источника тепла постоянной мощности [2].

На рисунке 1 представлена измерительная схема метода, согласно которой на поверхности двухслойного тела расположен нагреватель постоянной мощности в виде тонкого диска ($R_н$). Нагреватель встроен в подложку измерительного зонда (ИЗ). Теплофизические свойства теплоизоляционной подложки измерительного зонда – λ_3, c_3, ρ_3. Нагреватель подает в двухслойное тело тепловой поток q_1. Первый слой тела имеет ТФС – λ_1, c_1, ρ_1; теплофизические свойства второго (из сплава алюминия) слоя – λ_2, c_2, ρ_2. Толщины слоев: первого – h_1, второго – h_2 (рис. 1).

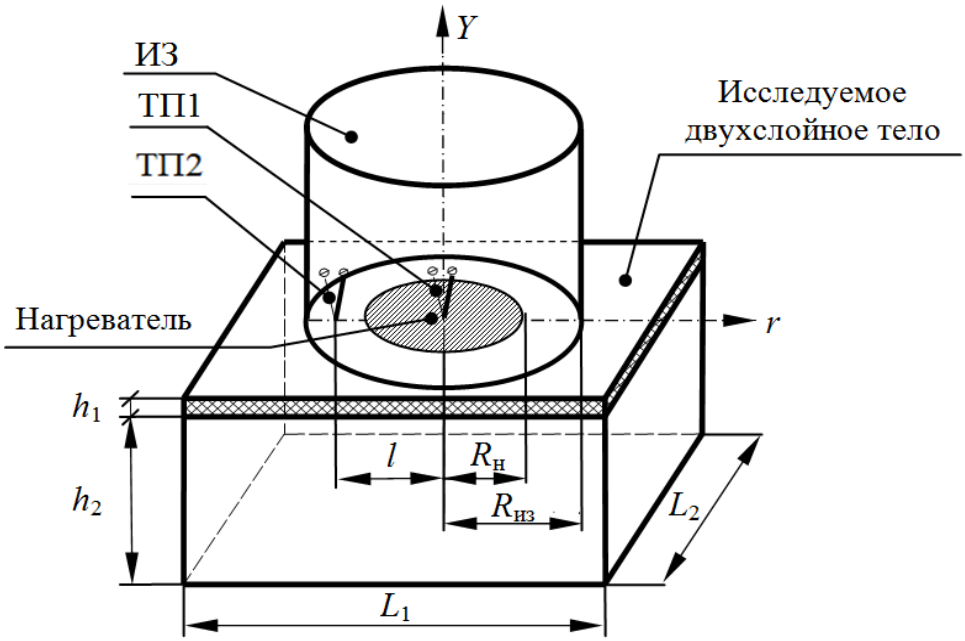


Рис. 1. Измерительная схема

Температура контактной поверхности подложки ИЗ в двух точках контроля измеряется с помощью термоэлектрических преобразователей (ТП1 и ТП2), расположенных на оси нагревателя и на расстоянии l от оси.

В момент времени, соответствующий началу активной стадии эксперимента, на нагреватель подают постоянную электрическую мощность, что позволяет с достаточной точностью задать постоянную во времени величину теплового потока q = const. В ходе эксперимента фиксируют термограммы – зависимости значений избыточной температуры (T) в точках контроля от времени (τ).

Рассматривая изделие как систему, состоящую из относительно тонкой полимерной пластины толщиной h_1, находящейся в идеальном тепловом контакте с металлическим полуограниченным телом, сформулирована краевая задача теплопроводности [2, 3]. Решение задачи теплопроводности (без учета теплоемкости нагревателя) имеет следующий вид:

$$T_1(0,\tau)=\frac{2q_1}{\sqrt{\pi}}\cdot\frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2}+\left(1-\frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right)\frac{q_1h_1}{\lambda_1}.$$

Данное выражение представляет собой линейную зависимость вида:

$$T_1(0,\tau)=b_1\sqrt{\tau}+b_0,$$

где $b_1=\dfrac{2q_1}{\sqrt{\pi}\varepsilon_2}$.

Так как первый слой объекта (рис. 1) низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный, т.е. $\lambda_1 << \lambda_2$, тогда $\varepsilon_1 << \varepsilon_2$.

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \cdot \frac{q_1 \cdot h_1}{\lambda_1} \approx \frac{q_1 \cdot h_1}{\lambda_1}. \text{ и } h_1 = \frac{\lambda_1 \cdot b_0}{q_1}.$$

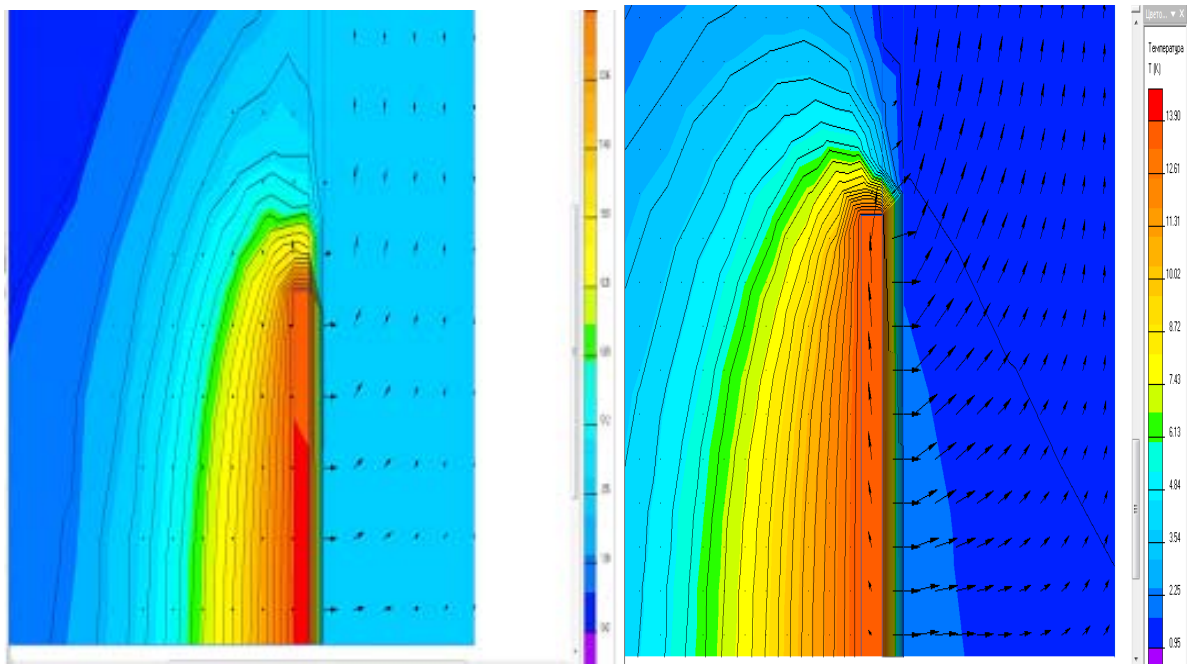
Зная теплопроводность материала полимерного покрытия λ_1, можно определить h_1. Если задана величина h_1, можно определить λ_1.

Исследование температурного поля в слое полимерного покрытия производилось численным моделированием по методу конечных элементов с помощью пакета программ Elcut Student [4].

Важны следующие аспекты применения предложенной математической модели распространения тепла в двухслойных объектах: начальное равномерное распределение температуры в объекте контроля; реализация одномерного распространения тепла в плоском полупространстве; наличие на термограмме температурно-временного участка, соответствующего локальной регуляризации тепловых потоков; соблюдение условия полуограниченности в тепловом отношении исследуемого объекта. Для графического представления и анализа полученных данных использовали пакет программ Microsoft Excel.

Визуализация температурных полей в покрытии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) показала, что в локальной области покрытия, расположенной вблизи оси нагревателя (около границы раздела полимер-нагреватель), на протяжении некоторого времени реализуется одномерное распределение тепла в плоском полупространстве (рис. 2).

Результаты (рис. 2) получены при следующих условиях моделирования: q = 4000 Вт/м^2; $R_н$ = 10 мм; время нагрева 60 с (*а*) и 300 с (*б*); $\Delta\tau$ = 1 с.



а) *б*)

Рис. 2. Температурное поле в подложке ИЗ, покрытии из ПТФЭ, в пластине из сплава алюминия на моменты времени 60 (*а*) и 300 (*б*) секунд

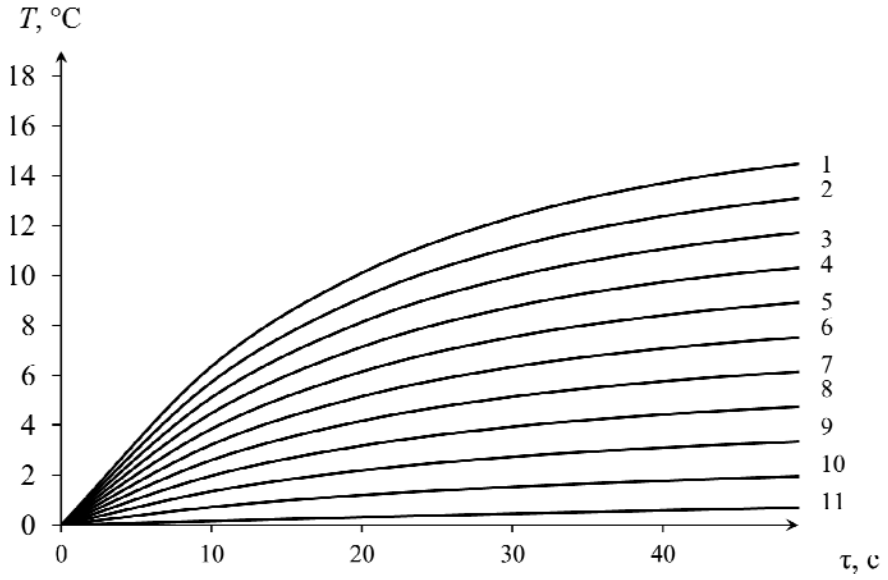


Рис. 3. Термограммы в точках контроля по толщине покрытия

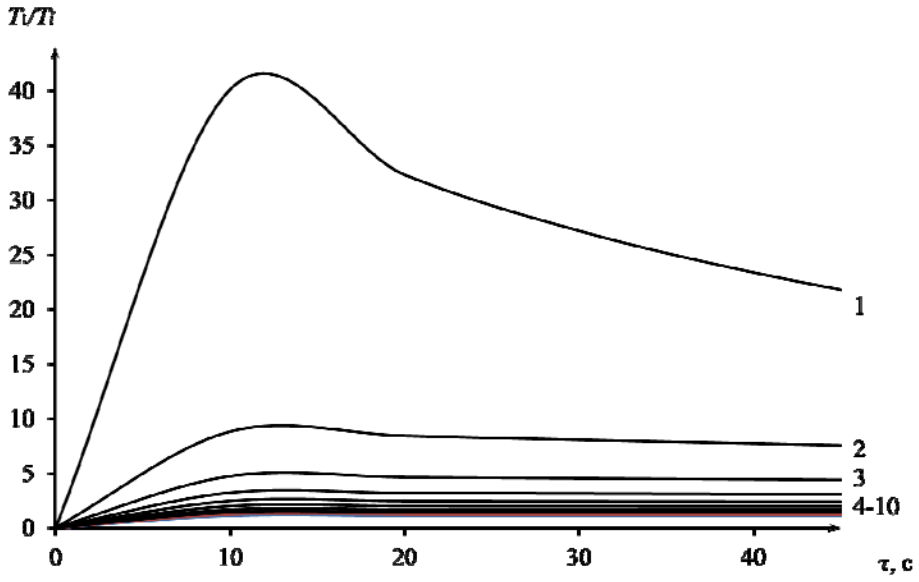


Рис. 4. Значения *T*1/*Ti* в точках контроля 1 – 10 во времени

На рисунке 3 представлены термограммы, полученные в точках контроля (в слое полимера на оси нагревателя) с координатой Y = 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,99 мм. На рисунке 4 представлены графики изменений значений отношения $T1/Ti$ в указанных выше точках контроля во времени с целью установления возможности реализации режима регуляризации тепловых потоков в исследуемой тепловой системе численным путем. Данные исследования (рис. 4) свидетельствуют о реализации режима регуляризации теплового режима на рабочем участке термограммы во временной области 10 – 16 с.

Таким образом, рассматриваемый метод НК реализует определение ТФС материалов (или толщины) тонких полимерных покрытий на металлических основаниях с применением предложенной математической модели по рабочим участкам термограмм,

соответствующим одномерному распространению тепла при соблюдении условия регуляризации тепловых потоков.

Методика определения рабочих участков термограмм предусматривает применение статистических критериев [1].

Список использованных источников

1. **Жуков, Н. П.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

2. **Моделирование** теплопереноса в методе неразрушающего контроля двухслойных материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов, А. О. Антонов // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2013. – Т. 19, № 3. – С. 506 – 511.

3. **Майникова, Н. Ф.** Моделирование теплопереноса применительно к неразрушающему контролю двухслойных объектов : в 2 т. Т. 1 / Н. Ф. Майникова, В. Д. Попов, Д. В. Трофимов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : II Международная конференция. – Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – Вып. 2. – С. 150 – 154.

4**. ELCUT:** Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР. – 2003. – 249 с.

References

1. **Zhukov, N. P.** Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchegokontrolya teplofizicheskikh svoistv materialov i izdelii / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova, // [The multimethodsand means of nondestructive kontrolya thermo-physical properties of materialsand products]. – Moscow : Mashinostroenie-1, 2004. – 288 p.

2. **Modelirovanie** teploperenosa v metode nerazrushayuwego kontrolya dvuxslojnyx materialov / N. P. Zhukov, N. F. Mainikova, I. V. Rogov, A. O. Antonov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2013. – T. 19, № 3. – S. 506 – 511.

3. **Mainikova, N. F.** Modelirovanie teploperenosa primenitelno k nerazruchayuwemu kontrolyu dvuxslojnyx obiektov : v 2 т. T. 1 / N. F. Mainikova, V. D. Popov, D. V. Trofimov // Virtualnoe modelirovanie, prototipirovanie i promichlenniy dizain : II Mezhdunarodnay konferensia. – Tambov : FGBOU VPO «TGTU», 2016. – Vyp. 2. – S. 150 – 154.

4. **Proizvodstvennyi** kooperativ TOR. ELCUT: Modelirovanie dvumernykh poleimetodom konechnykh elementov. Versiya 5.1. Rukovodstvo pol'zovatelya [Simulation of two-dimensional field using finite element method. Version 5.1. User Manual]. – St. Petersburg : Proizvodstvennyi kooperativ TOR. – 2003. – 249 p.

УДК 004.9

Наумов Э. О.,[1] Соколов М. В.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (89806) 713048, e-mail: neuh94@yandex.ru),
[2](Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Naumov E. O.,[1] Sokolov M. V.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (89806) 713048, e-mail: neuh94@yandex.ru),
[2](Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

SELECTION OF RATIONAL TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR PROCESSING OF PARTS FROM STAINLESS STEELS ON CNC LATHES

Аннотация. Проведено исследование обработки нержавеющих сталей на токарном станке с ЧПУ, были подобраны благоприятные режимы резания, подобран инструмент, проведен анализ СОЖ, построены графики влияния режимов резания на шероховатость поверхности и отклонения от номинальных размеров и сделаны выводы.

Ключевые слова: обработка нержавеющих сталей на токарных станках с ЧПУ.

Abstract. A study of the mechanical processing of stainless steels on a CNC lathe has been carried out; favorable cutting conditions have been selected; a tool has been selected; a coolant analysis has been carried out; graphs of the influence of cutting regimes on the surface roughness and deviations from the nominal size have been made; conclusions have been drawn.

Keywords: processing of stainless steels on CNC lathes.

Нержавеющую сталь обрабатывают уже более 100 лет, но до сих пор эта процедура сопряжена с технологическими сложностями. Из нержавейки выполняют множество деталей, постепенно вытесняющих углеродистую сталь, которая уже не выдерживает возрастающие нагрузки: для современных механизмов порог прочности углеродистых сталей слишком низок. Прочность и стойкость нержавейки, которая не меняет своих свойств при высокой температуре, давлении и воздействии агрессивных сред, влечет за собой сложность ее механической обработки.

Нержавеющая сталь обладает высокими антикоррозионными свойства.

Высокие антикоррозионные свойства обусловлены наличием в ней легирующих элементов на основе хрома. Нержавеющая сталь имеет низкий коэффициент обрабатываемости, который уменьшается в зависимости от увеличения легирующих элементов, таких как никель и титан.

Характеристики структурно фазовых состояний нержавеющих сталей. Аустенит: Самый распространенный вид нержавеющей стали с повышенными антикоррозионными свойствами за счет высокого содержания хрома и никеля. Имеет низкий коэф-

фициент обрабатываемости. Применяется в пищевой промышленности. Например: 12Х18Н10Т,08Х18Н10,03Хi8Н11.

Феррит: нержавеющая сталь, характеризующаяся высоким содержанием хрома и отсутствием никеля, что способствует улучшению его обрабатываемости. Например: 12Х17, AISI410,430,434

Мартенсит-феррит: нержавеющая сталь, которая поддается термообработке благодаря высокому содержанию углерода. Имеет пониженные антикоррозионные свойства. Применяется для изготовления деталей повышенной твердости. Например: AISI4420,432

Мартенсит: нержавеющая сталь на хромоникелевой основе. Обладает высокими антикоррозионными свойствами, повышенной механической прочностью и твердостью благодаря специальной термообработке. Например: AISI 17,15.

Аустенит-феррит: нержавеющая сталь, обладающая высокой жаростойкостью. Применяется в химически активных, высокотемпературных средах. Например: AISI 2304,2507.

Проблемой нержавеющих сталей являются их особенности и свойства, затрудняющие механическую обработку: самоупрочнение при деформации (наклеп); низкая теплопроводность (по сравнению с обычной сталью); высокая прочность (за счет наличия легирующих элементов); склонность к налипанию на поверхность резца (образование нароста); трудности со стружкодроблением (из-за высокой прочности); образование заусенцев при резании [1].

Главные проблемы при токарной обработке стали: деформационное упрочнение; удаление стружки; ресурс рабочего инструмента.

При токарной обработке изделий из нержавеющей стали широко используется охлаждение под высоким напором. Распыляется раствор непосредственно в место обработки. Попадая на горячую поверхность, жидкость испаряется и отбирает часть тепла. Поверхность охлаждается. Минус этого способа – большой расход охлаждающей жидкости. Но зато срок использования инструмента увеличивается в шесть раз.

Смазка подается изнутри резака под высоким давлением чтобы: быстро и заметно снизить температуру резака; убрать стружку подальше от резака, чтобы не ускорять его износ; раздробить стружку на небольшие частички, которые проще смыть из рабочей зоны.

Форма стружколома также очень важна. Геометрия его должна быть положительной, чтобы снизить образование тепла. Передний угол с положительным значением уменьшает самоупрочнение материала и появление наплыва на поверхности резака, устраняя главные причины повреждений во время токарной обработки стали.

Стружколом следует использовать только специализированный, для легированных сталей, хотя стружколомы обычно выпускают универсальными, для работы с самыми разными металлами. Производятся специальные стружколомы и резаки для чистовой, черновой и получистовой резки нержавейки. Они выдают наилучшие результаты и увеличивают производительность труда.

Аустенитный тип нержавейки наиболее склонен к самоупрочнению, что доставляет дополнительные сложности при любом виде его обработки. Чем сильнее упрочняется материал, тем быстрее изнашивается резак. Данная проблема менее выражена при использовании специальных режущих пластинок. Поверхности их изнашиваются дольше,

а рабочие кромки острее обычных. Острые режущие поверхности успевают обработать деталь до самоупрочнения стали и появления наплывов.

Самоупрочнение сокращает срок службы инструмента. Производители видят решение проблемы износа в оптимизации геометрии – более острой заточки кромок и использовании положительного переднего угла, а также в применении новых покрытий для работы на высоких скоростях и подачах [2].

Существует два вида специализированных режущих инструментов: с химически осажденным покрытием режущей кромки (CVD); с физически осажденным покрытием (PVD).

Толстые покрытия, нанесенные методом химического осаждения (CVD), повышают стойкость к износу и позволяют перейти к более высоким режимам резания, увеличивая тем самым производительность. В то же время такие покрытия сложнее поддаются заточке.

Покрытия, наносимые методом физического осаждения (PVD), используемые в основном для нержавеющих сталей аустенитного класса, имеют меньшую толщину, обеспечивая остроту кромки и гладкость поверхности. При этом режимы скорости и подачи ниже, и в связи с малой толщиной высока вероятность повреждения и быстрого износа инструмента.

Проблемы оптимизации технологии окончательной (чистовой) токарной обработки связаны с необходимостью обеспечения выполнения высоких требований к деталям, что естественно относится к износостойкости современного инструмента, к биению и шероховатости плоских, цилиндрических и конических обработанных поверхностей, а также к разработке оптимальной и технологически верной технологии обработки сложных поверхностей с криволинейными образующими.

Наиболее эффективным путем решения большей части этих технологических задач является теоретический анализ, практические рекомендации выбора рациональных режимов резания, износостойкости и своевременной коррекции на износ режущих инструментов, качество СОЖ, погрешность обработки и написание программ для станков, анализ полученных шероховатостей обработанных поверхностей.

Одной из основных задач по оптимизации технологии токарной обработки нержавеющих сталей на станках с ЧПУ, на мой взгляд, является выбор технологических параметров, определенных в процессе их исследования. Примером этих параметров являются: рациональная скорость вращения обработанной детали (обороты станка), глубины резания с учетом всех технологических возможностей станка и износостойкости инструмента к обрабатываемому материалу, площади обрабатываемой поверхности и времени резания, скорости подачи.

В условиях современного производства приоритетным направлением исследования являются быстрый и экономичный способ повышения производительности в изготовлении высокоточных, качественных и надежных изделий. В настоящее время данные методы в области обработки нержавеющей стали нуждаются в дальнейших и более прогрессивных исследованиях, поэтому данное исследование остается актуальным и сейчас. Данная работа после ее проведения будет способствовать усовершенствованию режущего инструмента и в будущем приведет к новым технологическим возможностям по скорости и качеству изготовления деталей из данного материала и решит вопрос растущей потребности в повышении скорости обработки [3, 4].

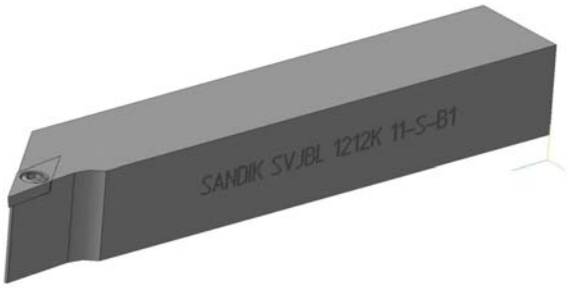


Рис. 1. 3-D модель выбранного режущего инструмента

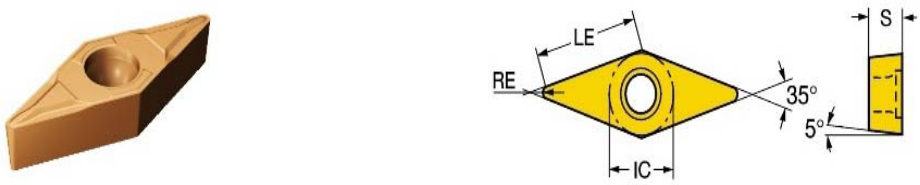


Рис. 2. Геометрические параметры режущей пластины

Для проведения исследования были выбраны следующие пункты:

1. Подбор заготовки для проведения эксперимента.
2. Подбор инструмента, удовлетворяющего требованиям нашей обработки (чистовое точение).
3. Расчет режимов резания.
4. Практическим методом проанализируем качество СОЖ (произведем замер концентрации).
5. Практическим методом подберем режимы резания.
6. По полученным данным построить графики.

В качестве исследования для чистовой обработки детали из материала 38ХМЮА пластину и державку выбираем от производителя Sandvik: державка SVJBL 1212K 11-S-B1; пластина VBMT 110301-MF 1125.

Рассмотрим геометрические параметры пластины (рис. 2) [5, 6].

IC – 7,525 мм; S – 3,785; RE – 0,1 мм

Произведем теоретический расчет режимов резания. Скорость резания возьмем рекомендуемую производителем, а именно $V = 100$ м/мин. Далее вычислим необходимые обороты вращения шпинделя:

$$n = \frac{V \cdot 1000}{\pi D},$$

где n – число оборотов шпинделя, V – скорость резания, π – константа равная 3,14. D – обрабатываемый диаметр, в нашем случае он равен 20 мм.

Подставив значения в формулу, получаем:

$$n = \frac{100 \cdot 1000}{3{,}14 \cdot 45} = 1592{,}36 \text{ об/мин.}$$

Следующим этапом исследования будет исследование качества СОЖ. Данное исследование будет заключаться в том, чтобы произвести замер концентрации СОЖ на станке, который в дальнейшем будет участвовать в исследовании.

Концентрация рабочей эмульсии является важным параметром, определяющим работоспособность СОЖ и влияющим на экономическую эффективность производства. Рекомендации по концентрации приводятся в листе описания продукта. Процент концентрации СОЖ зависит от тяжести выполняемой операции и обрабатываемого материала.

Для определения концентрации СОЖ в цеховых условиях применяют простой и портативный прибор – рефрактометр.

Рефрактометр – оптический прибор, измеряющий показатель преломления света в среде. Рефрактометрия, выполняющаяся с помощью рефрактометров, является одним из распространенных методов идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ.

Это идеальный инструмент для оперативной проверки концентрации СОЖ на отдельном станке.

Перед измерением проверяется тарировка с помощью технической воды, использованной для приготовления эмульсии, и контролируется выставление «0» с помощью винта корректора. Граница шкалы должна быть резкой. Если она размыта, это может быть показателем наличия посторонних масел или проблема стабильности эмульсии.

Истинное значение концентрации определяется расчетным путем: измеренное значение концентрации с помощью оптического рефрактометра Брикса или с помощью электронного рефрактометра умножается на коэффициент рефракции, полученные из листа технического описания продукта.

Допустимое значение от 6,5 до 8%. Концентрация ниже данного диапазона грозит тем, что будет недостаточный смазывающий эффект, что ведет к существенному снижению стойкости режущего инструмента и, следовательно, к ухудшению шероховатости поверхности, а концентрация выше – опасна для здоровья оператора обслуживающего станок.

Рис. 3. Рефрактометр

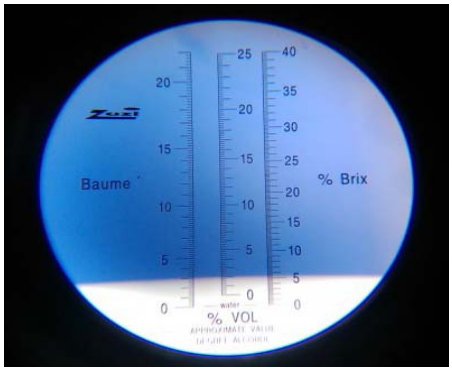


Рис. 4. Показания рефрактометра

Данные замера показывают, что по Бриксу у нас получается 5%. Затем мы полученное значение умножаем на коэффициент рефракции, который указан производителем СОЖ и равен величине 1,4.

$$5\% \times 1{,}4 = 7\%,$$

что является допустимым.

Настраиваем станок на обработку заготовки по расчетным данным. Далее замеряем шероховатость и отклонение от номинального размера. Вводим корректировки и повторяем проделанные действия заново. Все полученные данные заносим в табл. 1.

1. Результаты измерений качества изготовления детали при различных режимах обработки поверхности

№ п/п	Обороты вращения шпинделя, об/мин	Скорость обработки, мм/об	Шероховатость Ra, мкм	Отклонения от номинального размера, мм
1	1592,36	100	3,2	–0,1
2	1100	90	3,2	–0,1
3	800	80	2,5	–0,07
4	500	80	1,25	–0,01
5	600	100	1,6	–0,04

На рис. 5 – 7 показаны зависимости влияния скоростей резания и оборотов вращения шпинделя на шероховатость поверхности и отклонения номинальных размеров.

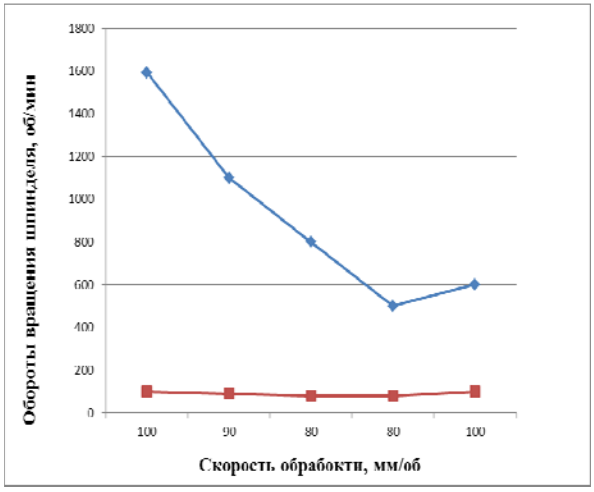


Рис. 5. Зависимость режимов резания

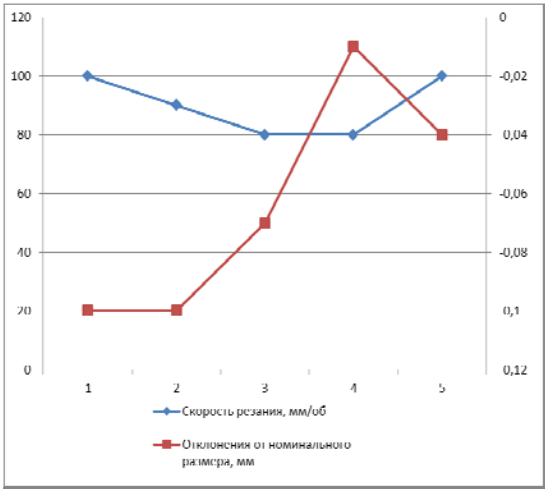


Рис. 6. Зависимость отклонения номинального размера от режимов резания

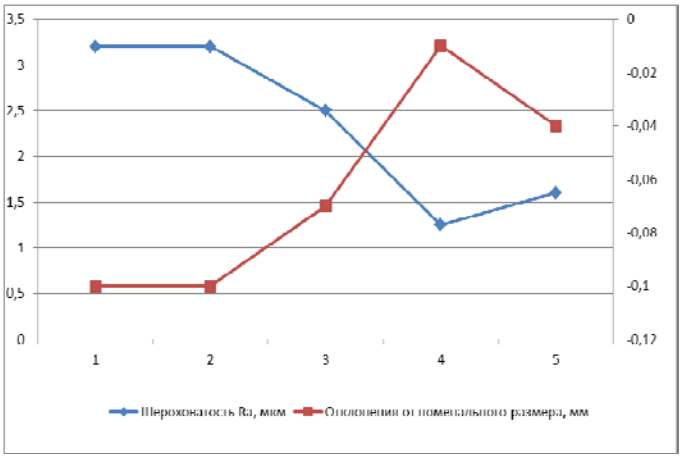


Рис. 7. Зависимость шероховатости от отклонения номинального размера

По данным графикам видно, что наилучшая частота обработки и наименьшие отклонения номинальных размеров возможны при минимальных оборотах вращения шпинделя и минимальных скоростей резания. При таких режимах резания становится возможным получать точные особо ответственные размеры и минимизировать наклеп на деталях, который в связи с вязкостью данных сталей доставляет много проблем. Также увеличивается стойкость инструмента и уменьшается количества брака вследствии выхода того из строя.

Список литературы

1. **Галимов, Э. Р.** Современные конструкционные материалы для машиностроения : учебное пособоие / Э. Р. Галимов, А. Л. Абдуллин. – СПб. : Издательство «Лань», 2018. – 268 с.

2. **Зубарев, Ю. М.** Современные инструментальные материалы : учебник.- 2-е изд., испр. и доп. / Ю. М. Зубарев. – СПб. : Издательство «Лань», 2014. – 304 с.

3. **Алтунин К. А.**, Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки / К. А. Алтунин., М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.

4. **Пестрецов, С. И.** Математическое моделирование процесса зенкерования и оптимизация геометрических параметров режущего инструмента в среде solidworks premium / С. И. Пестрецов, А. А. Родина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 3. – С. 37 – 41.

5. **Sandvik Coromant** [Электронный документ]. – URL : https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/pages/default.aspx (Дата обращения: 15.05.18).

6. **Mitsubishi** Materials European Market: [Электронный документ]. – URL : http://www.mitsubishicarbide.com/EU/ru/product/catalog/catalog.html (Дата обращения: 15.05.18).

References

1. **Galimov, E. R.** Sovremennye konstrukcionnye materialy dlya mashino-stroeniya : Uchebnoe posoboie / E. R. Galimov, A. L. Abdullin. – SPb. : Izdatelstvo «lan», 2018. – 268 s.

2. **Zubarev, U. M.** Sovremennye instrumentalnye materialy: Uchebnik.-2-e izd. ispr I dop. / U. M. Zubarev SPb.: Izdatelstvo «lan», 2014. – 304 s.

3. **Altunin, K. A.** Razrabotka sistemy podderzhki prinyatiya reshenij vybora rezhimnyh I konstruktivnyh-parametrov tokarnoj obrabotki / K. A. Altunin, M. V. Sokolov. – Tambov : Studiya pechati Pavla Zolotova. – 2016. – 132 s.

4. **Pestrecov, S. I.** Matematicheskoe modelirovanie processa zenkerovaniya I optimazaciya geometricheskih-pa-rametrov rezhushchego instrumenta v srede solidworks-premium / S. I. Pestrecov, A. A. Rodina // Voprosy sovremennoj nauki I praktiki. Universitet im. V. I Vernadskogo. – 2012. – № 3. – S. 37 – 41.

5. **Sandvik-Coromant** [Elektronnyj dokument]. – URL : https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/pages/default.aspx (Data obrashcheniya: 15-05-18).

6. **Mitsubishi** Materials European Market [Elektronnyj-dokument]. – URL : http://www.mitsubishicarbide.com/EU/ru/product/catalog/catalog.html (Data obrashcheniya: 15.05.18).

УДК 004.9

Харин Д. А.,[1] Соколов М. В.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. (89806) 747557, e-mail: dima68rus@mail.ru),
[2](Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Kharin D. A.,[1] Sokolov M. V.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
[1](Tel. (89806) 747557, e-mail: dima68rus@mail.ru),
[2](Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

THE CHOICE OF RATIONAL TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR PROCESSING OF PARTS FROM NON-FERROUS METALS ON CNC LATHES

Аннотация. В статье приводится описание исследований и оптимизации технологии обработки деталей металлов на токарных станках с ЧПУ в условиях производства.

Ключевые слова: стойкость инструмента, оптимизация, станки с ЧПУ, режущий инструмент.

Abstract. The article describes the research and optimization of the technology for processing metal parts on CNC lathes in industrical conditions.

Keywords: tool life, optimization, CNC machines, cutting tools.

В условиях современного мира большую роль в развитии мощи стран играет состояние вооружений и космической развитости. При производстве изделий для авиационной, космической и оборонной промышленности требуются легкие, высокоточные и хорошо отлаженные механизмы.

Чтобы обеспечить данные качества изготавливаемых изделий в большинстве случаев в качестве исходных материалов используют цветные металлы.

Яркими примерами цветных металлов являются алюминий, медь, латунь и вольфрам, а также бронза и нержавеющая сталь. Главное свойство этих цветных металлов: легкость обработки и высокая устойчивость к коррозии. Эти идеальные свойства хороши для систем электронного и электрического типа.

Одним из широко применяемых способов в обработке этих материалов является токарная обработка. Конечно же, уже давно на многих предприятиях в полную мощь работают станки с ЧПУ. Данные системы управления станком, хорошо зарекомендовали себя в промышленности: своей точностью, скоростью обработки, быстротой наладки и смены инструмента. Но даже эта высокоточная обработка требует исследований, хотя бы потому, что никогда не нужно останавливаться на достигнутом.

В связи с тем, что масса исходных заготовок существенно превышает массу готовых деталей, основной проблемой оптимизации технологий предварительной токарной

обработки, осуществляемой с целью удаления чернового слоя материала, является снижение ее трудоемкости за счет интенсивности процесса резания с учетом ограничений, связанных, главным образом, с износостойкостью режущих инструментов и режимов резания.

Проблемы оптимизации технологии окончательной (чистовой) токарной обработки связаны с необходимостью обеспечения выполнения высоких требований к деталям, что естественно относится к износостойкости современного инструмента, к биению и шероховатости плоских, цилиндрических и конических обработанных поверхностей, а также к разработке оптимальной и технологически верной технологии обработки сложных поверхностей с криволинейными образующими [1, 2].

Наиболее эффективным путем решения большей части этих технологических задач, является теоретический анализ, практические рекомендации выбора рациональных режимов резания, износостойкости и своевременной коррекции на износ режущих инструментов, качество СОЖ, погрешность обработки и написание программ для станков, анализ полученных шероховатостей обработанных поверхностей.

Одной из основных задач по оптимизации технологии токарной обработки цветных металлов на станках с ЧПУ, на мой взгляд, является выбор технологических параметров определенных в процессе их исследования. Примером этих параметров являются: рациональная скорость вращения обработанной детали (обороты станка), глубины резания с учетом всех технологических возможностей станка и износостойкости инструмента к обрабатываемому материалу, площади обрабатываемой поверхности и времени резания, скорости подачи.

В большинстве случаев обработки цветных металлов используются большие обороты станка, что конечно, ведет к сильному нагреву обрабатываемой детали и инструмента. Поэтому, большую роль при обработке и стойкости инструмента играет правильный выбор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). СОЖ играет большую роль в обработке, потому что охлаждает режущий инструмент и заготовку, облегчает процесс деформирования металла, и способствует частичному удалению из зоны резания стружки, увеличивает стойкость режущего инструмента, улучшает качество поверхностей после обработки, снижает силы резания и потребляемую мощность, а также играет роль временной защиты изделий и оборудования от коррозии.

Большую роль играет и правильно подобранный инструмент. Данная технологическая задача является самой важной в токарной обработке. Современные производители инструментов, которых на данный момент достаточно много, предоставляют широкий вид различных токарных инструментов, поэтому, имеет место быть и его правильный выбор. На различных станках инструмент различных производителей ведет себя по–разному. Исходя из практических анализов и математических расчетов, и конечно же, пробных измерений стойкости инструмента на реальных деталях из определенного материала на конкретном станке, можно определить и подобрать оптимальный инструмент той или иной фирмы, при этом выбор не заканчивается на выборе производителя, а продолжается, применимо ко всем параметрам режущего инструмента. Важную роль при выборе этих параметров играет радиус при вершине резца. Технолог, который будет подбирать инструмент, должен учитывать все требования к детали, представлять, каким нагрузкам он будет подвержен, и какие поверхности этим инструментом будут обрабатываться. Далее необходимо определиться, что будет приоритетным показате-

лем: качество обработки поверхности материала или количество съема материала за один проход, т.е. глубина резания. С учетом этого выбирается тип режущего инструмента по геометрическим параметрам и классифицирующим признакам. Ну и в конце необходимо определить, насколько важно соблюдение условия износостойкости резца и в течение какого времени она должна сохраняться.

Методы исследования далеко не новые, но они остаются действенными и сейчас. Проводя исследования в области стойкости инструмента, мы тем самым совершенствуем режущий инструмент, который в дальнейшем будет способен к более высоким нагрузкам. Исследования в области режимов резания помогут сократить время на обработку деталей, безусловно, с учетом современного инструмента. Данные исследования дают возможность получить и улучшить в условиях рыночной конкуренции экономически выгодное и развивающееся производство, имеющее возможность обеспечивать быстрое и качественное изготовление деталей, при оптимизации расходов на их изготовление, а также содержание и более долгую эксплуатацию и обслуживание высокоточных токарных станков с ЧПУ.

Исследование проводилось по следующим пунктам:

1. Для конкретной детали подобран необходимый режущий инструмент (токарный для тонкой чистовой обработки).

2. Произведем теоретический расчет режимов резания.

3. Практическим методом проанализируем качество СОЖ (произведем замер концентрации).

4. Практическим методом по теоретическим расчетам установим получаемую шероховатость.

5. Практическим методом изменим частоту вращения шпинделя, скорость резания и съем материала за один проход.

6. Полученные данные отобразим в виде графиков.

Выбор режущего инструмента и режимов резания [4, 5].

В качестве исследования для тонкой чистовой обработки алюминиевой детали из материала АМг6 пластину и державку выбираем от производителя Sandvik: державка SVJBL 1212K 11-S-B1; пластина VBMT 110301-MF 1125 (рис. 1, 2).

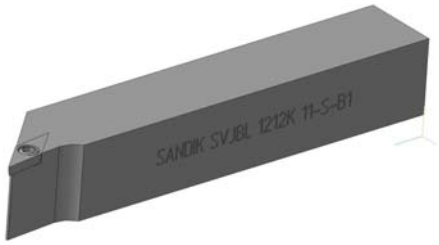


Рис. 1. 3-D модель выбранного режущего инструмента

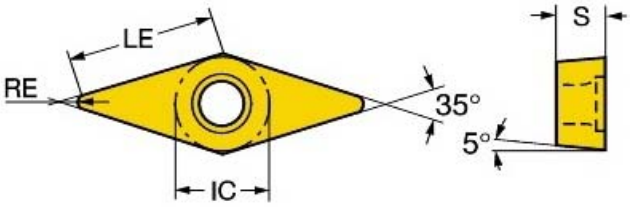


Рис. 2. Геометрические параметры резца

LE – 11 мм; IC – 7,525 мм; S – 3.785; RE – 0,1 мм

Произведем теоретический расчет режимов резания [3]. Скорость резания возьмем рекомендуемую производителем, а именно $S = 90$ м/мин; далее вычислим необходимые обороты вращения шпинделя.

$$n = \frac{V \cdot 1000}{\pi D},$$

где n – число оборотов шпинделя; V – скорость резания; π – константа, равная 3,14; D – обрабатываемый диаметр, в нашем случае он равен 45 мм.

Подставив значения в формулу, получаем n = 636,61 об/мин.

Тип обработки выбран как чистовое тонкое точение; припуск под чистовую обработку оставить 0,05 мм на сторону [6].

Следующим этапом исследования было исследование качества СОЖ. Данное исследование будет заключаться в том, чтобы произвести замер концентрации СОЖ на станке, который в дальнейшем будет участвовать в исследовании.

Концентрация рабочей эмульсии является важным параметром, определяющим работоспособность СОЖ, и влияющим на экономическую эффективность производства. Рекомендации по концентрации приводятся в листе описания продукта. Процент концентрации СОЖ зависит от тяжести выполняемой операции и обрабатываемого материала.

Для определения концентрации СОЖ в цеховых условиях применяют простой и портативный прибор – рефрактометр.

Рис. 3. Рефрактометр

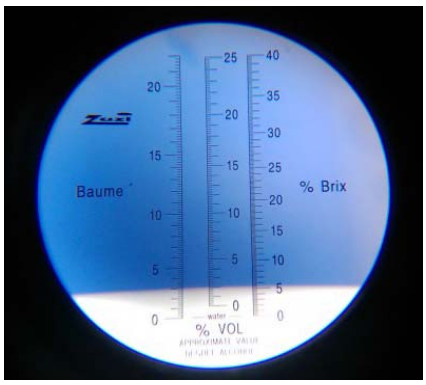


Рис. 4. Показания рефрактометра

Это идеальный инструмент для оперативной проверки концентрации СОЖ на отдельном станке.

Перед измерением проверяется тарировка с помощью технической воды, использованной для приготовления эмульсии, и контролируется выставление «0» с помощью винта корректора. Граница шкалы должна быть резкой. Если она размыта, это может быть показателем наличия посторонних масел или проблема стабильности эмульсии.

Истинное значение концентрации определяется расчетным путем: измеренное значение концентрации с помощью оптического рефрактометра Брикса или с помощью электронного рефрактометра умножается на коэффициент рефракции, полученные из листа технического описания продукта.

Допустимое значение от 6,5 до 8%. Концентрация ниже данного диапазона грозит тем, что будет недостаточный смазывающий эффект, что ведет к существенному снижению стойкости режущего инструмента и, следовательно, к ухудшению шероховато-

сти поверхности, а концентрация выше – опасна для здоровья оператора, обслуживающего станок.

Данные замера показывают, что по Бриксу у нас получается 5%. Затем мы полученное значение умножаем на коэффициент рефракции, который указан производителем СОЖ и равен величине 1,4

$$5\% \times 1{,}4 = 7\%$$

Данное значение является допустимым.

Далее расчетные данные по режимам резания и оборотам шпинделя подставляем в управляющую программу (рис. 5).

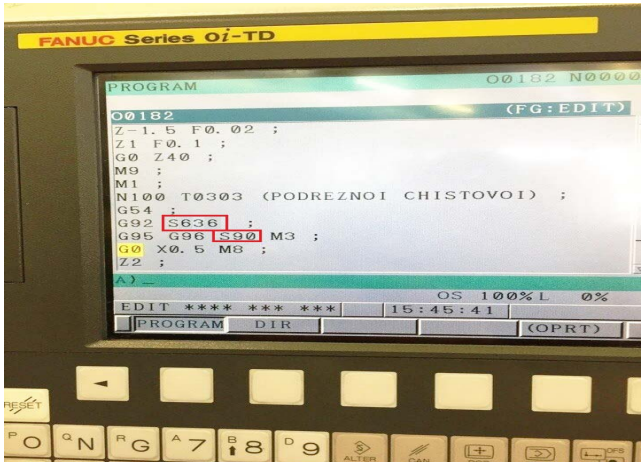


Рис. 5. Готовая управляющая программа в станке

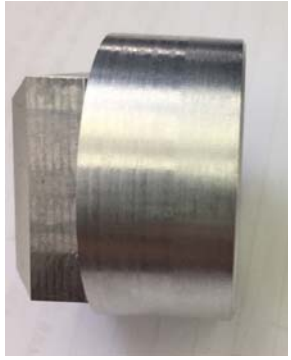


Рис. 6. Пример обработки детали на различных режимах резания

После каждой обработки производим замер диаметра детали и шероховатость поверхности. Полученные данные заносим в табл. 1.

1. Результаты измерений качества изготовления детали при различных режимах обработки поверхности

№ п/п	Обороты шпинделя об/мин	Скорость резания, мм/мин	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Отклонение от номинального размера, мм ∅45
1	636	90	2,5	–0,03
2	400	70	2,5	–0,04
3	850	90	1,25	–0,03
4	1200	110	0,63	–0,02
5	1500	90	1,25	–0,03

По табличным данным построены графики изменения режимов резания (рис. 7) и график зависимости шероховатости от отклонения (рис. 8) от номинального размера (рис. 9).

Рис. 7. Зависимость режимов резания

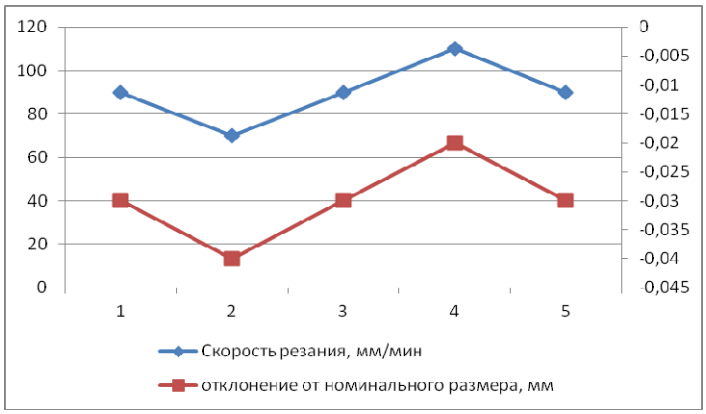


Рис. 8. Зависимость отклонения номинального размера от режимов резания

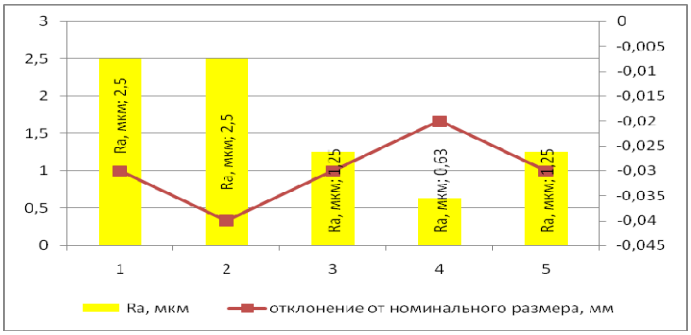


Рис. 9. Зависимость шероховатости от отклонения номинального размера

Из анализа зависимостей (рис. 7 – 9) можно сделать следующие выводы: при низких оборотах и малой скорости резания во время обработки на инструменте образуется наклеп, в связи с этим мы получаем наибольшее отклонение от номинального размера и высокое значение шероховатости, а при высоких оборотах и средней скорости резания равной 90 м/мин инструмент начинает дробить деталь, что не дает получить наилучший результат по шероховатости. Поэтому, оптимальными режимами резания являются обороты шпинделя, равные 1200 об/мин, скорость резания 110 м/мин, что обеспечивает образование сливной стружки, и, как следствие, приводит к наименьшему отклонению от номинального размера и заданной шероховатости обработанной поверхности.

Список использованных источников

1. **Пестрецов, С. И.** Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С. И. Пестрецов, К. А. Алтунин, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 221 с.

2. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения : монография / К. А. Алтунин. М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.

3. **Технологические процессы** машиностроительного производства : учебное пособие / В. А. Кузнецов, А. А. Черепахин, И. И. Колтунов, В. В. Пыжов, А. В. Шлыкова. – М. : Изд-во Форум : ИНФРА-М, 2009. – 261 с.

4. **Технология** обработки металлов резанием. Электронное обучение. – URL : https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/pages/default.aspx

5. **European** market. – URL : http://www.mitsubishicarbide.com/EU/ru/product/catalog/catalog.html

6. **Балакшин, Б. С.** Основы технологии машиностроения : учебник для машиностроит. вузов / Б. С. Балакшин. – 3-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 559 с.

References

1. **Pestrecov, S. I.** Koncepciya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proektiro vaniya processov rezaniya v tekhnologii mashinostroeniya / S. I. Pestrecov, K. A. Altunin, M. V. Sokolov, V. G Odnolko. – M. : Izdatelskij dom Spektr. – 2012. – 221 p.

2. **Altunin, K. A.** Koncepciya sozdaniya informacionnogo obespecheniya intellektu alnoj-sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya processov rezaniya v tekhnologii-mashinostroeniya : monografiya / K. A. Altunin. M. V. Sokolov. Tambov : Studiya pechati Pavla Zolotova, 2015. – 112 p.

3. **Tekhnologicheskie processy** mashinostroitelnogo proizvodstva : uchebnoe posobie / V. A. Kuznecov, A. A. Cherepahin, I. I. Koltunov, V. V. Pyzhov, A. V. Shlykova. – M. : Izdatelstvo Forum: Infra-M, 2009. – 261 p.

4. **Технология** обработки металлов резанием. Электронное обучение. – URL : https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/pages/default.aspx

5. **European** market. – URL : http://www.mitsubishicarbide.com/EU/ru/product/catalog/catalog.html

6. **Balakshin, B. S.** Osnovy tekhnologii mashinostroeniya : ucheb. dlya mashinostroit. vuzov / B. S. Balakshin. – 3-e izd. dop. – M. : Mashinostroenie, 1969. – 559 p.

УДК 621.32

Штрак А. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89204842499, e-mail: shtrak88@mail.ru)

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕНИЯ В DIALUX

Shtrak A. V.
[1] Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89204842499, e-mail: shtrak88@mail.ru)

USING DIALUX FOR LIGHT CALCULATION

Аннотация: В работе приводится пример расчета освещения механического цеха. Представлена 3D-визуализация модели освещенности.
Ключевые слова: DIALux, расчет освещения, моделирование освещения.

Abstract: The paper describes the example of lighting design of a mechanical shop. The 3D visualization of the lighting model is presented.
Keywords: DIALux, lighting design, lighting modeling.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) нашли широкое применение в настоящее время [1]. Они позволяют значительно сократить время на разработку проектной документации и повысить при этом качество готовых проектов [2]. Для выполнения светотехнических расчетов освещения при проектировании систем электроснабжения различных объектов, помещений, открытых площадок, автомобильных дорог, спортивных сооружений, аварийного освещения проектировщиками широко используется САПР DIALux, разработанная специально для дизайна и расчета освещения.

DIALux-программа для планирования и дизайна освещения, разрабатываемая с 1994 года DIAL GmbH – Немецким Институтом Прикладной Светотехники (Deutche Institut für Angewandte Lichttechnik). Она распространяется бесплатно и может использовать данные светильников любых изготовителей. DIALux – одна из самых эффективных программ для расчета освещения на рынке программного обеспечения. Она учитывает все современные требования к дизайну и расчету освещения [3].

DIALux поддерживает международные и национальные стандарты европейских стран. Разработка системы финансируется всемирно известными компаниями-производителями светотехнической продукции – OSRAM, Philips, WAGO и т.д. Для продвижения своей продукции на рынке данные компании дополнительно разрабатывают каталоги светильников, которые доступны для загрузки через Интернет. После заключения в 2007 г. договора между российскими компаниями ОАО «Световые технологии» и ОАО «Ардатовский светотехнический завод» и разработчиками DIALux были созданы собственные базы данных светильников, что позволило использовать DIALux при проектировании осветительных установок на основе отечественного светотехнического оборудования.

К основным возможностям компьютерного проектирования осветительных установок в программном комплексе DIALux относятся: освещение внутри помещений и дизайн интерьера; наружное освещение; уличное освещение, аварийное освещение, дневной свет, сцены освещения, энергетическая оценка.

Профессиональный проектировщик может решить с помощью DIALux любую задачу. Рассчитать в полном соответствии со стандартами освещение как внутренних, так и наружных сцен, освещение улиц. Для начала расчета и проектирования требуются исходные данные, такие как размеры цеха, коэффициенты отражения потолка, стен и пола, расположение внутренних объектов, таких как мебель, оборудование и пр. [4]. Светотехнический расчет позволяет определить величину нормируемой освещенности на рабочей поверхности в соответствии с российскими нормативными документами.

Результатами компьютерных фотометрических расчетов являются: типы, количество и места размещения/нацеливания световых приборов; установленная мощность; распределение нормируемых светотехнических величин (освещенность, яркость и др.); спецификация осветительного оборудования. Одними из самых востребованных результатов расчета являются графическое изображение распределения освещенности по рабочей поверхности и общий трехмерный вид освещенного помещения. Кроме того, можно получить изолинии постоянной освещенности, таблицу и график освещенностей, ведомость светильников и их паспортные данные [5].

Например, для цеха длинной 45 метров и шириной 30 метров, высота цеха 5 метров, программа помогает выбрать нам оптимальные светильники и их количество, а также схему освещенности (рис 1).

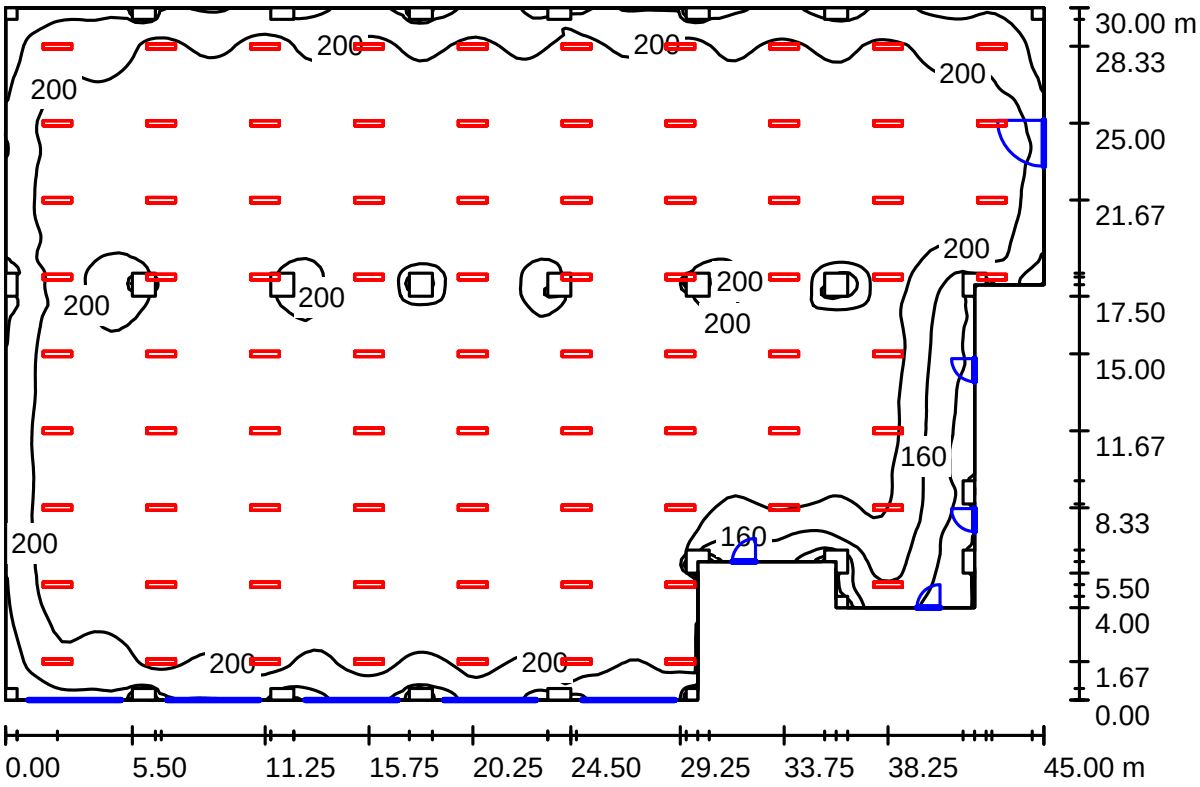


Рис. 1. Схема освещенности

Для эффективной работы осветительной установки регулярное техническое содержание – обязательное условие, чтобы поддерживать в допустимых границах вызванное старением ослабление светового потока на установке. Все эти параметры зависит от правильно подобранных и расположенных светильников рис. 2.

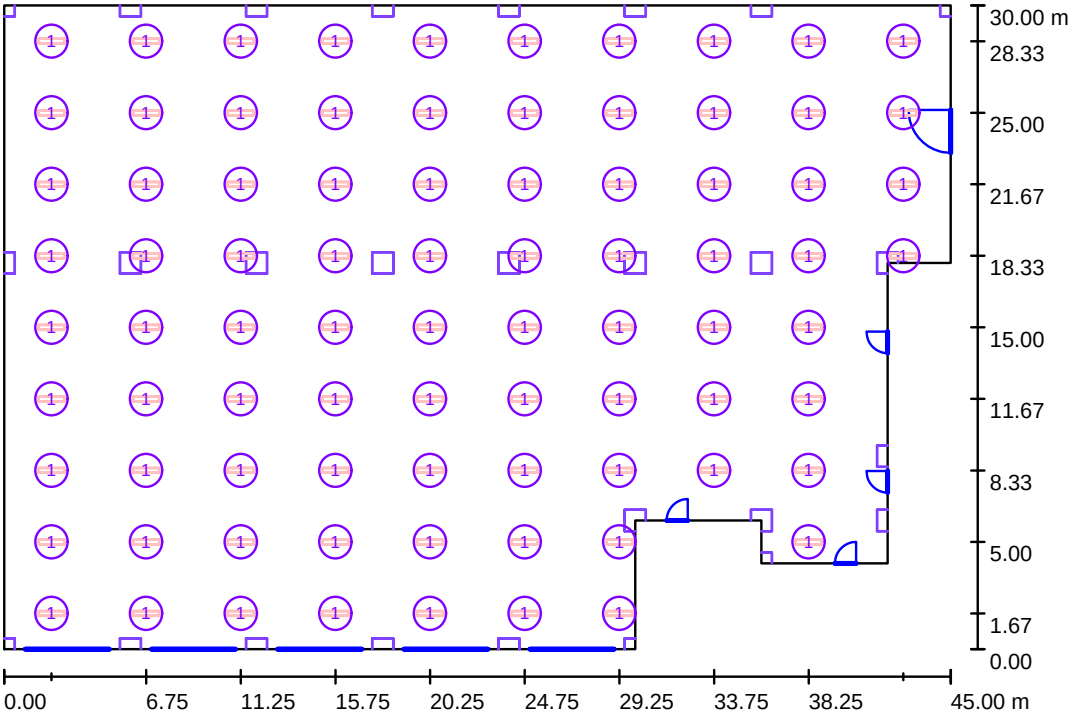


Рис. 2. Расположение светильников

В таблице 1 представлены минимальные и максимальные коэффициенты освещенности.

Таблица 1

Поверхность	ρ [%]	E_{cp} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_{cp}
Рабочая плоскость	/	216	71	256	0.33
Полы	20	210	83	245	0.39
Потолок	73	49	34	128	0.69
Стенки (23)	64	105	33	1665	/

Оговоренные в EN 12464 минимальные значения освещенности – это инвентарные значения, т.е. они основаны на новых данных (при инсталляции) и задаваемом техническом содержании. Естественно, то же относится и к рассчитанным DIALux значениям, и достичь можно их лишь если последовательно осуществлять исходный план содержания. Программа позволяет видеть границы освещенности (рис. 3).

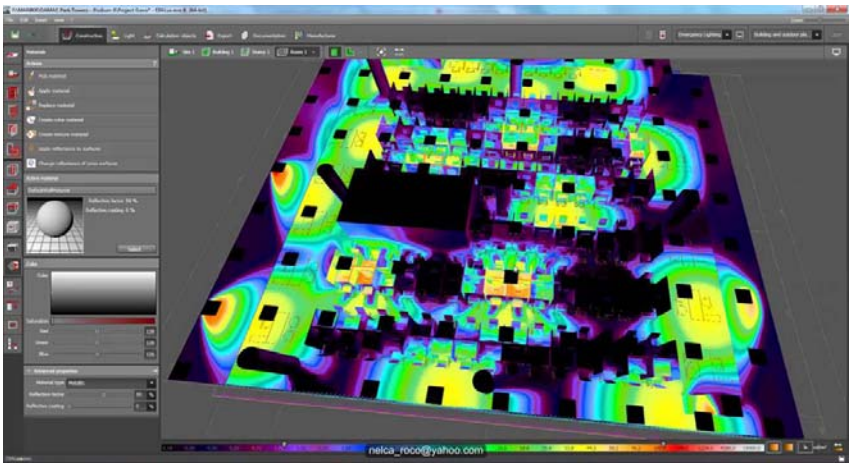


Рис. 3. Граница освещенности

Из полученных результатов видно, что расчет с помощью программы более точен, так как позволяет учесть геометрию помещения, наличие элементов помещения (колонны, окна, двери). Программа использует коэффициенты отражения различных материалов и это позволяет брать не усредненные значения, а индивидуальные; программа учитывает также коэффициент технического содержания, который значительно влияет на конечное число светильников. На промежуточных этапах расчета программа предлагает несколько вариантов расположения светильников и показывает их расположение, что значительно облегчает выбор конечного варианта. В данном случае видно, что учет дополнительных параметров привел к тому, что число светильников, полученных при расчете с помощью программы, меньше, чем «ручным методом», светильники расположены более равномерно, а, следовательно, и освещенность помещения более равномерная. Более равномерное расположение светильников и их меньшее число привели к тому, что сечение проводников уменьшилось. После окончания расчета программа предлагает подробный план проектируемого помещения, а также 3D-визуализацию (рис. 4) освещаемого объекта с графическим и цветовым распределением света по заданным поверхностям. При необходимости программа позволяет в подробнейших деталях воспроизвести интерьер помещения.

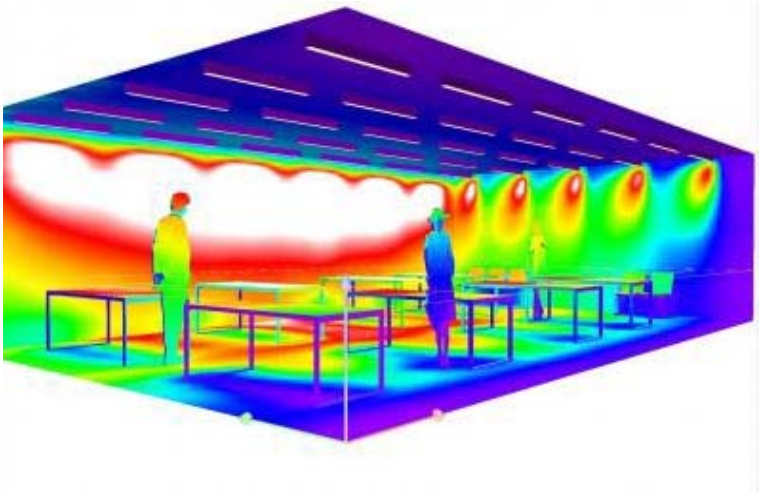


Рис. 4. 3D-модель освещенности

Список использованных источников

1. **Карпушкин, С. В.** Система выбора аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С. В. Карпушкин, А. Б. Борисенко, М. Н. Краснянский // Информационные технологии. – 2004. – № 10. – С. 14 – 19.

2. **Борисенко, А. Б.** Система автоматизированных тепловых расчетов теплообменного оборудования / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин, И. Е. Зимнухова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 54 – 58.

3. **Пионкевич, В. А.** Анализ эффективности применения комплекса DIALux для расчета освещенности производственных помещений / В. А. Пионкевич // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 11(130). – С. 114 – 122.

4. **Пионкевич, В. А.** Разработка и исследование модели внутреннего освещения помещения в программном комплексе DIALux / В. А. Пионкевич // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 1. – С. 85 – 91.

5. **Dialux** – расчет и проектирование освещения [Электронный ресурс]. – 2018. – URL : http://www.dialux-help.ru/

References

1. **Karpushkin, S. V.**, Borisenko A. B., Krasnyansky M. N. System for Choice of Hardware Configuration to Multi-Assortment Chemical Plants // Information technologies. – 2004. – № 10. – P. 14 – 19.

2. **Borisenko, A. B.**, Karpushkin S. V., Zimnukhova I. E. System of computerized heat calculations for heat transfer equipment // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. – V. 16, № 1. – P. 54 – 58.

3. **Pionkevich, V. A.** Analysis of DIALux application efficiency for production area illumination calculation // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2017. – V. 21, № 11(130). – P. 114 – 122.

4. **Pionkevich, V. A.** Development and study of the indoor lighting model in DIALux software // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2016. – № 1. – P. 85 – 91.

5. **Dialux** – lighting design calculations [Electronic resource]. – 2018. – URL : http://www.dialux-help.ru/

УДК 004.942

Иванова О. Г., Аль-Матари Н. А., Саид Б. М. Г.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)631358, e-mail: olgaotd@ yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА С ЗАДАННЫМИ СТАТИСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ivanova O. G., Al-Matari N. A. H., Saeed B. M. G.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)631358, e-mail: olgaotd@ yandex.ru)

MATHEMATICAL MODELING OF A RANDOM PROCESS WITH GIVEN STATIC CHARACTERISTICS

Аннотация. Рассматривается математическая модель случайного процесса с заданной автокорреляционной функцией, которая может быть использована для моделирования на ЭВМ сигналов от естественных и искусственных источников помех.

Ключевые слова: математические модели, случайные процессы, естественные и искусственные источники помех.

Abstract. This article considers a mathematical model of a random process with given autocorrelation function, which could be used for computer modeling of signals from natural and artificial sources of noise.

Keywords: mathematical models, random processes, natural and artificial sources of noise.

Реальные случайные процессы обычно представляют собой непрерывную функцию, зависящую от времени. Для математического моделирования таких процессов на ЭВМ целесообразно представлять их в виде последовательностей случайных чисел, следующих через определенный интервал времени, называемый интервалом дискретизации. Так же возникает необходимость в переопределении вероятностных (статистических) характеристик случайных процессов, вследствие его представления последовательностью случайных чисел.

Применяя гипотезу эргодичности стационарных случайных процессов, заменим осреднение по времени осреднением по реализациям случайного процесса.

По определению автокорреляционная функция (АКФ) записывается в виде выражения [1]:

$$R(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t) y(t+\tau) dt \,, \qquad (1)$$

где T – длина реализации случайного процесса.

Статистические характеристики псевдослучайного процесса определяются так же как для непрерывного процесса, но в формулах от интегрирования переходят к суммированию. Для последовательности случайных чисел, образующих псевдослучайный процесс, можно рассчитать значения автокорреляционной функции такого процесса. Только теперь АКФ будет дискретной функцией, а не непрерывной

$$R(i) = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^{N} Y(j)Y(j+i), \tag{2}$$

где $i = 0, 1, 2, \ldots, N$; N – количество интервалов дискретизации.

Для того, чтобы получить реализацию случайного процесса с заданной АКФ необходимо задать некоторую связь нового значения случайного процесса с предыдущими. Так как при моделировании непрерывного случайного процесса на ЭВМ мы заменяем его последовательностью чисел, то необходимо рассчитывать каждый новый элемент последовательности, используя некоторое количество предыдущих значений последовательности (эффект «памяти» случайного процесса, определяемого значением средневзвешенного числа предыдущих значений – m).

В данной работе для расчета значений последовательности случайных чисел (для синтеза псевдослучайного процесса с заданными статистическими характеристиками) используется формула (3).

$$Y(n) = \frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^{m} Y(n-i) + k \times z, \tag{3}$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$; $m = var$; $k = var$; $z = RND(0, 1)$.

В математической модели псевдослучайного процесса параметры k и m определяют значениями интервала корреляции АКФ. Для каждого следующего интервала дискретизации к полученному значению добавляется случайное значение z, определяемое стандартным генератором случайных чисел с равномерным законом распределения вероятностей на отрезке [–1, 1], увеличенное в $\boldsymbol{k}$ раз, для получения возможности изменения дисперсии случайного процесса.

В целях обеспечения стационарности случайного процесса при больших значениях $\boldsymbol{N}$ производится дополнительное преобразование рассчитанных значений $Y(n)$ в соответствии с алгоритмом расчета последовательности случайных чисел, структурная схема которого представлена на рис. 1.

В целях устранения тренда для обеспечения стационарности случайного процесса при больших значениях $\boldsymbol{N}$ производится дополнительное преобразование рассчитанных значений $Y(n)$ в соответствии с алгоритмом расчета последовательности случайных чисел.

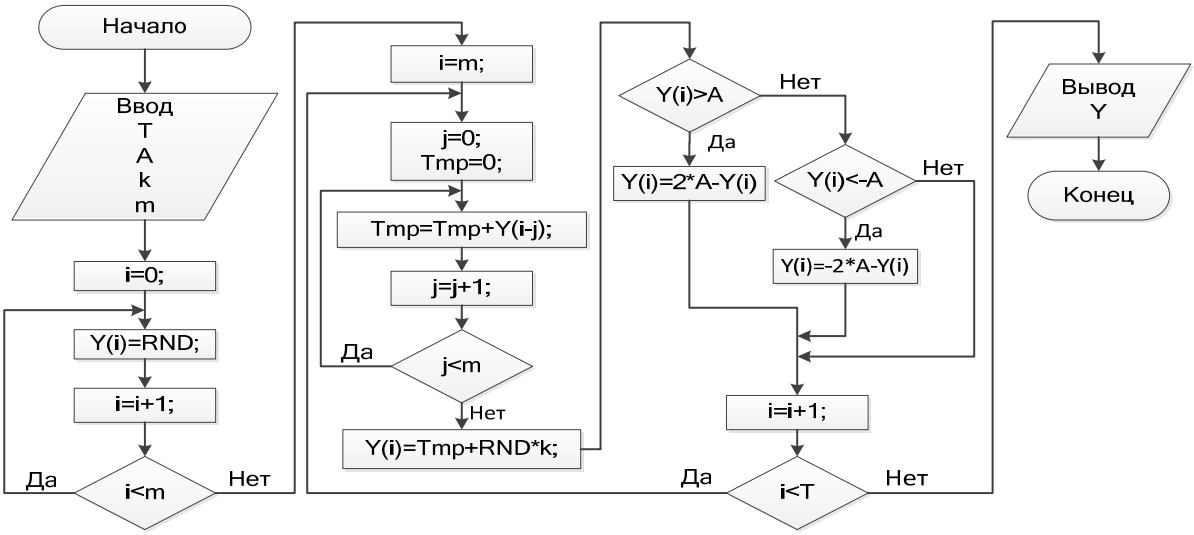


Рис. 1. Структурная схема алгоритма формирования реализации случайного процесса с заданной АКФ

Для расчета автокорреляционной функции использовалась формула (2). В работе представлен пример автокорреляционной функции сгенерированного псевдослучайного процесса для различных значений k.

Проведено исследование зависимости интервала корреляции от параметров математической модели случайного процесса.

Разработанная математическая модель случайного процесса позволяет получать реализацию случайного процесса с заданной автокорреляционной функцией со статистическими характеристиками, зависящими от задаваемых значений параметров A, k, m, T математической модели случайного процесса.

УДК 621.315.592

Лоскутова А. Д.,[1] Королева И. Л.[2]
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
[1](Тел. +79537182644, e-mail: anya.loskutova.94@mail.ru),
[2](Тел. +79158857227, e-mail:korolevanpal@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЕВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ

Loskutova A. D.,[1] Koroleva I. L.[2]
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. +79537182644, e-mail: anya.loskutova.94@mail.ru),
(Тел. +79158857227, e-mail:korolevanpal@yandex.ru)

MODELING OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN A SEMICONDUCTOR FIELD STRUCTURE

Аннотация. В работе исследуются электрофизические процессы, происходящие в полупроводниковой полевой структуре. Структура имеет три слоя: монокристаллический кремний, оксид кремния и алюминиевая тонкая пленка. Слои оксида кремния и алюминия имеют размеры от сотых до десятых долей микрометра. Такая конструкция перспективна при создании первичных измерительных преобразователей (ПИП) температуры и теплового потока [1]. При проектировании необходимо решить следующие задачи: определение зависимости величины тока в полупроводнике от потенциала на затворе (алюминиевом пленочном электроде); от разности потенциалов в полупроводнике; от конструктивных (толщины слоев) параметров; от топологии структуры (длина и ширина канала).

Ключевые слова: моделирование, полупроводник, математическая модель, термочувствительный элемент, полевая структура.

Abstract. The paper investigates the electrophysical processes occurring in a semiconductor field structure. The structure has three layers: monocrystalline silicon, silicon oxide and aluminum thin film. Layers of silicon and aluminum oxide have sizes from hundredths to tenths of a micrometer. This design is promising when creating primary temperature and heat flux transducers [1]. In the design it is necessary to solve the following problems: determining the dependence of the current in the semiconductor on the potential on the gate (aluminum film electrode); from the potential difference in the semiconductor; from the design (layer thickness) parameters; from the topology of the structure (length and width of the channel).

Keywords: modeling, semi-conductor, mathematical model, thermo-sensitive element, field structure.

Распределение электрических полей в полевой структуре исследовалось с помощью электронного микроскопа [2].

После проведения математических преобразований, описывающих электрофизические процессы, на которые влияет температура, ток в полупроводниковой подложке описывается следующим математическим выражением [3]

$$I_D = \frac{Z}{L} V_{SD} \mu_n \left| \left[-V_G + \left(V_D + \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{BT^{3/2} \exp(-E_{G0}/2kT)} \right) \right] \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiO_2}}{d} \right|.$$

По приведенной формуле рассчитаны зависимости тока через полупроводниковую подложку от перечисленных выше параметров и построены трехмерные графические представления.

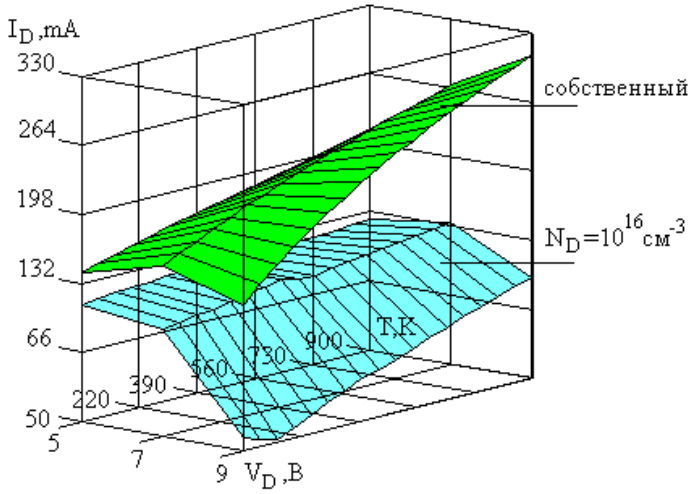


Рис. 1. Зависимость тока I_D от температуры и разности потенциалов в полупроводнике V_D для преобразователей, сформированных на собственном кремнии и на легированном с концентрацией донорной примеси $N_D = 10^{16}$ см$^{-3}$

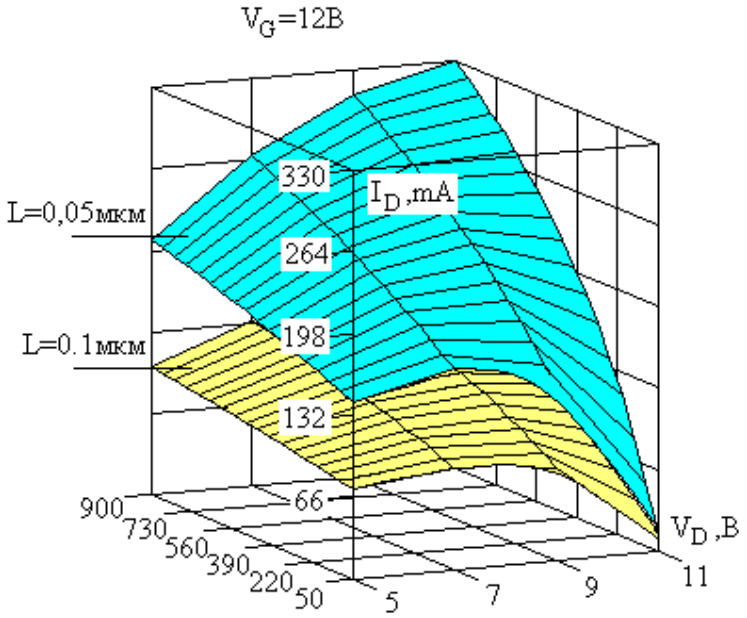


Рис. 2. Графики функции $I_D = f(T, V_D)$ для двух значений длины канала: 0,05 мкм и 0,1 мкм при напряжении $V_G = 12$ В

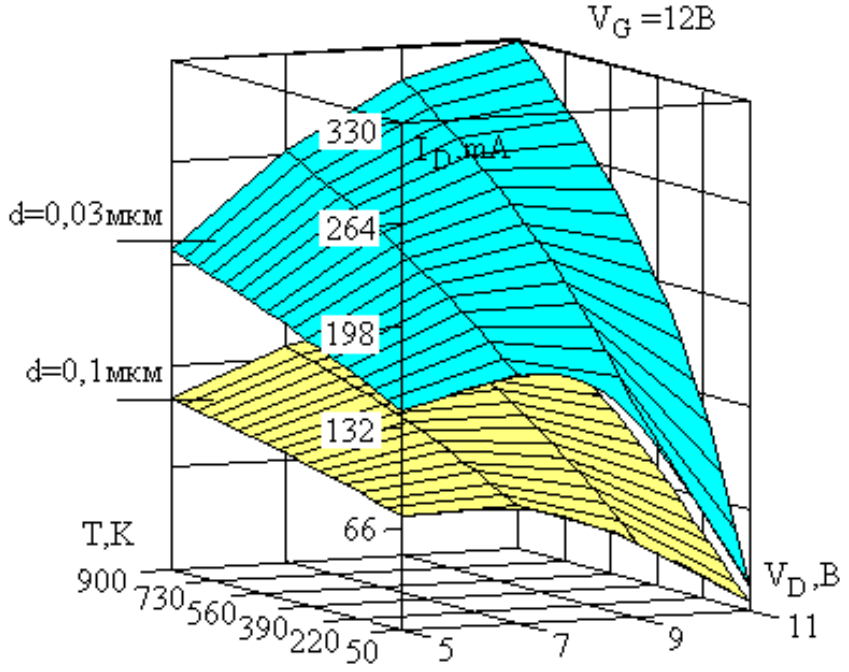


Рис. 3. Графики функции $I_D = f(T, V_D)$ для двух значений толщины диэлектрика: 0,03 мкм и 0,1 мкм при напряжении $V_G = 12$ В

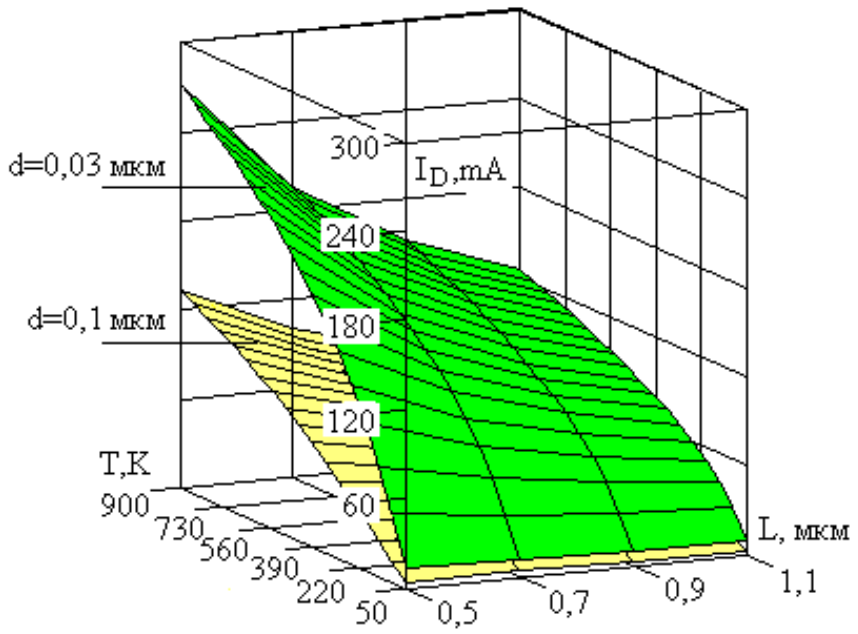


Рис. 4. Графики функции $I_D = f(T, L)$ для двух значений толщины подзатворного диэлектрика: 0,03 мкм и 0,1 мкм

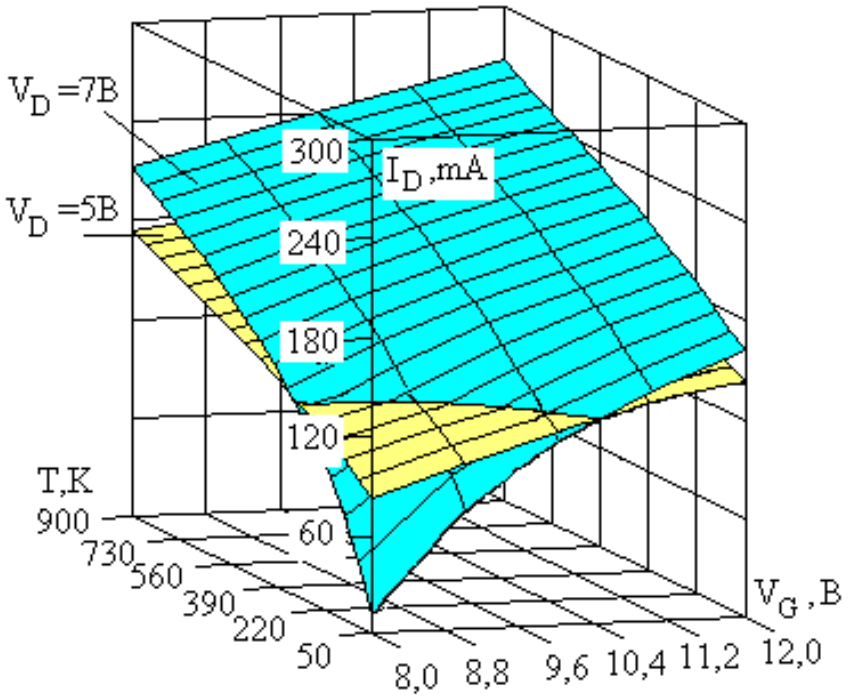


Рис. 5. Графики функции $I_D = f(T, V_G)$ для двух значений напряжения на стоке: 7 В и 5 В

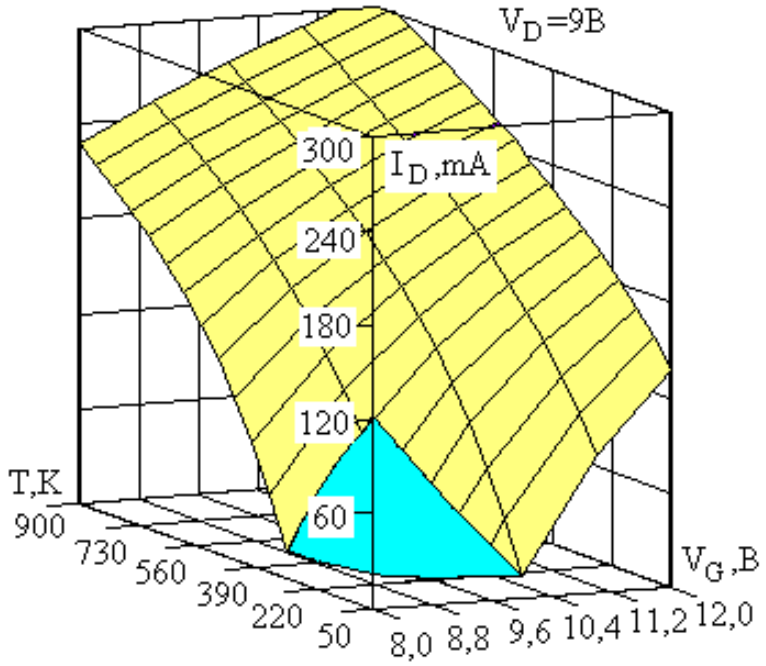


Рис. 6. График функции $I_D = f(T, V_G)$ для напряжения на стоковом электроде 9 В

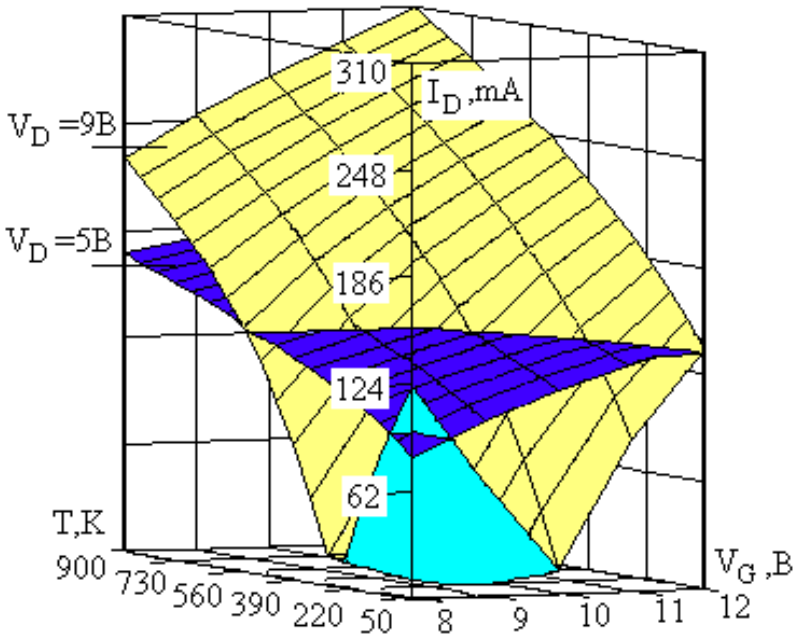


Рис. 7. Графики функции $I_D = f(T, V_G)$ для двух значений разности потенциалов в полупроводниковой подложке: 9 В и 5 В

Выводы:

1. Построена математическая модель, описывающая физические процессы, происходящие в полупроводниковой структуре разрабатываемого ТЧЭ под действием температуры, которая учитывает влияние физико-топологических, электрических и конструкторско-топологических параметров на выходную токовую характеристику.

2. Модель дает возможность проведения машинного эксперимента по установлению взаимосвязей между параметрами структуры и ее выходной характеристики, что является основой для создания методики проектирования полупроводниковых интегральных ТЧЭ.

Список использованных источников

1. **Брусенцов, Ю. А.** Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. П. Королев, А. В. Озаренко // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2006. – Т. 12, № 1 – С. 122 – 128.

2. **Korolev, A. P.** A methodology for investigating short-range fields of cluster nanostructures / A. P. Korolev, M. V. Makarchuk, M. N. Dutov, A. D. Loskutova / AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 11. Сер. «Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2017: Proceedings of the 11th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures». – 2017. – 030009 с.

3. **Королев, А. П.** Размерное квантование в подзатворном слое полевой полупроводниковой структуры / А. П. Королев, В. А. Ершов // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2016. – Т. 22, № 1 – С. 108 – 113.

References

1. **Brusencov, Yu. A.** Issledovanie ehlektrofizicheskih processov v polevyh poluprovodnikovyh strukturah dlya izmereniya teplofizicheskih harakteristik / Yu. A. Brusencov, A. P. Korolev, A. V. Ozarenko // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2006. – T. 12, № 1 – S. 122 – 128.

2. **Korolev, A. P.** A methodology for investigating short-range fields of cluster nanostructures / A. P. Korolev, M. V. Makarchuk, M. N. Dutov, A. D. Loskutova / AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 11. Ser. «Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2017: Proceedings of the 11th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures». – 2017. – 030009 s.

3. **Korolev, A. P.** Razmernoe kvantovanie v podzatvornom sloe polevoj poluprovodnikovoj struktury / A. P. Korolev, V. A. Ershov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2016. – T. 22, № 1 – S. 108 – 113.

УДК621.516

Сычев М. В., Родионов Ю. В., Никитин Д. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)63-04-59, e-mail: dmitryndv@gmail.com)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Sychev M. V., Rodionov Yu. V., Nikitin D. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov

MAIN DIRECTIONS IN THE DESIGN OF ENERGY EFFICIENT LIQUID-RING VACUUM PUMPS

Аннотация. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы (ЖВН) нашли широкое применение в различных отраслях промышленного производства. Несмотря на низкий КПД, порядка 0,5, ЖВН незаменимы в процессах откачки газа, содержащего пары, капельную жидкость, инородные и абразивные частицы. Основной задачей проектирования эффективных ЖВН является создание конструкций с заданными эксплуатационными характеристиками (производительностью, величиной создаваемого вакуума), обусловленными требованиями технологических процессов. Вместе с тем указанные характеристики должны быть получены при минимальных энергетических и эксплуатационных затратах. Приведены варианты технических решений в модернизированной конструкции ЖВН с вращающимся корпусом и механизмом регулирования проходного сечения нагнетательного окна.

Ключевые слова: жидкостнокольцевой вакуумный насос, трение жидкости, вращающийся корпус, нагнетательное окно, регулирование.

Abstract. Liquid ring vacuum pumps (LRVPs) are widely used in various industries. Despite their low efficiency, about 0.5 of LRVPs are irreplacable in the process of pumping gas containing vapors, discharging liquid, foreign particles and abrasive particles. The main task of designing effective LRVPs is to create structures with specified performance characteristics (performance, size of vacuum created) due to requirements of technological processes. At the same time, the indicated parameters should be obtained with minimum energy and operating costs. The variants of technical solutions in the modernized design of LRVPs with a rotating body and a mechanism for regulating the flow area of the discharge window are given.

Keywords: liquid ring vacuum pump, fluid friction, rotating sleeve, discharge window, regulation.

Среди многочисленных отраслей промышленности важное место занимает насосокомпрессоростроение. Высокий удельный вес в нем занимают ЖВН и компрессоры, используемые в нефтегазовой и целлюлозно-бумажной промышленности, агропромышленном комплексе и т.д., поэтому требования к ним все возрастают. Их конструкции весьма разнообразны. Широко распространены ЖВН и компрессоры с неподвижным корпусом, характеризующиеся трением жидкости о неподвижный корпус и трени-

ем в жидкостном кольце, что приводит к уменьшению коэффициента полезного действия ЖВН и компрессоров.

Существенным недостатком ЖВН, ограничивающим область его применения и снижающим конкурентоспособность на рынке вакуумных насосов, является низкий КПД – обусловленный высокими потерями мощности на трение жидкостного кольца о неподвижный корпус насоса и постоянство глубины достигаемого вакуума [1]. Сложности, связанные со сборкой и регулировкой насосов, не позволяют проводить без существенных трудозатрат модификацию имеющихся экземпляров машин с целью изменения рабочих характеристик для соответствия различных технологических процессов.

Анализ работ, посвященных исследованию ЖВН и компрессоров показал, что уменьшение гидравлического трения жидкостного кольца о корпус достигалось путем размещения в корпусе насоса или компрессора с зазором вращающейся с жидкостью втулки, а также путем изготовления вращающегося корпуса.

Недостатками указанных конструкций является несоответствие в окружных скоростях вращения корпуса и рабочего колеса (приводимого во вращение жидкостным кольцом) и трение втулки о неподвижный корпус и, как следствие, нарушение геометрии жидкостного кольца и повышенное сопротивление вращению рабочего колеса.

Для устранения указанного недостатка предлагается конструкция ЖВН с вращающимся корпусом, имеющая высшую кинематическую пару, образованную лопатками корпуса и лопатками рабочего колеса, и фактически представляет собой эвольвентное зубчатое зацепление (рис. 1) [3].

Расширение диапазона возможных режимов работы связано с возможностью изменения глубины достигаемого вакуума в зависимости он конкретного технологического процесса, или этапов отдельно взятого технологического процесса. Наиболее оптимальным решением, позволяющим выполнять регулирование глубины достигаемого вакуума, является система регулировки проходного сечения нагнетательного окна.

После выбора конкретных технических решений необходимо провести эскизное проектирование. На данном этапе необходимо определить непосредственно принципиальную схему выбранных решений, разработать основную геометрию участвующих в ней компонентов, определить ограничения, которые накладываются на конструкцию и особые требования, которые необходимо учесть.

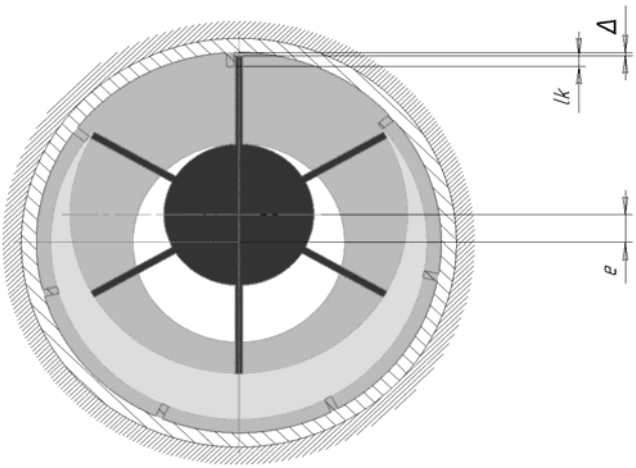


Рис. 1. Схема ЖВН с кинематическим замыканием

Для системы регулирования нагнетательного окна также справедливо требование технологичности, не допускающее влияния данной системы на форму и расположение других компонентов насоса. Для соблюдения данного требования система должна полностью располагаться внутри стойки, содержащей всасывающее и нагнетательное окна и не выходить за их габариты. Управляющий механизм также не должен выходить за габариты изделия и контактировать с крепежными элементами насоса. Решение должно иметь компоновку, обеспечивающую наиболее простую сборку и регулировку системы. Регулируемое нагнетательное окно не должно иметь зазоров, допускающих утечку газа в нагнетательный трубопровод в закрытых областях.

Вращающийся корпус обладает достаточно большим диаметром (от 90 мм). Габаритные размеры подшипников качения делают невозможным их монтаж без увеличения габаритов насоса и значительного изменения его конструкции. Применение подшипников скольжения затруднительно в связи с ограниченной номенклатурой представленных на рынке изделий, соответствующих по размерам основным типоразмерам насосов. Наиболее оптимальным решением является изготовление рабочего колеса из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Химические и физические свойства данного материала полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкции насоса.

Для регулирования сечения нагнетательного окна разработано техническое решение на основе винтовой пары (рис. 2) [3]. Внутри стенок нагнетательного окна расположено отверстие с резьбой, в которое вкручивается винт, тем самым перекрывая часть сечения окна. Отверстие высверливается в нижней части стойки, под углом, приблизительно равным 45°. Длина отверстия позволяет при полностью открытом нагнетательном окне не выходить винту за габариты стойки.

Данная работа описывает общий прототип насоса с регулируемым нагнетательным окном и вращающимся корпусом. Рассмотрены наиболее оптимальные решения для устранения основных недостатков ЖВН и их эскизная схема реализации. Сформулированные в настоящей работе идеи позволяют при проектировании конкретной модели ЖВН приступить непосредственно к техническому проектированию и проектному расчету машины.

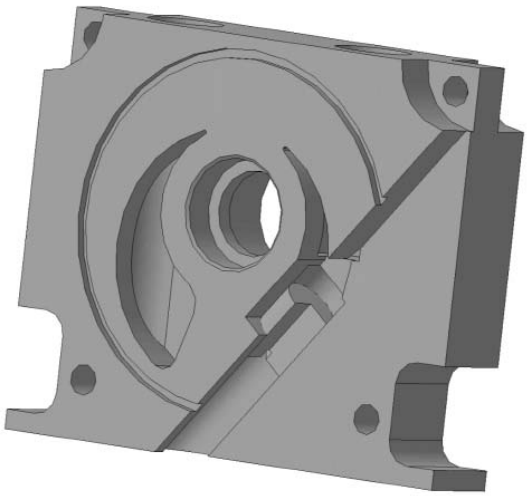


Рис. 2. Схема регулирования сечения нагнетательного окна

Список использованных источников

1. **Родионов Ю. В.** Повышение эффективности и эксплуатационных характеристик двухступенчатых жидкостнокольцевых вакуум-насосов : дис. ... канд. техн. наук; 05.04.09 ; Защищена 14.06.00 ; Утв. 10.11.00. – Тамбов : ТГТУ, 2000. – 135с.

2. **Пат. 2303166 РФ, МПК F04C 15/00.** Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна / Волков А. В., Воробьев Ю. В., Никитин Д. В., Попов В. В., Родионов Ю. В., Свиридов М. М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тамб. гос. техн ун-т. – № 2005116616/06 ; заявл. 31.05.2005 ; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.: ил.

3. **Пат. 2294456 РФ, МПК F04C 7/00, F04C 19/00.** Жидкостно-кольцевая машина / Воробьев Ю. В., Попов В. В., Родионов Ю. В., Свиридов М. М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тамб. гос. техн ун-т. – № 2005117866/06 ; заявл. 09.06.2005 ; опубл. 27.02.07, Бюл. № 6. – 7 с.

References

1. **Rodionov Yu. V.** Povysheniye effektivnosti i ekspluatatsionnykhk harakteristik dvukhstupenchatykh zhidkostnokoltsevykh vakuum-nasosov : Dis…. kand. tekhn. nauk; 05.04.09; – Zashchishchena 14.06.00; Utv. 10.11.00. – Tambov; TGTU. 2000. – 135s.

2. **Pat. 2303166 RF. MPK F04C 15/00.** Zhidkostno-koltsevaya mashina s avtomaticheskim regulirovaniyem prokhodnogo secheniya nagnetatelnogo okna / Volkov A. V.,Vorobyev Yu. V., Nikitin D. V., Popov V.V., Rodionov Yu. V., Sviridov M. M.; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO Tamb. gos. tekhn un-t. – № 2005116616/06 ; zayavl. 31.05.2005 ; opubl. 20.07.2007. Byul. № 20. – 6 s. : il.

3. **Pat. 2294456 RF. MPK F04C 7/00.F04C 19/00.** Zhidkostno-koltsevaya mashina / VorobyevYu. V., Popov V. V., RodionovYu. V., Sviridov M. M. ; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO Tamb. gos. tekhn un-t. – № 2005117866/06 ; zayav l.09.06.2005 ; opubl. 27.02.07. Byul. № 6. – 7 s.

Научное электронное издание

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Материалы V Международной научно-практической конференции

Выпуск 5, Том I

Редактор И. В. Калистратова
Компьютерное макетирование Т. Ю. Зотовой

ISBN 978-5-8265-1996-7

Подписано к использованию 17.12.2018.
Тираж 100 шт. Заказ № 377

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.
Телефон (4752) 63-81-08, 63-81-33.
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru