

*На правах рукописи*

**ТУГОЛУКОВ Евгений Николаевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОНАГРУЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ  
МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий  
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированное проектирование технологического оборудования" Тамбовского государственного технического университета.

Научные консультанты: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор  
**Малыгин Евгений Николаевич**

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор  
**Коновалов Виктор Иванович**

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук,  
профессор **Рудобашта Станислав Павлович**

доктор технических наук, профессор  
**Егоров Александр Федорович**

доктор технических наук, профессор  
**Дворецкий Станислав Иванович**

Ведущая организация ФГУП "ТамбовНИХИ"

Защита диссертации состоится 1 июля 2004 г. в 13<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета по присуждению ученой степени доктора технических наук Д 212.260.02 в Тамбовском государственном техническом университете по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Эл. почта: [kvipri@ce.tstu.ru](mailto:kvipri@ce.tstu.ru); факс: (80752) 722024.

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью) просим направлять по адресу: 392620, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " мая 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

*В.М. Нечаев*

---

---

Подписано к печати 20.05.04  
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 2,0 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 390

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие производства требует постоянного обновления предприятий химической промышленности, что осуществляется на основе современного оборудования, модернизации и компьютеризации существующих производств, внедрения новых технологий, расширения ассортимента выпускаемой продукции. На первый план при этом выдвигаются проблемы энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности.

Совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности и надежности химических процессов и производств является актуальным направлением современных научно-технических исследований в области процессов и аппаратов химических технологий.

Одним из путей повышения эффективности химической промышленности является организация рациональных малотоннажных производств по выпуску ряда продуктов на одном и том же оборудовании.

При этом, актуальным направлением решения проблем создания современного химического предприятия или реорганизации действующего, является разработка теории и методов выбора аппаратного оформления многоассортиментных малотоннажных химических производств (ММХП), отвечающих современным требованиям.

Оборудование ММХП работает преимущественно в нестационарных режимах. Наиболее полная информация о закономерностях и условиях протекания нестационарных технологических процессов на стадии проектирования может быть получена путем математического моделирования полей целевых характеристик (температур, концентраций и др.), определяющих количественные и качественные показатели технологических процессов.

Условия осуществления тепло- и массообменных процессов весьма часто определяют качество, себестоимость и, в конечном итоге, конкурентоспособность продукции химической промышленности.

Разработке системного подхода к синтезу многоассортиментных производств посвящены работы В.В. Кафарова, Е.Н. Малыгина,

И.Н. Дорохова, А.Ф. Егорова, С.И. Дворецкого.

В области математического моделирования процессов тепло- и массопереноса широко известны труды А.В. Лыкова, А.А. Самарского, В.И. Коновалова, С.П. Рудобашты, В.Ф. Фролова и других ученых.

Разработке и развитию теории конечных интегральных преобразований, используемых в данной работе, посвящены труды Н.С. Кошлякова, Э.М. Карташова и других ученых.

Несмотря на значительное количество работ в области тепло- и массопереноса, а также большое число моделей тепло- и массообменных процессов, в настоящее время отсутствуют унифицированные методики расчета нестационарных температурных и концентрационных полей рабочих областей типовых аппаратов химической промышленности, доведенные до программной реализации.

В данной работе рассматриваются преимущественно термонагруженные процессы, т.е. тепловые, диффузионные и химические процессы, в которых тепловые взаимодействия играют ключевую роль, а характеристики температурных полей определяют основные результаты процессов – такие как производительность, качество продуктов, затраты на производство и др. Это процессы, реализуемые в теплообменном, емкостном, реакционном, сушильном, адсорбционном и других видах оборудования.

В работе развиваются теория и методы проектирования оборудования ММХП, работающего в стационарных, нестационарных, переходных, циклических и квазистационарных режимах, на основе математического моделирования полей целевых характеристик производственных процессов.

Настоящая работа выполнялась в соответствии с координационным планом Межвузовской НТП "Теоретические основы химической технологии" на период 1995 – 2000 гг., а также по хоздоговорным планам НИР Тамбовского института химического машиностроения в 1981 – 1993 гг. и Тамбовского государственного технического университета в 1994 – 2003 гг.

**Целью работы** является развитие теории и методов, реализующих современные подходы к разработке аппаратного оформления многоассортиментных малотоннажных химических производств.

Научной проблемой, сопутствующей достижению указанной цели, является разработка методологии математического моделирования аппаратного оформления ММХП, работающего в стационарных, нестационарных, переходных, циклических и квазистационарных режимах, а также соответствующего математического и алгоритмического обеспечения.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи исследования:

- анализ совокупности взаимосвязанных задач, решаемых при разработке нового ММХП или модернизации существующего;
- постановка задач оптимизации конструктивных и режимных параметров технологического оборудования ММХП;
- разработка методологии выполнения технологических расчетов класса производственного оборудования ММХП на основе математического моделирования полей целевых характеристик рабочих областей аппаратов;
- разработка методологии математического моделирования полей целевых характеристик класса производственного оборудования ММХП на основе вводимого понятия элементарной области;
- разработка единых подходов к математическому моделированию полей целевых характеристик элементарных областей класса производственного оборудования ММХП;
- определение комплекса задач нестационарной теплопроводности и диффузии, необходимых для математического моделирования полей целевых характеристик элементарных областей класса производственного оборудования ММХП;
- формулировка математических постановок базовых задач теплопроводности и диффузии, получение их аналитических решений;
- разработка унифицированной методики решения уравнений математических моделей полей целевых характеристик элементарных областей класса производственного оборудования ММХП;

– обоснование алгоритма решения задачи оптимизации конструктивных и режимных параметров технологического оборудования ММХП;

– производственная апробация и промышленное использование результатов работы.

**Научная новизна.** Разработана новая методология математического моделирования класса тепло- и массообменных процессов, реализуемых в производственном оборудовании химической промышленности, функционирующем в стационарных, нестационарных, переходных, циклических и квазистационарных режимах. На этой основе определяются конструктивные и режимные параметры термонагруженных аппаратов химической промышленности.

Для класса аппаратов ММХП введено понятие элементарной области, как области ограниченных размеров, рассматриваемой в течение короткого интервала времени, внутри которой присутствуют все виды целевого переноса, характерные для текущего процесса.

Разработана унифицированная методология математического моделирования полей температур и концентраций в типовых элементарных областях аппаратов ММХП.

Определен комплекс задач теплопроводности и диффузии для математического моделирования полей температур и концентраций типовых элементарных областей теплообменного, емкостного, сорбционного и сушильного оборудования.

Адаптирована для практического использования унифицированная методика решения класса задач теплопроводности и диффузии на основе метода конечных интегральных преобразований.

Получены аналитические решения задач теплопроводности для многослойных, конечных и составных тел канонической формы методом конечных интегральных преобразований в форме, удобной для компьютерной реализации. Ряд решений получен впервые.

Получено аналитическое решение обратной задачи теплопроводности с использованием конечных интегральных преобразований.

Предложены схемы получения точного и приближенного аналитического решения одной из нелинейных задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований.

**Практическая значимость.** Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для компьютерной реализации аналитических решений комплекса задач теплопроводности и диффузии.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для компьютерной реализации аналитических решений обратной задачи теплопроводности.

Рассмотрены способы адаптации аналитических решений задач теплопроводности к компьютерной реализации. Приведены приемы снижения погрешностей компьютерного счета сложных математических выражений.

Разработаны алгоритмы расчета температурных полей элементарных областей теплообменного и емкостного оборудования.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета нестационарных температурных полей рабочих областей теплообменного и емкостного оборудования.

Разработаны алгоритмы расчета взаимосвязанных нестационарных полей температур и концентраций элементарных областей адсорбционного оборудования и ленточных сушилок.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета взаимосвязанных нестационарных полей температур и концентраций рабочих областей адсорбционного оборудования и ленточных сушилок.

Выполнен ряд работ по оптимизации конструктивных и режимных характеристик аппаратов химической промышленности.

**Реализация результатов работы.** Разработанные методы моделирования и расчета технологического оборудования использованы в Объединенном институте ядерных исследований при проектировании баков и штоков циклотрона тяжелых ионов У-400М и циклотрона ДС-72 ЛЯР; во ВНИИРТмаше – при проектировании пропиточно-сушильного оборудования для обработки кордных материалов, линии производства конвейерных лент ЛПД-1600, линии обкладки каркасов ЛОК-1400, роторно-конвейерной линии АРКЛ; на ОАО "Пигмент" – при проектировании автоклава для щелочной плавки амино-Г-кислоты и контактного аппарата для синтеза монометиланилина; на ОАО "Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артемова при проектировании системы охлаждения плакированного корпуса высокотемпературного реактора; на ФГУП "ТамбовНИХИ" – при проектировании теплообменного оборудования энергетической установки специального цикла и индивидуального дыхательного аппарата (ИДА).

В настоящее время предложенная методика используется также в проектно-конструкторских работах, выполняемых Технологическим институтом ТГТУ; в аспирантских работах и в учебном процессе при подготовке магистров и инженеров конструкторско-технологических специальностей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на: Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 1988); VII Республиканской конференции "Повышение эффективности процессов и аппаратов" (Львов, 1988); Областной научно-технической конференции "Ученые вуза – производству" (Тамбов, 1989); 7-th International Congress of Chemical Engineering CHISA-90 (Praga, 1990); IV World Congress of Chemical Engineering DECHEMA'91 (Karlsruhe, Germany, 1991); VII Polish Drying Symposium (Lodz, 1991); XXVIII научно-технической конференции ТИХМа (Тамбов, 1991); International Drying Symposium IDS'92 (Montreal, Canada, 1992); II Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 1992); 11-th International Congress of Chemical Engineering CHISA-93 (Praga, 1993); 9-th International Drying Symposium IDS'94 (Gold Coast, Australia, 1994); Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 1996); III научно-технической конференции ТГТУ, (Тамбов, 1996); VI Региональной конференции "Проблемы химии и химической технологии" (Воронеж, 1998); 3-й Международной теплофизической школе "Новое в теплофизических свойствах" (Тамбов, 1998); III Тамбовской межвузовской научной конференции (Тамбов, 1999); IV научной конференции ТГТУ (Тамбов, 1999); III Международной научно-технической конференции "Динамика систем, механизмов и машин" (Омск, 1999); XIII Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях" ММТТ-2000 (С.-Петербург, 2000); XV Международной научно-технической конференции "Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии" (Уфа, 2002); XV Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях" ММТТ-2002 (Тамбов, 2003); заседаниях ученого совета ФГУП "ТамбовНИХИ" (Тамбов, 2003, 2004).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 77 публикациях. По результатам исследований издана монография.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературных источников и приложений. Работа изложена на 346 страницах основного текста, содержит 58 рисунков, 30 таблиц и 6 приложений.

Основные научные результаты диссертации получены лично автором. Вклад автора диссертации в работы, выполненные в соавторстве и отраженные в ее результатах, состоит в разработке и практической реализации математических моделей и расчетных алгоритмов, а также в непосредственном участии во всех этапах исследований.

Автор выражает глубокую благодарность научным консультантам: Заслуженному деятелю науки РФ, д.т.н., профессору Малыгину Евгению Николаевичу за всестороннюю помощь и поддержку, оказанные при выполнении работы и Заслуженному деятелю науки и техники РФ, д.т.н., профессору Коновалову В.И., который предопределил направление работ автора.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность, научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы. Сформулированы цели, основные направления исследования, результаты реализации работы.

Первая глава "**Разработка аппаратурного оформления современного промышленного химического производства**" посвящена методологии разработки аппаратурного оформления многоассортиментных малотоннажных химических производств.

При разработке аппаратурного оформления химических производств приходится иметь дело со множеством разнообразных прикладных задач, связанных с определением оптимальных конструктивных и режимных параметров единиц производственного оборудования.

Решение задачи разработки аппаратурного оформления ММХП в общем случае включает необходимость постановки и решения одной из следующих задач:

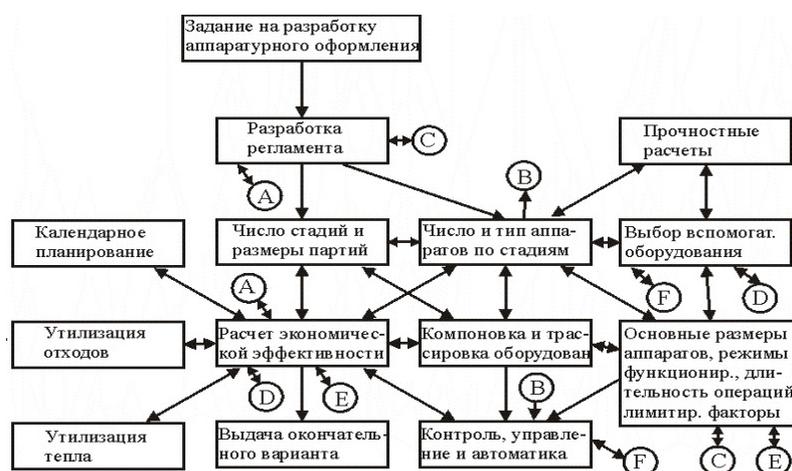
- разработка нового производства с заданными показателями производительности, реализующего новейшие технологии, отвечающего современным требованиям и обеспечивающего минимальные затраты на производство продукции;
- модернизация и обновление существующего производства на базе имеющихся в наличии произ-

водственных мощностей с целью изменения номенклатуры и объемов выпуска продуктов, а также реализации усовершенствованных технологий.

Эти задачи приходится решать с учетом экологических требований, а также эргономических факторов.

Задача разработки нового производства или модернизации существующего объединяет взаимосвязанную совокупность всех возможных частных оптимизационных задач, возникающих на этапах разработки и функционирования химического производства, при наличии большого количества дополнительных требований и условий.

В то же время взаимосвязи между отдельными задачами являются сложными и многочисленными (рис. 1).



**Рис. 1 Взаимосвязь задач при разработке аппаратного оформления химического производства:**

обозначения А – F используются для упрощения изображения связей на рисунке

Постановка и решение задачи разработки аппаратного оформления ММХП в общем виде не представляются целесообразными; во-первых, из-за чрезмерной сложности и высокой размерности; во-вторых, из-за того, что все локальные задачи являются самостоятельными и представляют специфические области исследования со своими традициями, методиками и подходами к решению.

Наиболее приемлемым является многоуровневый итерационный алгоритм, охватывающий при каждой итерации все или часть из перечисленных задач, взаимосвязь между которыми осуществляется через общие материальные, энергетические, геометрические и временные параметры производственного процесса. Результатом каждой внешней итерации является возможный вариант организации заданного производственного цикла, а критерием его качества – относительные приведенные затраты на производство единичного количества готового продукта.

Поскольку проработка каждого варианта является сложной инженерной задачей, стоимость такой проработки может вносить ощутимый вклад в общую стоимость разрабатываемого производства. Время, затрачиваемое на проработку дополнительных вариантов – это время, на которое задержится начало выпуска продукции. Поэтому разработка методик, обеспечивающих снижение продолжительности и стоимости проработки вариантов аппаратного оформления ММХП, весьма актуальна.

Очевидно, что перспективный способ реализации итерационного алгоритма, позволяющий принципиально снизить затраты времени и средств на проработку возможного варианта аппаратного оформления – разработка компьютерной интерактивной системы, включающей алгоритмы решения локальных задач с возможностью обмена информацией между ними, а также необходимую справочную информацию и эмпирические зависимости в виде баз данных.

Достоинства такой системы – наглядность промежуточных результатов, возможность реализации разнообразных оптимизационных алгоритмов, возможность решения отдельно взятой локальной производственной задачи, возможность обновления и добавления локальных алгоритмов, возможность уточнения взаимосвязей между ними.

Во второй главе "Моделирование полей определяющих параметров в производственном оборудовании" сформулирован новый подход к математическому моделированию аппаратного оформ-

ления ММХП.

Из перечисленных локальных задач, составляющих задачу разработки аппаратного оформления ММХП, задача нахождения оптимальных конструктивных характеристик единиц оборудования и выполнения соответствующих технологических расчетов является наиболее сложной и ответственной. От результатов ее решения зависит не только значительная часть расходных статей, но и надежность самого оборудования, и безопасность его эксплуатации.

Сложность задачи заключается в необходимости взаимосвязанного решения ряда частных задач по определению условий протекания заданных процессов в конкретном оборудовании. Для моделирования каждого возможного сочетания вида процесса и типа оборудования необходимо использовать разнообразные расчетные зависимости, расчетные методики, справочные и эмпирические данные. При этом, как правило, официально утвержденные и рекомендованные для использования расчетные зависимости являются упрощенными; они получены на основе значительных допущений и используют усредненные по времени или объему характеристики процессов; справочные эмпирические зависимости позволяют найти лишь оценочные значения кинетических характеристик; часть требуемых для расчетов исходных данных вообще отсутствует.

При работе оборудования в периодических режимах поля целевых параметров производственных процессов являются нестационарными. Необходимость рассмотрения нестационарных и переходных процессов принципиально усложняет технологические расчеты, так как инженерные методики расчета таких процессов дают еще менее надежные результаты.

Наиболее полное представление о закономерностях процесса и его особенностях может быть получено на основе расчета полей целевых параметров – таких как температуры, концентрации, давления, напряженности, скорости и т.д.

Очень часто для определения оптимальных конструктивных и режимных параметров производственного оборудования химической промышленности достаточно знания полей температур и концентраций в рабочих областях аппаратов.

Под определяющими параметрами будем понимать такие целевые характеристики процессов, значения которых определяются фундаментальными законами переноса энергии или вещества.

Технологические расчеты, основанные на использовании полей определяющих параметров, имеют ряд принципиальных преимуществ:

- расчеты стационарных, квазистационарных, нестационарных, периодических и переходных процессов могут выполняться по унифицированным методикам;
- поля целевых параметров могут быть рассчитаны как для отдельных единиц оборудования, так и для групп аппаратов, работающих взаимосвязано;
- возможен расчет дополнительных факторов – таких как потоки, градиенты, амплитуды, интегральные характеристики целевых параметров.

Так, значения тепловых потоков определяют интенсивность и продолжительность тепловых процессов; значения температурных градиентов в продукте, как правило, определяют его качественные показатели; интегральные теплоты и потери определяют основную составляющую эксплуатационных затрат на осуществление процесса.

Использование современных средств компьютерной техники делает такие расчеты не только практически реализуемыми, но и необходимыми при решении задач разработки и оптимизации современного промышленного химического производства.

Вместе с тем, очевидны и сопутствующие проблемы:

- необходимость для каждого сочетания вида процесса и типа оборудования, в котором данный процесс реализуется, использования индивидуальных математических моделей, основанных в общем случае на решении систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, содержащих конвективные члены. Поскольку прямые решения таких уравнений практически невозможны, необходима разработка надежных алгоритмов, реализующих приближенные методики их решения;
- необходимо наличие специалистов высокой квалификации, включающей знание предметной области, владение специальным математическим аппаратом и компьютерной техникой одновременно и на профессиональном уровне, заинтересованных в выполнении таких работ.

Принципиальную важность приобретает качество используемых расчетных методик, обеспечивающее их адекватность моделируемым процессам, надежность в реализации и достоверность полученных результатов.

Очевидно, что в реальной ситуации задача разработчика принципиально облегчается при наличии

набора математических моделей полей определяющих параметров для классов процессов, реализуемых в соответствующих типах аппаратов.

Рассмотрены возможности математического моделирования полей определяющих параметров производственного оборудования на примере моделирования температурных полей.

Рассмотрен класс термонагруженных процессов, для которых определяющими являются температурные поля в производственном оборудовании, а также поля других параметров, имеющих идентичное с температурными полями математическое представление (поля концентраций влаги в высушиваемых материалах, поля концентраций поглощаемого компонента в гранулах адсорбентов и т.д.).

К данному классу относятся процессы нагрева и охлаждения жидких и газообразных продуктов, конденсации паров и испарения жидкостей в теплообменном и емкостном оборудовании; процессы адсорбции в аппаратах с неподвижным и подвижным слоем сорбента; процессы сушки гранулированных, сыпучих, штучных и ленточных материалов на ленточных и полочных сушилках; ряд других процессов.

Рассмотрена возможность использования аналитических подходов к математическому моделированию тепловых процессов в промышленном оборудовании, которые в общем виде могут быть описаны дифференциальным уравнением Фурье–Кирхгофа.

Избежать использования нелинейных постановок задач теплопроводности, не допускающих в общем случае аналитических решений и значительно усложняющих численные, позволяет очевидный прием дискретизации пространственных и временных координат совместно с допущением о постоянстве характеристик теплового процесса внутри элементарной пространственно-временной области.

Сущность методики состоит в представлении как стационарных, так и нестационарных полей определяющих параметров производственного оборудования как совокупности полей пространственно-временных элементарных областей, моделируемых аналитическими решениями систем линейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими условиями однозначности.

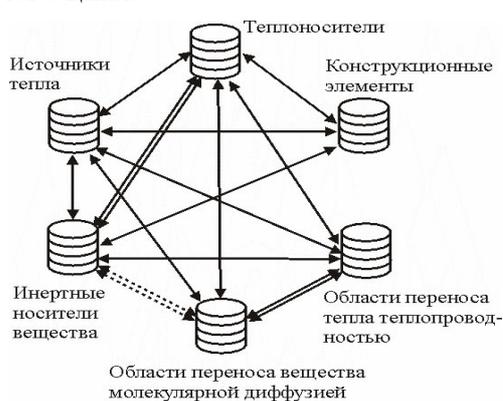
В общем случае под элементарной областью понимается область ограниченных размеров, рассматриваемая в течение короткого интервала времени, внутри которой присутствуют все виды целевого переноса, характерные для текущего процесса, и охватывающая как участки конструктивных элементов аппарата, влияющих на поля определяющих параметров, так и некоторые объемы заполняющих аппарат сред (сырье и продукты, теплоносители и хладагенты, инертные компоненты, насадки, сорбенты, катализаторы и др.) (рис. 2). Полная совокупность элементарных областей составляет весь рабочий объем аппарата за время рабочего цикла.

В частных охватывать как (одноходовой контактный весь рабочий

дискретизация

линеаризации

диффузии лишь



**Рис. 2 Структура элементарной области.**  
 одинарные стрелки означают тепловое взаимодействие; двойная пунктирная стрелка – массообмен; двойные стрелки – области совместного тепло- и массопереноса

случаях элементарная область может все поперечное сечение аппарата жухотрубчатый тепло-обменник или аппарат, адсорбционная колонна), так и объем аппарата.

Пространственная и временная

области осуществления

тепломассообменного процесса как способ

постановок задач теплопроводности и

внешне напоминает пространственную и

временную дискретизацию, лежащую в основе численных методов решения дифференциальных

уравнений. Во-первых, элементарная область объединяет области с различными механизмами пере-

носа тепла и массы в пространстве. Во-вторых, поля определяющих параметров элементарной облас-

ти моделируются аналитическими функциями, являющимися решениями соответствующих диффе-

ренциальных уравнений в частных производных, тогда как при использовании численных схем для

каждой узловой точки пространственно-временной области решается система алгебраических уравнений, приближенно отражающая закономерности протекания процессов переноса, использующая известные значения исследуемого параметра в соседних узловых точках и позволяющая найти фиксированное значение исследуемого параметра в текущей узловой точке.

Конкретный вид элементарной области и соответствующая ей математическая модель температурных и концентрационных полей определяются геометрическими характеристиками оборудования и кинетическими закономерностями протекающих в нем процессов.

Такой подход, позволяющий свести решение нелинейной задачи теплопроводности к совокупности решений соответствующих линейных задач, имеет свои особенности и налагает ряд специфических требований на постановки линейных задач. Так, начальные условия в общем случае должны быть произвольными, а в частных случаях в качестве начального распределения могут использоваться расчетные профили, полученные для конца предыдущего временного интервала текущей элементарной области.

В принципе, аналитические методы решения систем уравнений в частных производных необходимо использовать тогда, когда для задач в выбранной постановке они применимы, т.е. позволяют получать аналитические решения.

Метод конечных интегральных преобразований имеет ряд практических преимуществ перед другими аналитическими методами:

- унифицирован для задач в различных постановках и не требует изобретательности в технических приемах;
- позволяет получать решение для задач с неоднородными граничными условиями без представления задачи в виде совокупности стационарной и нестационарной составляющих;
- допускает преобразование по нескольким (или всем) пространственным координатам одновременно, а также по координатам, вдоль которых свойства среды изменяются ступенчато;
- позволяет получать решения в стандартном виде, удобном для компьютерной реализации.

Практика показывает, что использование метода конечных интегральных преобразований для решения многомерных или (и) многослойных задач теплопроводности унифицирует и значительно упрощает процесс получения аналитического решения.

Основным отличием интегральных преобразований в конечных пределах от операционного исчисления является использование широкого набора интегральных преобразований, в которых ядра интегральных преобразований и весовые функции определяются индивидуально для каждой конкретной задачи.

Для решения задач теплопроводности и диффузии в постановках, сформулированных в диссертации, применяется следующая схема использования метода конечных интегральных преобразований.

Рассмотрим дифференциальное уравнение второго порядка

$$\sum_{i=0}^3 \alpha_i \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + \sum_{i=0}^3 \beta_i \frac{\partial u}{\partial x_i} + cu = f. \quad (1)$$

Выберем переменную  $x_j = \xi$ , которая изменяется в постоянных конечных пределах  $[a, b]$ , в качестве переменной преобразования.

Ядро интегрального преобразования  $K(\xi, \gamma)$  и весовая функция  $\rho(\xi)$  определяются из условия, чтобы интегральное соотношение

$$\int_a^b \left( \sum_{i=0}^3 \alpha_i \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + \sum_{i=0}^3 \beta_i \frac{\partial u}{\partial x_i} + cu \right) K(\xi, \gamma) \rho(\xi) d\xi = \bar{f} \quad (2)$$

(здесь  $\bar{f}$  – интегральное преобразование функции  $f$ ) являлось дифференциальным уравнением относительно интегрального преобразования

$$\bar{u} = \int_a^b u K(\xi, \gamma) \rho(\xi) d\xi \quad (3)$$

функции  $u$ .

Тогда весовая функция  $\rho$  определяется с точностью до постоянного множителя из условия

$$(\alpha_j \rho)' = \beta_j \rho. \quad (4)$$

Если граничные условия по координате  $x_j$  имеют вид

$$\alpha_a u'(a) + \beta_a u(a) = \varphi_a; \quad \alpha_b u'(b) + \beta_b u(b) = \varphi_b, \quad (5)$$

то ядро интегрального преобразования  $K(\xi, \gamma)$  является решением задачи Штурма–Лиувилля

$$(\alpha_j \rho K')' + \rho(c + s^2)K = 0, \quad (6)$$

$$\alpha_a u'(a) + \beta_a u(a) = 0; \quad \alpha_b u'(b) + \beta_b u(b) = 0, \quad (7)$$

также полученным с точностью до постоянного множителя.

Здесь  $s$  – собственные числа задачи, определяемые из условий (7).

Обратное преобразование выполняется по формуле

$$u = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\bar{u} K}{N}, \quad (8)$$

причем, суммирование ведется по собственным числам и

$$N = \int_a^b K^2(\xi, \gamma) \rho(\xi) d\xi. \quad (9)$$

Использование решений линейных задач теплопроводности для многослойных тел является одним из возможных путей получения приближенных решений нелинейных задач теплопроводности. Практически такой подход не используется, по-видимому, из-за кажущейся сложности в реализации. В действительности увеличение числа слоев в постановке задачи не приводит к принципиальному усложнению решения, так как в нем используются цепочные (или рекуррентные) соотношения, легко реализуемые при программировании.

Использование метода конечных интегральных преобразований для случая скачкообразного изменения свойств среды в направлении координаты, по которой производится преобразование, иллюстрируется примером решения линейной одномерной задачи теплопроводности для многослойной области канонической формы.

Постановка задачи:

$$\frac{\partial t_i(r_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left( \frac{\partial^2 t_i(r_i, \tau)}{\partial r_i^2} + A_{k,i} \frac{\partial t_i(r_i, \tau)}{\partial r_i} \right) + Q_i(r_i, \tau), \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad k = 0, 1, 2, \quad \tau > 0,$$

$$t_i(r_i, 0) = f_i(r_i); \quad (11)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(R_0, \tau)}{\partial r_1} + \alpha_1 (t_1(R_0, \tau) - t_{c1}(\tau)) = 0, \quad \alpha_1 < 0; \quad (12)$$

$$\lambda_N \frac{\partial t_N(R_N, \tau)}{\partial r_N} + \alpha_N (t_N(R_N, \tau) - t_{cN}(\tau)) = 0; \quad (13)$$

$$t_j(R_j, \tau) = t_{j+1}(R_j, \tau); \quad \lambda_j \frac{\partial t_j(R_j, \tau)}{\partial r_j} = \lambda_{j+1} \frac{\partial t_{j+1}(R_j, \tau)}{\partial r_{j+1}}, \quad j = 1, 2, \dots, N-1. \quad (14)$$

Решение задачи (10) – (14) имеет вид

$$t_m(r_m, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, \tau) W_m(r_m, \mu_n)}{S_n}, \quad (15)$$

где 
$$S_n = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} \rho(r_m) W_m^2(r_m, \mu_n) dr_m, \quad (16)$$

$$U(\mu_n, \tau) = \text{Exp}(-\mu_n^2 \tau) \left( U(\mu_n, 0) + \int_0^{\tau} (G(\mu_n, \tau) + M(\mu_n, \tau)) \text{Exp}(\mu_n^2 \tau) d\tau \right); \quad (17)$$

$$M(\mu_n, \tau) = \frac{\alpha_N}{\lambda} W(R_N, \mu_n) t_{cN}(\tau) - \frac{\alpha_1}{\lambda} W(R_0, \mu_n) t_{c1}(\tau); \quad (18)$$

$$G(\mu_n, \tau) = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} \rho(r_m) Q_m(r_m, \tau) W_m(r_m, \mu_n) dr_m; \quad (19)$$

$$W_m(r_m, \mu) = C1_m \text{Exp} \left( -\frac{r_m}{2} \left( A_{k,m} + \sqrt{A_{k,m}^2 - 4 \frac{\mu^2}{a_m^2}} \right) \right) + C2_m \text{Exp} \left( -\frac{r_m}{2} \left( A_{k,m} - \sqrt{A_{k,m}^2 - 4 \frac{\mu^2}{a_m^2}} \right) \right), \quad (20)$$

где  $\rho(z)$  – весовая функция, являющаяся решением уравнения

$$\frac{d\rho(z_m)}{dz} - A_{k,m} \rho(z_m) = 0, \quad (21)$$

коэффициенты  $C1_m$ ,  $C2_m$  и собственные числа задачи  $\mu_n$  определяются из граничных условий (12) – (14), причем  $C1_1 = 1$ .

Здесь:  $A_{0,i} = 0$ ,  $A_{1,i} = 1/r_i$ ,  $A_{2,i} = 2/r_i$  соответственно для декартовой, цилиндрической и сферической систем координат.

В третьей главе "**Базовые решения задач теплопроводности**" приводится комплекс аналитических решений класса задач теплопроводности (и идентичных по математической постановке задач диффузии), полученных в работе методом конечных интегральных преобразований, и используемых в дальнейшем для математического моделирования температурных полей элементарных областей теплообменного и емкостного оборудования, а также полей температур и концентраций элементарных областей адсорбционного и сушильного оборудования химической промышленности.

Получены решения следующих задач:

1 Задача нестационарной теплопроводности для  $N$ -слойной неограниченной пластины с произвольным начальным распределением, граничными условиями 4-го рода на поверхностях контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах.

2 Задачи нестационарной теплопроводности для  $N$ -слойных полого и сплошного неограниченных цилиндров с произвольным начальным распределением, граничными условиями 4-го рода на поверхностях контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах (для сплошного цилиндра по оси – условие симметрии).

3 Задача нестационарной теплопроводности для полого ограниченного цилиндра с произвольным начальным распределением, однородными граничными условиями 3-го рода на торцовых поверхностях и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на боковых поверхностях, учитывающих изменение температур окружающей среды вдоль оси цилиндра и во времени.

4 Задача нестационарной теплопроводности для сплошного ограниченного цилиндра с произвольным начальным распределением и неоднородными граничными условиями 3-го рода на торцовых и боковой поверхностях.

5 Задача стационарной теплопроводности для сплошного составного ограниченного цилиндра с граничным условием 4-го рода на стыковой поверхности, неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на торцовых поверхностях и ступенчато меняющимся неоднородным граничным условием 3-го рода на боковой поверхности.

6 Задачи нестационарной теплопроводности для  $N$ -слойных полого и сплошного шара с произвольным начальным распределением, граничными условиями 4-го рода на поверхностях контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах (для сплошного шара в центре – условие симметрии).

7 Задача нестационарной теплопроводности для неограниченного бруса с произвольным начальным распределением и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на боковых поверхностях.

8 Вывод и решение стационарной задачи теплопроводности для тонкой пластины (двумерное температурное поле) с неоднородными граничными условиями 2-го и 3-го рода на противоположащих торцовых поверхностях и граничными условиями 3-го рода на наружных поверхностях.

9 Вывод и решение нестационарного уравнения переноса тепла жидкостью, движущейся в режиме идеального вытеснения по каналу, образованному двумя (в общем случае –  $N$ ) поверхностями, температуры которых меняются по длине канала и во времени.

10 Обратная задача теплопроводности для определения коэффициентов теплоотдачи по экспериментальным данным методами преобразований Лапласа и конечных интегральных преобразований.

11 Схемы решения нелинейной нестационарной задачи теплопроводности методом конечных интегральных преобразований и заменой частной производной температуры по времени конечноразностным аналогом.

В четвертой главе "**Тепловой расчет элементарных областей внутреннего пространства теплонагруженного производственного оборудования**" рассмотрены математические модели температурных полей элементарных областей кожухотрубчатого теплообменника, работающего в стационарном и нестационарном режимах. Описана методика математического моделирования температурных полей кожухотрубчатого теплообменного оборудования, работающего в стационарных и нестационарных температурных режимах.

Элементарная область кожухотрубчатого теплообменника длиной  $\Delta x$  вдоль оси аппарата, охватывает все его поперечное сечение, включая трубный пучок, корпус и теплоизоляционное покрытие (рис. 3).

Температурное поле элементарной области кожухотрубчатого теплообменника является совокупностью температурных полей стенок трубок, стенки корпуса, теплоизоляционного покрытия и теплоносителей. Оно описывается следующими функциями:  $t_1(x, \tau)$  – температурное поле потока в трубном пространстве;  $U(r, \tau)$  – температурное поле стенки трубки трубного пучка;  $t_2(x, \tau)$  – температурное поле потока в межтрубном пространстве;  $S_1(r_1, \tau)$  – температурное поле стенки корпуса аппарата;  $S_2(r_2, \tau)$  – температурное поле слоя теплоизоляционного покрытия.

Эти функции являются решениями следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} + W_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} + K_1 t_1(x, \tau) = F_1(x, \tau), \quad 0 \leq x \leq \Delta x; \quad (22)$$

$$t_1(0, \tau) = t_{10}(\tau); \quad t_1(x, 0) = f_1(x); \quad (23)$$

$$\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left( \frac{\partial^2 U(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad r_T \leq r \leq r_T + \delta_T, \quad \tau > 0; \quad (24)$$

$$U(r, 0) = f_i(r); \quad (25)$$

$$\lambda_i \frac{\partial U(r_T, \tau)}{\partial r} - \alpha_1 (U(r_T, \tau) - \bar{t}_1) = 0; \quad (26)$$

$$\lambda_i \frac{\partial U(r_T + \delta_T, \tau)}{\partial r} + \alpha_2 (U(r_T + \delta_T, \tau) - \bar{t}_2) = 0; \quad (27)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} + W_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} + K_2 t_2(x, \tau) = F_2(x, \tau), \quad 0 \leq x \leq \Delta x, \quad (28)$$

$$t_2(0, \tau) = t_{20}(\tau); \quad t_2(x, 0) = f_2(x); \quad (29)$$

$$\frac{\partial S_i(r_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left( \frac{\partial^2 S_i(r_i, \tau)}{\partial r_i^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial S_i(r_i, \tau)}{\partial r_i} \right), \quad i = 1, 2, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad (30)$$

$$S_i(r_i, 0) = \vartheta_i(r_i); \quad (31)$$

$$\lambda_k \frac{d S_1(R_0, \tau)}{d r_1} - \alpha_k (S_1(R_0, \tau) - \bar{t}_2) = 0; \quad (32)$$

$$\lambda_u \frac{d S_2(R_2, \tau)}{d r_2} + \alpha_{oc} (S_2(R_2, \tau) - t_{oc}) = 0; \quad (33)$$

$$S_1(R_1, \tau) = S_2(R_2, \tau); \quad \lambda_k \frac{d S_1(R_1, \tau)}{d r_1} = \lambda_u \frac{d S_2(R_1, \tau)}{d r_2}. \quad (34)$$

Здесь  $K_1 = \frac{\alpha_1 \Pi_1}{G_1 c_1}; F_1(x, \tau) = K_1 t_{F1}(x, \tau); \quad (35)$

$$K_2 = \frac{\alpha_k \Pi_k + \alpha_2 \Pi_2}{G_2 c_2}; \quad (36)$$

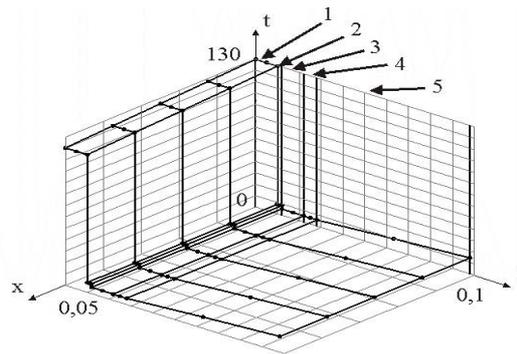
$$V_2(x, \tau) = \frac{\alpha_k \Pi_k t_{Fk}(x, \tau) + \alpha_2 \Pi_2 t_{F2}(x, \tau)}{G_2 c_2}; \quad (37)$$

$$\Pi_1 = 2\pi r_T n, \quad \Pi_2 = 2\pi(r_T + \delta_T) n, \quad \Pi_k = 2\pi r_k; \quad (38)$$

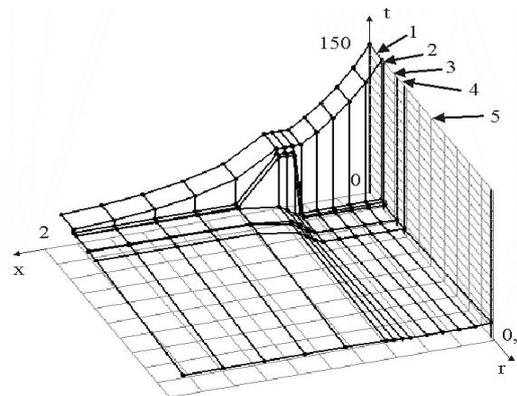
$$R_0 = r_k, \quad R_1 = r_k + \delta_k, \quad R_2 = r_k + \delta_k + \delta_u. \quad (39)$$

где  $\bar{t}_1, \bar{t}_2$  – средние температуры теплоносителей в элементарной области;  $t_{F1}(x, \tau), t_{F2}(x, \tau), t_{Fk}(x, \tau)$  – соответственно температуры внутренней и наружной поверхностей трубок, внутренней поверхности корпуса.

На рис. 4 представлена для примера графическая иллюстрация расчетного температурного поля одной из элементарных областей аппарата, являющегося решением системы (22) – (39). На рис. 5 представлена графическая иллюстрация расчетного температурного поля гори-



**Рис. 4** Температурное поле одной из элементарных областей кожухотрубчатого теплообменного аппарата



**Рис. 5** Температурное поле кожухотрубчатого теплообменного аппарата

зонтального кожухотрубчатого теплообменника, в котором осуществляются последовательное охлаждение, конденсация паров и дальнейшее охлаждение конденсата. На рис. 4 и 5  $x$  – линейная координата по длине зоны теплообмена,  $r$  – радиальная координата, перпендикулярная оси аппарата; цифрами обозначены области аппарата: 1 – трубное пространство; 2 – стенка трубки; 3 – межтрубное пространство; 4 – корпус аппарата; 5 – теплоизоляция.

Адекватность математической модели кожухотрубчатого теплообменника оценивалась по результатам испытаний теплообменного оборудования, входящего в состав системы подготовки искусственной газовой смеси дизель-энергетической установки специального цикла.

В холодильнике отработанных газов (ОГ) осуществлялось охлаждение отработанных газов водой; в холодильнике кислорода ( $O_2$ ) осуществлялось охлаждение кислорода водой; в подогревателе искусственной газовой смеси (ИГС) осуществлялся подогрев искусственной газовой смеси отработанными газами. Результаты проверки адекватности математической модели кожухотрубчатого теплообменного аппарата приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	Холодильник ОГ	Холодильник $O_2$	Подогреватель ИГС
Диаметр кожуха, м	1	0,6	0,8
Диаметр труб, мм	38×2	25×2	426×6
Длина труб, м	8	4	8,1
Число труб, шт	323	257	1
Направление	Противоток	Противоток	Прямоток
Трубное пространство	ОГ	$O_2$	ИГС
Межтрубное пространство	Вода	Вода	ОГ
Расход теплоносителя в трубном пространстве, кг/час	2640	272	124
Расход теплоносителя в межтрубном пространстве, кг/час	1200	1000	102
Начальная температура теплоносителя в трубном пространстве, °С	200	350	25
Начальная температура теплоносителя в межтрубном пространстве, °С	12	12	110
Конечная температура теплоносителя в трубном пространстве, °С	40	50	38
Конечная температура теплоносителя в межтрубном пространстве, °С	96	30	84
Расчетная длина аппарата, м	7,8	4,15	8,0
Погрешность теплового баланса, %	0,01	0,01	0
Погрешность расчета, %	-2,5	3,8	-1,3

В табл. 2 дано сравнение результатов расчета кожухотрубчатых теплообменников по стандартной и предлагаемой методикам. Расчет выполняется для осуществления процесса охлаждения диэтилового эфира от +25 °С до -10 °С в количестве 1,1 кг/с 24 % раствором хлорида кальция с начальной темпера-

турой  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и конечной  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  при противотоке. Приняты следующие обозначения:  $D_{\text{апп}}$  – внутренний диаметр аппарата;  $N_{\text{тр}}$  – число труб;  $F_{\text{ст}}$  – расчетная поверхность теплообмена по стандартной методике;  $F_{\text{рек}}$  – рекомендуемая для выбора поверхность теплообмена по стандартной методике;  $F_{\text{рас}}$  – расчетная поверхность теплообмена по предлагаемой методике;  $\Delta\alpha_{\text{тр}}$  – диапазон изменения расчетного коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве;  $\Delta\alpha_{\text{мтр}}$  – диапазон изменения расчетного коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве;  $Q_{\text{пот}}$  – потери по отношению к теплу, отданному эфиром;  $\Delta F_{\text{ст}}$  – разница значений расчетных поверхностей теплообмена по стандартной и предлагаемой методикам;  $\Delta F_{\text{рек}}$  – разница значений рекомендованной поверхностей теплообмена по стандартной методике и расчетной по предлагаемой методике.

Таблица 2

Число ходов	$D_{\text{апп}}$ , м	$N_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$ , м <sup>2</sup>	$F_{\text{рек}}$ , м <sup>2</sup>	$F_{\text{рас}}$ , м <sup>2</sup>	$\Delta\alpha_{\text{тр}}$ , %	$\Delta\alpha_{\text{мтр}}$ , %	$Q_{\text{пот}}$ , %	$\Delta F_{\text{ст}}$ , %	$\Delta F_{\text{рек}}$ , %
1	0,159	13	13,9	15,2	13,0	5,7	4,7	0,25	6,9	16,9
1	0,273	37	29,5	32,1	30,1	13,4	7,8	0,26	-2	6,6
1	0,4	111	45,2	49,7	49,7	13,2	7,1	0,23	-9,1	0
2	0,325	52	23,6	26,0	22,5	3,0	4,0	0,2	4,9	15,6

Разработанный подход допускает математическое моделирование температурных полей теплообменных аппаратов также при перекрестном и смешанном токе теплоносителей, но при этом математические модели значительно усложняются.

Далее в работе рассматривается методика математического моделирования нестационарного температурного поля емкостного аппарата с рубашкой, встроенным теплообменным устройством и перемешивающим устройством, аналогичная по своей структуре методике математического моделирования температурных полей кожухотрубчатого теплообменника, работающего в нестационарном температурном режиме.

Разработанный подход использован для математического моделирования температурных и концентрационных полей элементарных областей адсорбционного оборудования с неподвижным слоем сорбента.

Для случая, когда гранула сорбента имеет сферическую форму, температурное и концентрационное поле элементарной области сорбционного аппарата описывается следующими функциями:  $t_1(x, \tau)$  – температурное поле газового потока;  $t_{1s}$  – средняя температура газового потока;  $t(r, \tau)$  – температурное поле гранулы сорбента;  $t_k(r_1, \tau)$  – температурное поле стенки корпуса;  $c_1(x, \tau)$  – концентрационное поле газового потока;  $c_{1s}$  – средняя концентрация поглощаемого компонента в газовом потоке;  $c(r, \tau)$  – концентрационное поле гранулы сорбента. Здесь  $x$  – линейная координата, направленная вдоль оси аппарата;  $r$  – радиальная координата.

Функции  $t(r, \tau)$ ,  $t_k(r_1, \tau)$  и  $t_1(x, \tau)$  являются решениями соответствующих задач теплопроводности, функции  $c(r, \tau)$  и  $c_1(x, \tau)$  – решением задач диффузии

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} + W \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} + K t_1(x, \tau) = F(x, \tau); \quad (40)$$

$$t_1(0, \tau) = t_{10}(\tau); \quad t_1(x, 0) = f_1(x),$$

$$K = \frac{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2}{S \rho c}; \quad F(x, \tau) = \frac{\alpha_1 \Pi_1 t_{F1}(x, \tau) + \alpha_2 \Pi_2 t_{F2}(x, \tau)}{S \rho c};$$

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_c^2 \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c}, \quad 0 \leq r \leq R, \quad \tau > 0; \quad (41)$$

$$t(r, 0) = f(r); \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \lambda_c \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + \alpha_c (t(R, \tau) - t_c) = 0, \quad \alpha_c < 0.$$

$$\frac{\partial t_k(r_1, \tau)}{\partial \tau} = a_k^2 \left( \frac{\partial^2 t_k(r_1, \tau)}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial t_k(r_1, \tau)}{\partial r_1} \right), \quad r_k \leq r_1 \leq r_k + \delta_k, \quad \tau > 0; \quad (42)$$

$$t_k(r_1, 0) = f_t(r_1); \quad \lambda_k \frac{\partial t_k(r_k, \tau)}{\partial r_1} + \alpha_k (t_k(r_k, \tau) - t_1) = 0; \quad \alpha_k < 0;$$

$$\lambda_k \frac{\partial t_k(r_k + \delta_k, \tau)}{\partial r_1} + \alpha_{oc} (t_k(r_k + \delta_k, \tau) - t_{oc}) = 0;$$

$$\frac{\partial c_1(x, \tau)}{\partial \tau} + W \frac{\partial c_1(x, \tau)}{\partial x} + K_c c_1(x, \tau) = F_c(x, \tau); \quad (43)$$

$$c_1(0, \tau) = c_{10}(\tau); \quad c_1(x, 0) = f_{c1}(x),$$

где  $K_c = \frac{\beta \Pi}{S \rho}$ ;  $F_c(x, \tau) = \frac{\beta \Pi c_F(x, \tau)}{S \rho}$ .

$$\frac{\partial c(r, \tau)}{\partial \tau} = D_c^2 \left( \frac{\partial^2 c(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad 0 \leq r \leq R, \quad \tau > 0; \quad (44)$$

$$c(r, 0) = f_c(r); \quad \frac{\partial c(0, \tau)}{\partial r} < \infty; \quad D_c \frac{\partial c(R, \tau)}{\partial r} + \beta (c(R, \tau) - c^*) = 0;$$

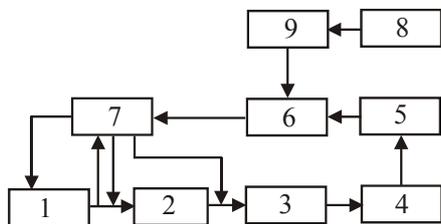
Путем экспериментальных исследований получены кинетические характеристики процессов сушки клеевых покрытий рулонных материалов и сушки волокнистых материалов, пропитанных латексными дисперсиями. Полученные экспериментальные результаты использованы при разработке ряда математических моделей процессов сушки и термообработки рулонных листовых и волокнистых материалов от растворов и органических растворителей. Результаты математического моделирования использованы при проектировании пропиточно-сушильного оборудования для обработки кордных материалов, линии производства конвейерных лент ЛПД-1600, линии обкладки каркасов ЛОК-1400, роторно-конвейерной линии АРКЛ.

Далее в диссертации приведены критериальные уравнения для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи для типовых условий работы рассматриваемого класса промышленного оборудования; обобщены особенности адаптации аналитических решений задач теплопроводности и диффузии к их компьютерной реализации; перечислены способы снижения погрешностей компьютерных вычислений сложных математических конструкций и операторов; рассмотрены возможные действия специалистов, выполняющих расчетные работы, при отсутствии части требуемых исходных данных.

В пятой главе "**Математическое моделирование технологического оборудования химической промышленности**" приводится описание ряда прикладных работ, выполненных по разработанной методике.

Решена задача оптимизации конструктивных и режимных параметров теплообменного оборудования, входящего в состав системы подготовки искусственной газовой смеси (СПИГС), которая предназначена для обеспечения работы дизель-энергетической установки (ДЭУ) без связи с внешней средой по специальному циклу, способной работать в течение заданного времени как на атмосферном воздухе, так и на охлажденных, очищенных и обогащенных кислородом выхлопных газах.

Теплообменное оборудование с учетом его положения в схеме и возможных связей между аппаратами представлено на рис. 6: 1 – ДЭУ; 2 – холодильник отработанных газов; 3 – конденсатор отработанных газов; 4 – блок адсорберов; 5 – конденсатор; 6 – буферная емкость; 7 – подогреватель ИГС; 8 – панель ГК; 9 – холодильник кислорода.



**Рис. 6 Теплообменное оборудование СПИГС с учетом его поло-**

рианное с тепловой емкостью оборудования;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  – скалярные весовые коэффициенты.

Результаты оптимизации теплообменного оборудования СПИГС ДЭУ мощностью 1500 кВт представлены в табл. 3. Здесь строки "а" соответствуют оптимальному решению, строки "б" – первоначальным проектными значениям.

При эксплуатации ДЭУ в подземных сооружениях или на подводных аппаратах типичны ситуации, при которых ограничены запасы воздуха либо охлаждающей воды, а пространство для размещения ограничено. Поэтому выбран комплексный критерий оптимальности  $\beta_1 \tilde{G}_x + \beta_2 \tilde{P} + \beta_3 \tilde{V} + \beta_4 \tilde{\tau} \rightarrow \min$ , в который входят безразмерные нормированные факторы, учитывающие:  $\tilde{G}_x$  – затраты охлаждающего агента;  $\tilde{P}$  – потери напора в теплообменном оборудовании;  $\tilde{V}$  – объемы аппаратов;  $\tilde{\tau}$  – время переходных процессов в теплообменном оборудовании, связанное с тепловой емкостью оборудования;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  – скалярные весовые коэффициенты.

Таблица 3

Аппарат		Длина трубки, м	Диаметр трубки, м	Диаметр корпуса, м	Толщина стенки трубки, м	Количество трубок
1 "Труба в трубе" (подогреватель исходной смеси)	а	7,1	0,42	0,721	0,003	1
	б	9	0,55	0,8	0,003	1
2 Кожухотрубчатый (охладитель отработанных газов)	а	8	0,038	1	0,002	323
	б	10,5	0,040	1	0,003	291
3 Кожухотрубчатый (конденсатор отработанных газов)	а	4,5	0,021	0,5	0,002	91
	б	6	0,0245	0,8	0,002	341
4 Кожухотрубчатый (холодильник кислорода)	а	2	0,0210	0,6	0,002	203
	б	4,5	0,0245	0,8	0,002	341

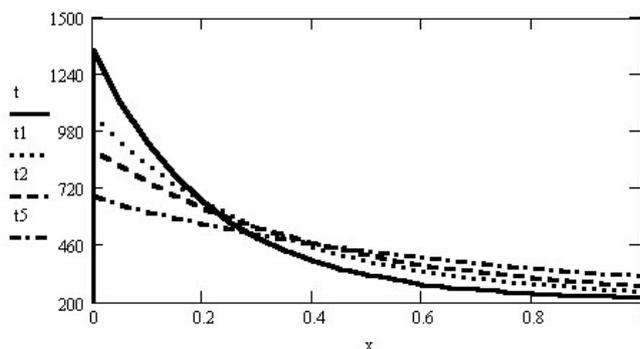
Результатом оптимизации теплообменного оборудования СПИГС является экономия хладагента от 5 до 15 % в зависимости от вида схемы СПИГС, условий эксплуатации, мощности ДЭУ и режимов работы.

На основе разработанной методики выполнено также определение режимов эксплуатации контактного аппарата при производстве анилина. Реакция синтеза анилина из нитробензола осуществляется в паровой фазе в присутствии катализатора и протекает с выделением значительного количества тепла. В то же время, перегрев катализатора недопустим, так как при этом резко снижается время его отработки. Переохлаждение также недопустимо, так как конденсация паров на катализаторе приводит к его отравлению. Таким образом, основной задачей при организации процесса получения анилина является обеспечение заданного температурного режима в реакционном пространстве.

Расчет выполнен для стационарного режима работы аппарата путем последовательного расчета температурных полей элементарных областей по длине реакционной зоны. В качестве элементарной

области выбран участок трубы трубного пучка, заполненный гранулами катализатора и омываемый теплоносителем в трубном пространстве.

Основные исходные данные для расчета температурного поля реакционной зоны контактного аппарата: внутренний диаметр аппарата – 2,758 м, внутренний диаметр трубки – 0,019 м, длина трубок – 2,32 м, количество трубок – 7394, температура в межтрубном пространстве – 175 °С, теплота реакции – 461000 Дж/моль, производительность по жидкому анилину при 20 °С –  $19,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, начальная температура паровой смеси – 225 °С, температура окружающей среды – 20 °С.



**Рис. 7** Распределение температур реагентов по длине реакционной зоны

В результате расчетов найдены следующие оптимальные условия работы аппарата: минимальная производительность циркуляционного насоса теплоносителя в межтрубном пространстве 70 м<sup>3</sup>/час; тепловая мощность, рассеиваемая в реакционной зоне – 964 кВт. Максимальная тепловая мощность, которая может быть отведена из реакционной зоны – 1145 кВт.

Расчетное распределение температур реагентов по длине реакционной зоны представлено на рис. 7. Здесь  $t$  – температура реагентов в отсутствии инертного компонента (водорода);  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_5$  – температуры при одно-, двух- и пятикратном объемном расходе инертного компонента соответственно.

**В приложениях** к диссертации приведены критериальные уравнения, используемые для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи в рассматриваемых случаях; аппроксимационные зависимости теплофизических характеристик воды, насыщенного водяного пара и воздуха; пример набора исходных данных и результатов теплового расчета емкостного аппарата, работающего в нестационарном режиме, в котором последовательно выполняется ряд операций; текст программы расчета кожухотрубчатого теплообменника; результаты испытаний СПИГС; справки об использовании результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основным результатом работы является научно обоснованная методология решения комплексной проблемы разработки аппаратного оформления многоассортиментных малотоннажных химических производств на основе математического моделирования полей целевых характеристик рабочих областей технологического оборудования.

При решении данной проблемы получены следующие результаты.

1 Выделен класс термонагруженных производственных процессов химических технологий, для которого осуществлена разработка новой унифицированной методологии расчета полей температур и концентраций в ходе стационарных, квазистационарных, переходных, циклических и нестационарных производственных операций. Методология основана на использовании аналитических решений систем линейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими условиями однозначности.

2 Впервые введено понятие элементарной области как области ограниченных размеров, рассматриваемой в течение короткого интервала времени, внутри которой присутствуют все виды целевого переноса, характерные для текущего процесса, и охватывающей как участки конструктивных элементов аппарата, влияющих на поля определяющих параметров, так и некоторые объемы заполняющих аппарат

сред. Полная совокупность элементарных областей составляет весь рабочий объем аппарата за заданный период времени.

3 Разработана новая методология математического моделирования температурных полей элементарных областей внутреннего пространства аппаратов, на основе которой решен комплекс задач моделирования для кожухотрубчатого теплообменного оборудования, емкостного оборудования и кожухотрубчатых контактных аппаратов, основанная на решении взаимосвязанных задач теплообмена.

4 Разработана новая методология математического моделирования взаимосвязанных температурных и концентрационных полей элементарных областей теплодиффузионных аппаратов, на основе которой решен комплекс задач моделирования для сорбционного оборудования с подвижным и неподвижным слоем сорбента, и ленточных сушилок для сушки гранулированных материалов.

5 Адаптирована для практического использования унифицированная методика решения задач теплопроводности и диффузии методом конечных интегральных преобразований, позволяющая получать аналитические решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности и диффузии для тел канонической формы, свойства которых меняются скачкообразно вдоль одной из пространственных координат (многослойные системы с произвольным числом слоев); для ограниченных тел канонической формы; для системы ограниченных тел канонической формы. Математические постановки задач включают произвольные начальные распределения и неоднородные несимметричные граничные условия 3-го рода на внешних границах. Кроме того, возможен учет распределенных внутренних источников тепла, мощность которых является функцией пространственных координат и времени; а также температуры окружающей среды, меняющейся в пространстве и времени.

6 По разработанной методике получен комплекс аналитических решений задач теплопроводности и диффузии в постановках, соответствующих условиям протекания тепло- и массообменных процессов в элементарных областях рассмотренного класса аппаратов.

Ряд аналитических решений получен впервые.

7 На основе методологии разработки аппаратурного оформления химических производств автором выполнен ряд работ по оптимизации конструктивных и режимных характеристик отдельных типов производственного оборудования. Использование результатов выполненных работ позволило повысить качество, надежность и эффективность конструкторских проработок и получить соответствующий экономический эффект, либо исключить неоправданные затраты материальных и энергетических ресурсов.

**Основные обозначения:**  $x, y, z, r$  – пространственные координаты, м;  $\tau$  – время, с;  $t$  – температура, °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $Q, q$  – тепловая мощность, количество тепла, Вт, Дж;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м · К);  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг · К);  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $G$  – массовый расход, кг/с;  $W$  – скорость, м/с;  $F$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – периметр, м;  $\mu, \eta, \gamma$  – собственные числа;  $J_0, J_1, Y_0, Y_1$  – функции Бесселя.

**Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, изложены в следующих публикациях:**

1 *Интенсификация сушки и термообработки рулонных материалов с помощью кратковременного инфракрасного теплоподвода* / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, В.Н. Затона, А.Г. Двойнин, В.М. Нечаев // Теплообмен ММФ: Тез. докл. Минск, 1988. Секция 11. С. 60 – 62.

2 *Коновалов В.И.* Особенности интенсивной сушки материалов, пропитанных дисперсиями или растворами / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, А.Г. Двойнин // Теплообмен ММФ: Тез. докл. Минск, 1988. Секция 7. С. 60 – 62.

3 *Коновалов В.И.* Исследование возможностей интенсификации процессов сушки клеевых покрытий / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, В.В. Косых // Повышение эффективности процессов и аппаратов: Тез. докл. VII Республик. конф. / ЛГПО, Львов, 1988. С. 23 – 24.

4 *Туголуков Е.Н.* Исследование способов ускорения сушки клеепромазанных тканей / Е.Н. Туголуков, В.В. Косых, М.Е. Уланов // Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш, 1988, № 1909-ХН88, Д.Н.Р.; 1989, № 2. С.

- 5 *Применение* решений многослойных задач тепло- и массопереноса в резинотехнике / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова, В.В. Косых. Деп. в ЦИНТИхимнефтемаше, № 3891. М., 1989. 18 с.
- 6 *Коновалов В.И.* Особенности интенсивной сушки материалов, пропитанных дисперсиями или растворами / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, А.Г. Двойнин // Теплообмен – ММФ: Избранные докл. Минск, 1989. Секции 6, 7. С. 152 – 165.
- 7 *Коновалов В.И.* Влияние параметров технологического режима на время охлаждения резиновых заготовок на барабанах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков // Реология, процессы и аппараты химической технологии: Межвед. сб. науч. тр. Волгоград, 1989.
- 8 *Кинетика* и оптимизация циклических тепловых процессов при вулканизации резиновых заготовок / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Г.Л. Немченко, Н.Ц. Гатапова // Деп. в ЦИНТИхимнефтемаше, № 2194. М., 1991. 34 с.
- 9 *Modelling of impregnating, drying and thermal treating of fibrous materials* / V.I. Konovalov, T.N. Tugolukov, A.G. Dvoinin, V.N. Zatona, I.L. Korobova, A.N. Pahomov, E.A. Sergeeva // Drying'91. New York: Hemisphere, 1991. P. 142 – 153.
- 10 *Problems of all-round optimizing of cooling and shrinking processes* / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov, A.G. Posternak, L.V. Prudnik, V.N. Zatona // Dechema'91: Preprints. Karlsruhe, Germany, 1991. P. 123 – 126.
- 11 *Tugolukov E.N.* Modelling of Drying of Webs from Organic Solvents / E.N. Tugolukov, V.V. Kosykh, V.I. Konovalov // VII Drying Sympoz. Lodz, 1991. Vol. 2. P. 206 – 214.
- 12 *Konovalov V.I.* Rheology in the processes of drying of fibrous materials / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov // Drying'91. New York: Elsevier, 1991. Vol. II. P. 41.
- 13 *Konovalov V.I.* Heating of dry and moist materials / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov // Drying'91: Preprint. New York: Elsevier, 1991. 21 p.
- 14 *Tugolukov E.N.* Solvents Drying into Air and Superheated Steam / E.N. Tugolukov, V.V. Kosykh, V.I. Konovalov // Int. Drying Symp. IDS'92: Preprint. Montreal. Aug. 4, 1992. 18 p.
- 15 *Туголуков Е.Н.* Адекватизация кинетики сушки / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, В.М. Нечаев // Труды 2-го ММФ по теплообмену. Киев, 1992. Т. 8. С. 119 – 121.
- 16 *Коновалов В.И.* Адекватизация качества высушиваемых материалов / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, В.М. Нечаев // Труды 2-го ММФ по теплообмену. Киев, 1992. Т. 8. С. 122 – 125.
- 17 *Konovalov V.I.* Drying of Solids. Part: Modelling of Drying of Fibrous Materials / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov // Раздел книги. New York: Int. Sci. Publ., 1993. 536 p.
- 18 *Cyclic heating processes for the modern equipment for rubber and plastic articles production* / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov, N.Z. Gatapova, G.L. Nemtchenko // CHISA'93, Paper: G8.25: Preprints. Praha, 1993. 13 p.
- 19 *Konovalov V.I.* Heating of drying moist materials into air and superheated steam flow / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov, V.V. Kosykh // CHISA'93, Paper: I4.6. Praha, 1993. Preprints. 21 p.
- 20 *Rheology in the processes of dipping, drying and stretching of fibrous materials* / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov, V.M. Netchaev, I.A. Kleshch, V.N. Zatona // CHISA'93, Paper: H3.42. Praha, 1993. Preprints. 13 p.
- 21 *Konovalov V.I.* Modelling of Drying with the Application of Temperature-Time and Temperature-Moisture Relationships / V.I. Konovalov, E.N. Tugolukov, N.Z. Gatapova // Int. Drying Symp. IDS'94. Gold Coast, Australia, PP. 291 – 306.
- 22 *Коновалов В.И.* О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1–2. С. 75 – 90.
- 23 *Коновалов В.И.* О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных тепло-диффузионных процессов в химических и других производствах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. 1995. Т. 1. № 3 – 4. С. 273 – 288.
- 24 *Коновалов В.И.* Циклические теплообменные процессы в химико-технологических устройствах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Пробл. докл. Межд. форум по ТМО. Минск,

1996. Т. XI. С. 50 – 54.

25 *Коновалов В.И.* Физические особенности и кинетика процессов тепломассообмена при сушке материалов от органических растворителей / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Пробл. докл. Межд. форум по ТМО, Минск, 1996. Т. VIII. С. 37 – 44.

26 *Konovarov V.I.* Interdependent Heat and Mass Transfer in Drying / V.I. Konovarov, E.N. Tugolukov, N.Z. Gatarova // Vol. B. IDS'96, Krakow. P. 1517.

27 *Исследование* процесса вибровращательного измельчения стружечных отходов металлообработки в порошковые материалы / А.Б. Мозжухин, Н.А. Чайников, И.А. Пискурев, Е.Н. Туголуков // Вестник ТГТУ. 1996. Т. 2. № 4. С. 421 – 426.

28 К расчету внешнего тепло- и массообмена при сушке и нагреве волокнистых материалов / В.И. Коновалов, С.С.С. Хануни, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова, И.Л. Коробова, Б.Н. Михайлов, Е.А. Сергеева // Вестник ТГТУ. 1997. Т. 3. № 1 – 2. С. 47 – 60.

29 К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики нагрева волокнистых материалов / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова, С.С.С. Хануни, И.Л. Коробова, А.Н. Пахомов, Е.А. Сергеева // Вестник ТГТУ. 1997. Т. 3. № 3. С. 224 – 236.

30 *Исследование* удельной поверхности металлических порошков, полученных вибровращательным способом измельчения / А.Б. Мозжухин, Н.А. Чайников, А.М. Климов, Е.Н. Туголуков // Вестник ТГТУ 1998. Т. 4, № 1. С. 104 – 107.

31 *Измельчение* стружковых отходов металлообработки вибровращательным способом / А.Б. Мозжухин, Н.А. Чайников, А.С. Клинов, Е.Н. Туголуков // Труды VI Региональной конф. "Проблемы химии и химической технологии" Воронеж. Т. 1. 1998. С. 102 – 105.

32 *Туголуков Е.Н.* Приближенное решение нелинейных задач теплопроводности / Е.Н. Туголуков // Материалы III международ. науч.-техн. конф. Омск, 1999. С. 246 – 247.

33 *Романенко В.Г.* Восстановление изображений по конечному числу дискретных отсчетов / В.Г. Романенко, Е.Н. Туголуков // Вестник ТГТУ 1999. Т. 5, № 2. С. 232 – 238.

34 *Егоров С.Я.* Использование графической информации в системах автоматизированного проектирования химических производств / С.Я. Егоров, Е.Н. Туголуков // XIII Международ. науч. конф. ММТТ-2000 "Математические методы в технике и технологиях". Т. 6. СПб., 2000, С. 281.

35 *Теплоотдача* в трубчатых теплообменниках дизель-энергетической установки, работающей по замкнутому газовому циклу / Е.Н. Малыгин, А.А. Кримштейн, Е.Н. Туголуков, С.Ю. Алексеев // Вестник ТГТУ. 2000. Т. 6, № 4. С. 617 – 623.

36 *Малыгин Е.Н.* Методика расчета теплообменного оборудования системы подготовки искусственной газовой смеси для дизельных энергетических установок / Е.Н. Малыгин, Е.Н. Туголуков, С.Ю. Алексеев // Вестник ТГУ. Серия "Естественные и технические науки". Вып. 5, 2000. Т. 5. С. 607 – 610.

37 *Туголуков Е.Н.* Оптимизация технологических показателей процесса вибровращательного измельчения / Е.Н. Туголуков, А.Б. Мозжухин, Н.А. Чайников // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 3. С. 464 – 472.

38 *Малыгин Е.Н.* Вопросы разработки аппаратного оформления многоассортиментных малотоннажных химических производств / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Е.Н. Туголуков // Материалы XV Международ. науч.-техн. конф. "Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии". Уфа, 2002. Т. 1. С. 140 – 142.

39 *Туголуков Е.Н.* Математическое моделирование тепловых процессов в биметаллических корпусах с каналами охлаждения / Е.Н. Туголуков, В.А. Богуш, А.Г. Ткачев // XV Международ. науч. конф. ММТТ-15 "Математические методы в технике и технологиях". Тамбов, 2002. Т. 8. С. 111 – 113.

40 *Туголуков Е.Н.* Моделирование теплопередачи в биметаллических аппаратах с каналами охлаждения в стенках / Е.Н. Туголуков, В.А. Богуш, А.Г. Ткачев // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9, № 1. С. 42 – 49.

41 *Туголуков Е.Н.* Методика математического моделирования нестационарных температурных по-

лей емкостного аппарата / Е.Н. Туголуков // Химическая промышленность. 2004. Т. 81, № 2. С. 84 – 92.

42 *Малыгин Е.Н.* Методология определения аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, Е.Н. Туголуков // Химическая промышленность. 2004. Т. 81, № 3. С. 148 – 156.

43 *Туголуков Е.Н.* Методика моделирования полей определяющих параметров производственного оборудования химической промышленности / Е.Н. Туголуков // Химическая промышленность. 2004, Т. 81, № 3. С. 157 – 164.

44 *Туголуков Е.Н.* Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств: Монография / Е.Н. Туголуков. М.: Машиностроение, 2004. 100 с.