

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

**КУРСОВАЯ РАБОТА
ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ
С ПРИМЕРАМИ РАСЧЕТА
И ОФОРМЛЕНИЯ**

Методическая разработка
для студентов второго курса специальности 101600

Тамбов
• Издательство ТГТУ •
2003

УДК 621.1.016(076)
ББК 3311я73-5
К 93

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент
В. А. Набатов

Сост.: В. И. Ляшков, С. Н. Кузьмин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 40 с

Методическая разработка составлена в соответствии с программой и учебным планом дисциплины "Теоретические основы теплотехники" и содержит задания по термодинамическому анализу наиболее характерных процессов и циклов, а также примеры расчета и оформления работы. Приводится список рекомендуемой литературы.

Предназначена для студентов 2 курса специальности 101600.

УДК 621.1.016(076)
ББК 3311я73-5

© Тамбовский государственный
2003

технический университет (ТГТУ),

**КУРСОВАЯ РАБОТА
ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ
С ПРИМЕРАМИ РАСЧЕТА
И ОФОРМЛЕНИЯ**



Учебное издание

**КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ
С ПРИМЕРАМИ РАСЧЕТА И ОФОРМЛЕНИЯ**

Методическая разработка

Составители:

ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич,

КУЗЬМИН Сергей Николаевич

Редактор Т. М. Глинкина

Компьютерное макетирование И. В. Евсеевой

Подписано к печати 12.03.2003

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага газетная

Печать офсетная. Объем: 2,32 усл. печ. л.; 2,2 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 164

Издательско-полиграфический центр ТГТУ

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Для стабилизации и укрепления положительных тенденций в развитии экономики нашей страны необходимо широкое обновление средств и методов производства, использование высокопроизводительных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, способных обеспечить выпуск конкурентоспособной на мировом рынке продукции. Такое оборудование и технологии отличаются наличием оптимальной теплоизоляции, широким применением приемов регенерации и утилизации тепла, трансформации различных видов энергии друг в друга.

Тепловые процессы получили самое широкое распространение в технике, и сегодня очень трудно назвать оборудование или технологию, где бы тепловая энергия не играла определяющей роли. Тепло используется как для выработки механической и электрической энергии, так и для проведения и интенсификации технологических процессов. Широкое распространение нашли также холодильные установки умеренного и глубокого охлаждения, установки для разделения воздуха, газотурбинные установки для дожигания вредных отходов и другое оборудование. Энергетическая эффективность и степень совершенства такого оборудования определяется тем, насколько широко и правильно был проведен термодинамический анализ еще на этапе их проектирования.

Для анализа процессов трансформации различных видов энергии в таких машинах и установках в термодинамике используется метод циклов, сущность которого состоит в том, что путем некоторого упрощения и идеализации реальных процессов рабочий процесс устройства описывают рядом последовательных термодинамических процессов, в результате которых рабочее тело (обычно газ или пар) приходит в первоначальное состояние. Такие круговые процессы или циклы могут повторяться неограниченное число раз, каждый раз сопровождаясь определенной трансформацией и перераспределением подводимой извне энергии.

Твердое знание основ термодинамической теории циклов является совершенно необходимым для специалистов, связанных с проектированием, доводкой, эксплуатацией и автоматизацией современных технологических процессов и оборудования, т.е. практически для всех инженерно-технических работников, не говоря уже о тех людях, которые выбрали благородную, интересную и очень важную профессию – обеспечивать теплом и светом жизнь и труд людей в нашей стране.

Общие методические указания и рекомендации

Курсовая работа по термодинамике выполняется студентами с целью закрепления и углубления учебного материала, изучаемого в первой части учебной дисциплины «Теоретические основы теплотехники». Выполнение работы прививает определенные навыки практического применения основных методик термодинамического анализа для расчетов термодинамических процессов, расширяет знания об идеализированных циклах реальных машин, позволяет на конкретных примерах усвоить методику энергетического анализа и расчета важнейших процессов и циклов. Работа включает решение четырех отдельных задач и выполняется в течение всего учебного семестра. Выполнение ее является обязательным условием положительной аттестации студента на зачетах.

Индивидуальное задание выдается каждому студенту в начале семестра в виде алфавитно-цифрового кода. При этом буквы указывают номер раздела, а стоящие рядом цифры – номера задач в этом разделе. Последние две цифры – это номер варианта каждой из задач. Например, шифр $a4b3c2d1-32$ означает, что студенту надлежит решить задачу 4 из раздела a , задачу 3 из раздела b , задачу 2 из раздела c и задачу 1 из раздела d и для всех задач принимать вариант 32.

Чтобы успешно подготовиться и выполнить курсовую работу необходимо:

- 1 Внимательно ознакомиться с содержанием задач, выписать их для себя, вставляя в общий текст

численные значения исходных данных из соответствующих таблиц. При этом учитывать, что первая часть исходных данных берется из таблицы по первой цифре варианта, а вторая – по второй.

2 По конспекту лекций изучить теоретический материал по соответствующим темам, обращая особое внимание на методики практических расчетов. Подобрать по списку рекомендованной литературы и получить в библиотеке университета один из учебников или учебное пособие «Теоретические основы теплотехники», подробно ознакомиться с описанием цикла или процесса, предложенного для анализа. Отдельные темы можно изучить по специальным электронным учебникам в компьютерном классе кафедры гидравлики и теплотехники.

3 Провести черновой расчет задач с помощью калькулятора и, если это необходимо, таблиц или $h-s$ диаграммы, соблюдая последовательность расчетов и самопроверок такими же, как они даются в приведенных ниже примерах.

4 В компьютерном классе кафедры гидравлики и теплотехники по специальным программам проверить правильность своих расчетов. Если погрешности выполненных расчетов не будут превышать предельных уровней, программа зафиксирует это в специальном зашифрованном файле и после этого можно оформлять отчет о работе.

5 Оформить отчет по курсовой работе в соответствии с требованиями стандарта ТГТУ [3], ориентируясь при этом на приведенные в настоящей методической разработке примеры.

6 Защитить работу перед комиссией из двух-трех преподавателей выпускающей кафедры.

7 Если при подготовительной работе или в процессе расчетов возникают вопросы или неясности, студенту необходимо обращаться к преподавателю за консультациями, которые организуются кафедрой еженедельно по специальному расписанию.

8 Рекомендуются необходимые расчеты проводить на компьютере, используя для этого алгоритмы, модули и процедуры из [4].

Приведем краткий перечень основных требований к оформлению отчета, вытекающих из [3]:

1 Отчет должен начинаться титульным листом, вторая страница – "Содержание", а завершаться списком использованной литературы.

2 Отчет должен быть написан черными, синими или фиолетовыми чернилами или пастой аккуратным, разборчивым почерком (или напечатан) на листах формата А4 (209 × 297, допускается на обеих сторонах листов с небольшими отклонениями по размерам). Каждый лист должен иметь рамку со штампом (см. [3], приложения 7, 8, с. 23, 24).

3 Графический материал (эскизы, диаграммы, графики) можно рисовать мягким карандашом на небольших листках миллиметровой бумаги, наклеивая их на страницы отчета. Каждый рисунок должен сопровождаться развернутой подписью.

4 Все расчеты оформляются в развернутом виде: сначала записывается формула, далее знак равенства и численные значения всех входящих в формулу параметров в той же последовательности, как они стоят в формуле, далее знак равенства и результат вычисления и его размерность, если это размерная величина.

5 Все расчеты проводятся в международной системе измерения физических величин (система СИ). Справочные данные из устаревших учебников или справочников выписываются так, как они приведены в первоисточнике и сразу же переводятся в систему СИ.

6 Расчетные формулы должны сопровождаться лаконичными пояснениями, включающими и полную расшифровку всех принятых условных обозначений.

7 Все справочные величины и отдельные важнейшие теоретические положения должны сопровождаться ссылками на использованные литературные источники.

Варианты заданий и исходные данные для расчетов

Раздел а. ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ЦИКЛОВ

Задача 1. Для цикла поршневого ДВС, заданного параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К; $\varepsilon = \underline{\hspace{1cm}}$; $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$; $\rho = \underline{\hspace{1cm}}$; $n_1 = \underline{\hspace{1cm}}$; $n_2 = \underline{\hspace{1cm}}$, определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину термического КПД η_t и максимальной температуры T_{\max} при варьировании указанного параметра в пределах $\pm 20\%$. По результатам расчетов построить графики зависимостей η_t и T_{\max} от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об его оптимальном значении, принимая за предельно допустимое значение T_{\max} величину $T_{\text{пр}} = \underline{\hspace{1cm}}$. Один из расчетов выполнить вручную (0 % отклонения), остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные принять по табл. 1. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух.

Задача 2. Для цикла газотурбинной установки, заданного параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К; $\beta = \underline{\hspace{1cm}}$; $\lambda = \underline{\hspace{1cm}}$; $\rho = \underline{\hspace{1cm}}$; $n_1 = \underline{\hspace{1cm}}$; $n_2 = \underline{\hspace{1cm}}$; исследовать влияния параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину термического КПД η_t и максимальной температуры цикла T_{\max} . Исследование провести, рассчитав значения η_t и T_{\max} при варьировании указанного параметра в пределах $\pm 20\%$. По результатам расчетов построить графики зависимостей η_t и T_{\max} от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об его оптимальном значении, приняв за предельное значение для T_{\max} величину $T_{\text{пр}} = \underline{\hspace{1cm}}$ К. Один из расчетов выполнить вручную (0 % отклонения), остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принять по табл. 2. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух.

Задача 3. Для цикла холодильной газовой машины, заданного параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К; $T_3 = \underline{\hspace{1cm}}$; $\beta = \underline{\hspace{1cm}}$; $\rho = \underline{\hspace{1cm}}$; $n_1 = \underline{\hspace{1cm}}$; исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину холодильного коэффициента ε и минимальную температуру цикла T_{\min} , рассчитав значения ε и T_{\min} при варьировании указанного параметра в пределах $\pm 20\%$. По результатам расчетов построить графики зависимостей ε и T_{\min} от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об его оптимальном значении, приняв за предельное значение для T_{\min} величину $T_{\text{пр}} = \underline{\hspace{1cm}}$ К. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух. Один из расчетов (0 %) выполнить вручную (0 % отклонения), остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принять по табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные к задаче 3 раздела а

Первая цифра номера варианта	p_1	T_1	T_3	Вторая цифра номера варианта	β	ρ	n_1	$T_{\text{пр}}$	Варируется
1	0,1 2	30 5	31 5	1	5,8 1	6,3 6	1,1 2	150	ε
2	0,1 1	31 0	32 5	2	6,1 0	5,3 9	1,2 5	160	λ
3	0,1 0	31 5	33 0	3	4,4 8	4,3 4	1,1 8	170	n_1
4	0,0 9	32 0	34 0	4	5,3 9	5,3 1	1,2 1	180	ρ
5	0,0 8	32 5	35 0	5	4,2 7	6,0 5	1,2 9	190	n_2

Задача 4. Для цикла идеального многоступенчатого компрессора, служащего для сжатия $\underline{\hspace{1cm}}$ и заданного параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К; $T_3 = \underline{\hspace{1cm}}$ К; $p_z = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $n = \underline{\hspace{1cm}}$, исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину работы на привод компрессора $l_{\text{пр}}$. Исследование провести численным способом, рассчитав значение $l_{\text{пр}}$ при

варьировании указанного параметра в пределах $\pm 20\%$. Построить график зависимости $l_{пр}$ от варьируемого параметра, на основании которого сделать заключение об оптимальном значении варьируемого параметра. Один из расчетов (0%) выполнить вручную, остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принять по табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные к задаче 4 раздела а

Первая цифра номера варианта	Название газа	p_1	T_1	Вторая цифра номера варианта	P_z	n	Варируется
1	Воздух	0,15	300	1	6,0	1,05	p_1
2	Азот	0,20	310	2	4,5	1,15	T_1
3	Кислород	0,00	320	3	3,6	1,12	p_z
4	Водород	8,11	330	4	2,9	1,09	n
5	Углекислый газ	0,12	340	5	5,1	1,21	T_1

Задача 5. Для цикла реального компрессора, служащего для сжатия ___ и заданного параметрами $p_{вс} = \text{___ МПа}$; $T_{вс} = \text{___ К}$; $\beta = \text{___}$; $\alpha = \text{___}$; $\Delta T_{1-2} = \text{___ К}$; $\Delta T_{2-3} = \text{___ К}$; $n_2 = \text{___}$; $Z = \text{___ 1/мин}$; $V_h = 0,03 \text{ м}^3$, исследовать влияние параметра ___ на объемный КПД $\eta_{об}$ и мощность на привод компрессора $N_{пр}$. Исследование провести численным способом, рассчитав значения $\eta_{об}$ и $N_{пр}$ при варьировании указанного параметра в пределах $\pm 20\%$. Построить графики зависимостей $\eta_{об}$ и $N_{пр}$ от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об его оптимальном значении с точки зрения наибольшей экономичности компрессора. Один из расчетов (0%) выполнить вручную, остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принимать по табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные к задаче 5 раздела а

цифра номера	Газ	$p_{вс}$	$T_{вс}$	α	β	цифра номера	ΔT_{1-2}	ΔT_{2-3}	n_2	z	Варируется
1	Воздух	0,08	280	0,03	4,38	1	15,0	2,55	1,12	700	β
2	Азот	0,09	290	0,04	5,36	2	20,5	3,05	1,15	750	ρ
3	CO ₂	0,10	300	0,05	6,12	3	25,4	3,52	1,20	800	λ

4	O ₂	0,1 1	310	0,0 6	5,8 7	4	30, 6	4,0 5	1,2 5	850	n_1
5	Возд ух	0,1 2	315	0,0 7	4,8 5	5	35, 1	4,5 4	1,1 8	900	n_2

Раздел *b*. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦИКЛОВ ПАРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Задача 1. Цикл Ренкина задан параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $p_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа. Исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину термического КПД цикла η_t и удельный расход тепла q , рассчитав эти величины при варьировании заданного параметра в пределах $\pm 20\%$. Построить графики зависимостей η_t и q от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об оптимальном его значении. Один из расчетов (0 %) выполнить вручную, остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принимать по табл. 6.

Таблица 6

Исходные данные к задаче 1 раздела *b*

Первая цифра номера варианта	p_1	t_1	Вторая цифра номера варианта	p_2	Варьируется
1	10,0	450	1	0,01	p_1
2	8,21	400	2	0,03	t_1
3	5,16	350	3	0,05	p_2
4	3,84	300	4	0,06	p_1
5	4,37	380	5	0,07	t_1

Задача 2. Теплоэнергетический цикл с промежуточным перегревом пара задан параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $p_{n1} = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $p_{n2} = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $t_{n1} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $t_{n2} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $p_k = 0,07$ МПа; $N = 2$. Определить, как изменяется

Таблица 7

Исходные данные к задаче 2 раздела *b*

Первая цифра номера варианта	p_1	t_1	P_{n1}	P_{n2}	Вторая цифра номера варианта	t_{n1}	t_{n2}	Варьируется
1	1,5	30 0	1,2	1,0	1	30 0	30 0	p_1
2	2,0	35 0	1,6	1,4	2	28 0	26 0	t_1
3	2,5	40 0	2,1	1,9	3	27 0	26 0	P_{n1}
4	3,0	45 0	2,6	2,3	4	26 0	26 0	t_1
5	3,5	50 0	2,9	2,5	5	25 0	24 0	p_{n1}

величина термического КПД цикла при варьировании параметра $\underline{\hspace{1cm}}$

в пределах $\pm 20\%$ относительно номинального значения. По результатам расчетов построить график зависимости η_t от варьируемого параметра, на основании которого сделать заключение об его оптимальном значении. Один из расчетов (0 %) выполнить вручную, остальные будут выполнены компьютером. Исходные данные для расчетов принимать по табл. 7.

Задача 3. Регенеративный цикл пароэнергетической установки задан параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $p_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа. Исследовать, как будет изменяться величина термического КПД η_t , если число ступеней отбора N изменять от двух до пяти ($N = 2, N = 3, N = 4, N = 5$), причем давления отбора определяются соотношением $p_{от i} = p_1 - i(p_1 - p_2)/(N - 1)$, где i – номер ступени отбора. Исследование провести численным способом, рассчитав значения η_t по общепринятой методике. Вариант при $N = 2$ рассчитать вручную, остальные варианты рассчитает компьютер. По результатам расчетов построить график зависимости $\eta_t = f(N)$, сделав по нему необходимые заключения. Исходные данные для расчетов принимать по табл. 8.

Таблица 8

Исходные данные к задаче 3 раздела b

Первая цифра номера варианта	p_1	t_1	Вторая цифра номера варианта	p_2
1	4,0	350	1	0,05
2	4,5	400	2	0,06
3	5,0	450	3	0,07
4	5,5	500	4	0,08
5	6,0	550	5	0,09

Раздел c. ПРОЦЕССЫ С ВЛАЖНЫМ ВОЗДУХОМ

Задача 1. Атмосферный воздух при температуре $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С и относительной влажности $\varphi_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ % предварительно нагревается до температуры $t_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С и затем направляется в адиабатическую сушильную камеру, где в процессе сушки материала температура воздуха уменьшается до $t_3 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С. Определить остальные параметры воздуха на выходе из сушилки и количество влаги Δm , которое удаляет каждый килограмм воздуха из высушиваемого материала. Исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину Δm , изменяя его на $\pm 20\%$. По результатам расчетов построить график зависимости Δm от варьируемого параметра, сделав необходимые выводы о влиянии его на эффективность работы сушилки. Один из вариантов расчета (0 %) выполнить вручную, остальные выдаст компьютер. Исходные данные для расчетов принять по табл. 9.

Таблица 9

Исходные данные к задаче 1 раздела c

Первая цифра номера варианта	t_1	φ_1	Вторая цифра номера варианта	t_2	T_3	Варьируется

1	20	45	1	65	35	t_1
2	22	50	2	70	40	φ_1
3	24	55	3	75	45	t_2
4	26	60	4	80	50	t_3
5	28	65	5	85	55	φ_1

Задача 2. Влажный воздух с параметрами $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа; $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С; $\varphi_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ % сжимается политропно ($n = 1,16$) в компрессоре до давления $p_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа, после чего охлаждается в специальном теплообменнике до температуры $t_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С. Определить, сколько влаги Δm (на каждый килограмм сухого воздуха) будет удалено в результате такого охлаждения.

Таблица 10

Исходные данные к задаче 2 раздела с

Первая цифра номера варианта	p_1	t_1	φ_1	Вторая цифра номера варианта	p_2	t_2	Варируется
1	0,09	20	60	1	0,30	30	t_1
2	0,10	22	65	2	0,35	35	φ_1
3	0,11	24	70	3	0,40	40	t_2
4	0,12	26	75	4	0,45	45	p_2
5	0,13	28	80	5	0,50	50	p_1

Исследовать влияние параметра $\underline{\hspace{1cm}}$ на величину Δm , варьируя его в пределах $\pm 20\%$. Один расчет выполнить вручную, остальные сделает компьютер. Исходные данные для расчета выбирать из табл. 10.

Задача 3. Влажный воздух, поступающий из сушилки в калорифер, имеет температуру $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С и влагосодержание $d_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ г/кг. Температура его на выходе из калорифера равна $t_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С. Определить остальные параметры влажного воздуха на выходе из калорифера. Как изменится относительная влажность φ_2 , если параметр $\underline{\hspace{1cm}}$ будет изменяться в пределах $\pm 20\%$? Один из вариантов расчета (0 %) выполнить вручную, остальные рассчитает компьютер. Исходные данные принять по табл. 11.

Таблица 11

Исходные данные к задаче 3 раздела с

Первая цифра номера варианта	t_1	d_1	Вторая цифра номера варианта	t_2	Варируется
1	25	15	1	60	t_1

2	30	20	2	65	$d1$
3	35	25	3	70	$t2$
4	40	30	4	75	$t1$
5	45	35	5	80	$d1$

Раздел *d*. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Задача 1. Воздух с давлением $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа и температурой $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением $p_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа. Принимая коэффициент скорости сопла $\varphi = \underline{\hspace{1cm}}$, определить характер течения, скорость воздуха на выходе и диаметр выходного сечения $d_{\text{вых}}$, если массовый расход воздуха $M = \underline{\hspace{1cm}}$ кг/с. Как изменятся эти характеристики, если параметр $\underline{\hspace{1cm}}$ изменять в пределах $\pm 20\%$? По результатам расчетов построить график зависимости $d_{\text{вых}}$ от варьируемого параметра и сделать необходимые выводы. Один расчет (0 %) выполнить вручную, остальные выдаст компьютер. Исходные данные принимать по табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные к задаче 1 раздела *d*

Первая цифра номера варианта	p_1	t_1	φ_1	Вторая цифра номера варианта	p_2	M	Варируется
1	2,0	50	0,8 9	1	0,9 1	0,1 7	M
2	3,0	60	0,7 2	2	0,0 9	0,2 1	p_2
3	1,2	70	0,8 3	3	0,3 2	0,1 2	t_1
4	3,4	55	0,7 8	4	0,4 5	0,1 9	p_1
5	2,5	45	0,8 4	5	0,1 8	0,1 5	φ

Задача 2. Водяной пар с давлением $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа и температурой $t_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ °С вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением $p_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа. Определить скорость его на выходе и расход пара, если выходной диаметр сопла $d = \underline{\hspace{1cm}}$ мм, а коэффициент скорости $\varphi = \underline{\hspace{1cm}}$. Как будет изменяться расход пара, если параметр $\underline{\hspace{1cm}}$ изменять в пределах $\pm 20\%$? Каким он будет, если использовать сопло Лавала с минимальным диаметром d ? По результатам расчетов построить график зависимости расхода пара от варьируемого параметра. Один расчет (0 %) выполнить вручную, остальные сделает компьютер. Исходные данные принимать по табл. 13.

Таблица 13

Исходные данные к задаче 2 раздела *d*

Работа защищена	Оценка _____	
Члены комиссии:	_____	С. Н. Кузьмин
	(подпись, дата)	(инициалы, фамилия)
	_____	В. И. Быченко
	(подпись, дата)	(инициалы, фамилия)
	_____	Б. В. Панков
	(подпись, дата)	(инициалы, фамилия)
Нормоконтролер	_____	В. А. Русин
	(подпись, дата)	(инициалы, фамилия)

Тамбов 2003
СОДЕРЖАНИЕ*

1	Задача	№	3
1		
1.1	Содержание задачи	№	1 3
1.2	Краткое описание цикла поршневого ДВС		3
1.3	Расчет цикла ДВС		5
1.3.1	Определение параметров характерных точек цикла		5
1.3.2	Расчет термодинамических процессов		7
1.3.3	Расчет характеристик цикла		9
1.3.4	Построение $T-s$ диаграммы цикла		11
1.4	Оптимизация цикла варьированием заданного параметра		13
1.4.1	Анализ результатов машинного расчета		14
2	Задача	№	15
2		
2.1	Содержание задачи	№	2 15
2.2	Краткое описание цикла		15
2.3	Расчет цикла		16
2.3.1	Определение параметров характерных точек цикла		16
2.3.2	Расчет термического КПД цикла		18

* 1 Номера страниц в этом примере содержания даны произвольно.

2 В нижеследующем примере приведено только решение задач № 1 и 2, а также список использованной литературы.

3 В примере принята собственная нумерация формул, таблиц и литературных источников.

2.4	Результаты	варьирования	и их анализ	19
.....				
3	Задача	№	3	20
.....				
3.1	Содержание	задачи	№	3 20
.....				
3.2	Расчет	процесса с	влажным воздухом	21
.....				
3.3	Результаты	варьирования		22
.....				
4	Задача	№	4	23
.....				
4.1	Содержание	задачи	№	4 23
.....				
4.2	Расчет	процесса истечения	и сопла	23
.....				
4.3	Результаты	варьирования		25
.....				
5	Список	использованной	литературы	26
.....				

Задача № 1

1.1 Содержание задачи № 1 (вариант 14)

Для цикла поршневого ДВС, заданного параметрами $p_1 = 0,14$ МПа; $T_1 = 300$ К; $\varepsilon = 18$; $\lambda = 1,3$; $\rho = 1,39$; $n_1 = 1,31$; $n_2 = 1,24$, определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исследовать влияние параметра n_1 на величину термического КПД η_t и максимальной температуры T_{\max} при варьировании указанного параметра в пределах 20 %. По результатам расчетов построить графики зависимостей η_t и T_{\max} от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об его оптимальном значении, принимая за предельно допустимое значение T_{\max} величину $T_{\text{пр}} = 1900$ К. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух.

1.2 Краткое описание цикла

Для анализа задан цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла, который реализуется в современных быстроходных дизельных двигателях. Подробное описание такого цикла приведено в учебниках [1, 2] и др. Мы ограничимся самым кратким описанием.

На рис. 1 приведена идеализированная p - v диаграмма, наглядно отображающая основные процессы такого цикла.

ВО ВРЕМЯ ХОДА ВСАСЫВАНИЯ (НА ДИАГРАММЕ НЕ ПОКАЗАН) АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ, ПРОХОДЯ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ФИЛЬТРОВ И ОТКРЫТЫЙ ВСАСЫВАЮЩИЙ КЛАПАН, ЗАСАСЫВАЕТСЯ В ЦИЛИНДР ДВИГАТЕЛЯ. В КОНЦЕ ВСАСЫВАНИЯ (ТОЧКА 1 НА ДИАГРАММЕ) ВСАСЫВАЮЩИЙ КЛАПАН ЗАКРЫВАЕТСЯ И ПО МЕРЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОРШНЯ К ВЕРХНЕЙ МЕРТВОЙ ТОЧКЕ (ВМТ) ПРОИСХОДИТ ПОЛИТРОПНОЕ СЖАТИЕ ВОЗДУХА (ПРОЦЕСС 1-2). ВВИДУ БЫСТРОТЕЧНОСТИ ЭТОГО ПРОЦЕССА ХАРАКТЕР ЕГО БЛИЗОК К АДИАБАТНОМУ, И ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА К КОНЦУ СЖАТИЯ (ТОЧКА 2) СИЛЬНО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. ПОЭТОМУ ДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО, КОТОРОЕ ВПРЫСКИВАЕТСЯ В ЦИЛИНДР ПОД БОЛЬШИМ ДАВЛЕНИЕМ ЧЕРЕЗ СПЕЦИАЛЬНУЮ ФОРСУНКУ В МЕЛКОДИСПЕРСНОМ ВИДЕ, ОЧЕНЬ БЫСТРО ИСПАРЯЕТСЯ И САМОВОСПЛАМЕНЯЕТСЯ. ПЕРВЫЕ ПОРЦИИ ПРИ ЭТОМ СГОРАЮТ ПРАКТИЧЕСКИ МГНОВЕННО (ПРОЦЕСС 3-4). ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВО ЧАСТО ВПРЫСКИВАЮТ В СПЕЦИАЛЬНУЮ ПРЕДКАМЕРУ ИЗ ЖАРОСТОЙКОЙ СТАЛИ, ИМЕЮЩУЮ ОЧЕНЬ ВЫСОКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ.

Последующие порции топлива сгорают по мере их попадания в цилиндр во время перемещения поршня от ВМТ. При этом давление в цилиндре практически не изменяется (процесс 3-4). Далее совершается политропное расширение продуктов сгорания (процесс 4-5), по окончании которого, когда поршень приходит в нижнюю мертвую точку, открывается выпускной клапан (точка 5) и во время хода выталкивания продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Поскольку суммарная работа процессов всасывания и выталкивания практически равна нулю, идеализируя картину, их заменяют одним изохорным процессом отвода тепла (процесс 5-1).

ОСНОВНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЦИКЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- степень сжатия $\varepsilon = v_1 / v_2$;
- степень повышения давления $\lambda = p_3 / p_2$;
- степень предварительного расширения $\rho = v_4 / v_3$;
- показатели политроп сжатия и расширения n_1 и n_2 .

1.3 Расчет цикла ДВС*

1.3.1 Определение параметров характерных точек цикла

Точка 1. Параметры p_1 и T_1 заданы, величину v_1 находим, воспользовавшись уравнением состояния идеального газа (уравнением Клапейрона-Менделеева):

$$pv = RT, \quad (1)$$

где $R = 287$ Дж/(кг · К) – газовая постоянная воздуха [3].

Для точки 1

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 277}{0,13 \cdot 10^6} = 0,61 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2. Поскольку $\varepsilon = v_1 / v_2$, то $v_2 = v_1 / \varepsilon = 0,61 / 16,7 = 0,037 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Давление p_2 найдем, записав для политропного процесса 1-2 известное соотношение

$$p_1 v_1^{n1} = p_2 v_2^{n1},$$

откуда

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n1} = p_1 \varepsilon^{n1} = 0,13 \cdot 16,7^{1,22} = 4,03 \text{ МПа.}$$

Величину T_2 находим из уравнения (1):

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{4,03 \cdot 10^6 \cdot 0,037}{287} = 519,5 \text{ К.}$$

Точка 3. $p_3 = p_2 \cdot \lambda = 4,03 \cdot 1,2 = 4,83 \text{ МПа}$; $v_3 = v_2 = 0,037 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Температуру T_3 находим из уравнения (1):

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R} = \frac{4,83 \cdot 10^6 \cdot 0,037}{287} = 622,6 \text{ К.}$$

Поскольку для изохорного процесса известно соотношение (закон Шарля) $p_3/p_2 = T_3/T_2$, то величину T_3 можно найти и по-другому:

$$T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = T_2 \lambda = 519,5 \cdot 1,2 = 623,4 \text{ К.}$$

Практическое совпадение результатов (невязка около 0,1 % возникает из-за округлений) служит подтверждением безошибочности проведенных вычислений.

Точка 4. $p_4 = p_3 = 4,83 \text{ МПа}$; $v_4 = v_3 \rho = 0,037 \cdot 1,3 = 0,048 \text{ м}^3/\text{кг}$. Температуру T_4 найдем, воспользовавшись известным соотношением для изобарных процессов (закон Гей-Люсака): $v_3/v_4 = T_4/T_3$, откуда $T_4 = T_3 v_4/v_3 = T_3 \rho = 622,6 \cdot 1,3 = 808,6 \text{ К}$.

Точка 5. $v_5 = v_1 = 0,61 \text{ м}^3/\text{кг}$. Давление в точке 5 найдем так же, как находили его для точки 2:

$$p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{n2} = 4,83 \left(\frac{0,048}{0,61} \right)^{1,16} = 0,25 \text{ МПа.}$$

Температуру T_5 находим, воспользовавшись уравнением состояния:

$$T_5 = \frac{p_5 \cdot v_5}{R} = \frac{0,25 \cdot 10^6 \cdot 0,61}{287} = 531,3 \text{ К.}$$

Полученные результаты заносим в сводную таблицу (табл. 1).

* В настоящем расчете все исходные параметры задания уменьшены в 1,08 раза, чтобы вариант 14 оставался доступным для работы.

1.3.2 Расчет термодинамических процессов

Полный термодинамический расчет процесса включает определение тепла q и работы l за процесс, изменений внутренней энергии u , энтальпии h и энтропии s за процесс. Для политропного процесса расчетные формулы для названных характеристик имеют вид:

$$q = c_{vm}|_{t_H}^{t_K} \frac{n-k}{n-1} (T_K - T_H); \quad (2)$$

$$l = \frac{R}{n-1} (T_H - T_K); \quad (3)$$

$$\Delta u = c_{vm}|_{t_H}^{t_K} (T_K - T_H); \quad (4)$$

$$\Delta h = c_{pm}|_{t_H}^{t_K} (T_K - T_H); \quad (5)$$

$$\Delta s = c_{vm}|_{t_H}^{t_K} \ln \frac{T_K}{T_H} + R \ln \frac{v_K}{v_H}, \quad (6)$$

где $c_{vm}|_{t_H}^{t_K}$, $c_{pm}|_{t_H}^{t_K}$ – средние изохорная и изобарная теплоемкости в интервале температур от t_H до t_K (температуры в начале и в конце процесса); k – показатель адиабаты,

$$k = c_{vm}|_{t_H}^{t_K} / c_{pm}|_{t_H}^{t_K} \quad T_H = t_H + 273,15; \quad T_K = t_K + 273,15;$$

где v_H и v_K – удельный объем в начале и конце процесса.

Величины средних теплоемкостей, если использовать линейные зависимости, можно рассчитать по формулам:

$$c_{vm}|_{t_H}^{t_K} = a + b(t_H + t_K), \quad (7)$$

где константы a и b для воздуха находим из справочной таблицы [3]: $a = 0,7084$, $b = 9,349 \cdot 10^{-5}$. По формуле Майера:

$$c_{pm}|_{t_H}^{t_K} = c_{vm}|_{t_H}^{t_K} + R. \quad (8)$$

Рассчитываем теперь процесс 1-2. Это политропный процесс с показателем политропы $n_1 = 1,22$. Чтобы реализовать формулы (2 – 6), сначала по формулам (7) и (8) рассчитываем значения средних теплоемкостей, предварительно рассчитав t_1 и t_2 :

$$t_1 = T_1 - 273,15 = 277,8 - 273,15 = 4,7 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_2 = T_2 - 273,15 = 519,5 - 273,15 = 246,3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$c_{vm}|_{t_1}^{t_2} = a + b(t_1 + t_2) = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5} \cdot (4,7 + 246,3) = 0,732 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = c_{vm}|_{t_1}^{t_2} + R = 0,732 + 287 \cdot 10^{-3} = 1,02 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad k = \frac{1,02}{0,732} = 1,39.$$

Тепло за процесс 1-2 находим по формуле (2):

$$q_{1-2} = c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \frac{n_1 - k}{n_1 - 1} (T_2 - T_1) = 0,732 \frac{1,22 - 1,39}{1,22 - 1} (519,5 - 277,8) = -136,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Работа за процесс 1-2 находится по формуле (3):

$$l_{1-2} = \frac{R}{n_1 - 1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{1,22 - 1} (277,8 - 519,5) \cdot 10^{-3} = -315,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Изменения внутренней энергии и энтальпии рассчитываем по формулам (4) и (5):

$$\Delta u_{1-2} = c_{vm}|_{t_1}^{t_2} (T_2 - T_1) = 0,732 \cdot (519,5 - 277,8) = 176,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{1-2} = c_{pm}|_{t_1}^{t_2} (T_2 - T_1) = 1,02 \cdot (519,5 - 277,8) = 246,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

По формуле (6) находим величину ΔS_{1-2} :

$$\begin{aligned} \Delta S_{1-2} &= c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = \\ &= 0,732 \cdot \ln \frac{519,5}{277,8} + 287 \cdot 10^{-3} \ln \frac{0,037}{0,61} = -0,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Чтобы убедиться в правильности проведенных расчетов, запишем выражение первого закона термодинамики, рассчитаем величину Δu_{1-2} и сопоставим с рассчитанной ранее:

$$\Delta u_{1-2} = q_{1-2} - l_{1-2} = -136,7 - (-315,3) = 178,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Невязка в процентах

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta u_{1-2})|}{\Delta u_{1-2}} \cdot 100 = \frac{|176,9 - 178,6|}{176,9} \cdot 100 = 0,96 \text{ } \%$$

Расчет процесса 2-3 начинаем также с определения величин t_3 , $c_{vm}|_{t_2}^{t_3}$ и $c_{pm}|_{t_2}^{t_3}$:

$$t_3 = T_3 - 273,15 = 622,6 - 273,15 = 349,5 \text{ C};$$

$$c_{vm}|_{t_2}^{t_3}(a + b(t_2 + t_3)) = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5}(246,3 + 349,5) = 0,76 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{pm}|_{t_2}^{t_3} = c_{vm}|_{t_2}^{t_3} + R = 0,76 + 287 \cdot 10^{-3} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Поскольку процесс 2-3 изохорный (у таких процессов значение $n = \pm \infty$), формулы (2), (3) и (6) существенно упрощаются, позволяя рассчитывать значения соответствующих величин:

$$q_{2-3} = c_{vm}|_{t_2}^{t_3}(T_3 - T_2) = 0,76(622,6 - 519,5) = 78,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta u_{2-3} = q_{2-3} = 78,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{2-3} = c_{pm}|_{t_2}^{t_3}(T_3 - T_2) = 1,05 \cdot (622,6 - 519,5) = 108,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta S_{2-3} = c_{vm}|_{t_2}^{t_3} \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,76 \cdot \ln \frac{622,6}{519,5} = 0,13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для самопроверки воспользуемся известным соотношением, справедливым для любых процессов с идеальным газом:

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(pv), \quad (9)$$

которое для процесса 2-3 принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta h_{2-3} &= \Delta u_{2-3} + (p_3 v_3 - p_2 v_2) = 78,4 + 10^{-3}(4,83 \cdot 10^6 \cdot 0,037 - \\ &- 4,03 \cdot 10^6 \cdot 0,037) = 108,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Невязка составляет незначительную величину:

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta h_{2-3})|}{\Delta h_{2-3}} \cdot 100 = \frac{|108,3 - 108,0|}{108,3} \cdot 100 = 0,3 \text{ \%}.$$

Процесс 3-4 изобарный и для него показатель политропы $n = 0$. Это тоже упрощает формулы (2) и (3). Расчеты начинаем с определения температуры t_4 и теплоемкостей:

$$t_4 = T_4 - 273,15 = 808,6 - 273,15 = 535,4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c_{vm}|_{t_3}^{t_4} = a + b(t_3 + t_4) = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5}(349,5 + 535,4) = 0,79 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{pm}|_{t_3}^{t_4} = c_{vm}|_{t_3}^{t_4} + R = 0,79 + 0,287 = 1,08 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Определяем теперь характеристики процесса 3-4:

$$q_{3-4} = c_{pm}|_{t_3}^{t_4} (T_4 - T_3) = 1,08(808,6 - 622,6) = 200,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$l_{3-4} = R(T_4 - T_3) = 287 \cdot 10^{-3}(808,6 - 622,6) = 53,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta u_{3-4} = c_{vm}|_{t_3}^{t_4} (T_4 - T_3) = 0,79(808,6 - 622,6) = 146,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{3-4} = q_{3-4} = 200,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta S_{3-4} = c_{pm}|_{t_3}^{t_4} \ln \frac{T_4}{T_3} = 1,08 \cdot \ln \frac{0,046}{0,037} = 0,283 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Проверку проведем обоими способами, воспользовавшись и формулой (9):

$$\Delta u_{3-4} = q_{3-4} - l_{3-4} = 200,9 - 53,4 = 147,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta u_{3-4})|}{\Delta u_{3-4}} 100 = \frac{|146,9 - 147,5|}{146,9} 100 = 0,4 \%;$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{3-4} &= \Delta u_{3-4} + (p_4 v_4 - p_3 v_3) = \\ &= 146,9 + 10^{-3}(4,83 \cdot 10^6 \cdot 0,048 - 4,83 \cdot 10^6 \cdot 0,037) = 200,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta h_{3-4})|}{\Delta h_{3-4}} 100 = \frac{200,9 - 200,0}{200,9} 100 = 0,4 \%.$$

Чтобы рассчитать процесс 4-5, рассчитываем температуру t_5 и $c_{vm}|_{t_4}^{t_5}$ и $c_{pm}|_{t_4}^{t_5}$ по формулам (7) и (8):

$$t_5 = T_5 - 273,15 = 531,3 - 273,15 = 258,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$c_{vm}|_{t_5}^{t_1} = a + b(t_4 + t_5) = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5}(535,4 + 258,2) = 0,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{pm}|_{t_5}^{t_1} = c_{vm}|_{t_5}^{t_1} + R = 0,78 + 287 \cdot 10^{-3} = 1,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$k = c_{pm}|_{t_5}^{t_1} / c_{vm}|_{t_5}^{t_1} = \frac{1,07}{0,78} = 1,37.$$

Далее рассчитываем характеристики процесса 4-5 по формулам (2 – 6):

$$q_{4-5} = c_{vm}|_{t_5}^{t_1} \frac{n_2 - k}{n_2 - 1} (T_5 - T_4) = 0,78 \frac{1,16 - 1,37}{1,16 - 1} (531,3 - 808,6) = 283,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$l_{4-5} = \frac{R}{n_2 - 1} (T_4 - T_5) = \frac{287 \cdot 10^{-3}}{1,16 - 1} \cdot (808,6 - 531,3) = 497,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta u_{4-5} = c_{vm}|_{t_5}^{t_1} (T_5 - T_4) = 0,78(531,3 - 808,6) = -216,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{4-5} = c_{pm}|_{t_5}^{t_1} (T_5 - T_4) = 1,07(531,3 - 808,6) = -296,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{4-5} &= c_{vm}|_{t_5}^{t_1} \ln \frac{T_5}{T_4} + R \cdot \ln \frac{p_5}{p_4} = \\ &= 0,78 \cdot \ln \frac{531,8}{808,6} + 287 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{0,61}{0,048} = 0,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Проверка:

$$\Delta u_{4-5} = q_{4-5} - l_{4-5} = 283,9 - 497,4 = -213,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta u_{4-5})|}{\Delta u_{4-5}} 100 = \frac{|-216,3 + 213,5|}{216,3} 100 = 1,3 \%$$

Рассчитываем, наконец, последний процесс 5-1. Это процесс изохорный и расчет его аналогичен расчету процесса 2-3. Начинаем, как обычно, с расчета теплоемкостей:

$$c_{vm}|_{t_5}^{t_1} = a + b(t_5 + t_1) = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5} (258,2 + 4,7) = 0,73 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{pm}|_{t_5}^{t_1} = c_{vm}|_{t_5}^{t_1} + R = 0,73 + 287 \cdot 10^{-3} = 1,02 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Основные характеристики процесса:

$$q_{5-1} = c_{vm}|_{t_5}^{t_1} (T_5 - T_1) = 0,73(277,8 - 531,3) = -185,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$l_{5-1} = 0; \quad \Delta u_{5-1} = q_{5-1} = -185,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{5-1} = c_{pm} \Big|_{t_5}^{t_1} (T_5 - T_1) = 1,02(277,8 - 531,3) = -258,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta S_{5-1} = c_{pm} \Big|_{t_5}^{t_1} \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,73 \cdot \ln \frac{277,8}{531,3} = -0,47 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Проверку проведем по формуле (9):

$$\begin{aligned} \Delta h_{5-1} &= \Delta u_{5-1} + (p_1 v_1 - p_5 v_5) = -185,0 + 10^{-3} (0,13 \cdot 10^6 \cdot 0,61 - \\ &- 0,25 \cdot 10^6 \cdot 0,61) = -257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Погрешность

$$\delta = \frac{|\Delta(\Delta h_{5-1})|}{\Delta h_{5-1}} 100 = \frac{|-258,6 + 257|}{258,6} 100 = 0,62 \text{ \%}.$$

Прежде чем перейти к расчетам характеристик цикла, рассчитываем сначала значения энтропии в каждой характерной точке цикла. Для точки 1 можно записать

$$S_1 = c_{pm} \Big|_{t_0}^{t_1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} - R \cdot \ln \frac{p_1}{p_0},$$

где $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273,15 \text{ К}$); $p_0 = 0,1013 \text{ МПа}$ – параметры воздуха при нормальных условиях; при таком состоянии считается, что $S = 0$.

$$\begin{aligned} c_{pm} \Big|_{t_0}^{t_1} &= c_{vm} \Big|_{t_0}^{t_1} + R = a + b(t_0 + t_1) + R = \\ &= 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5} \cdot (0 + 4,7) + 0,287 = 1,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \end{aligned}$$

$$S_1 = 1,01 \cdot \ln \frac{277,8}{273,15} - 287 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{0,13}{0,1013} = 0,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Далее находим

$$S_2 = S_1 + \Delta S_{1-2} = 0,05 - 0,35 = -0,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$S_3 = S_2 + \Delta S_{2-3} = -0,3 + 0,13 = -0,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$S_4 = S_3 + \Delta S_{3-4} = -0,17 + 0,28 = 0,11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$S_5 = S_4 + \Delta S_{4-5} = 0,11 + 0,4 = 0,51 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

или

$$S_5 = S_1 - \Delta S_{5-1} = 0,05 - (-0,47) = 0,52 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Практическое совпадение значений S_5 , рассчитанных двумя способами, свидетельствует об отсутствии заметных погрешностей при расчетах величин ΔS .

Все результаты заносим в табл. 1.

1.3.3 Расчет характеристик цикла

Тепло за цикл

$$\begin{aligned} q_{\text{ц}} &= q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-5} + q_{5-1} = \\ &= -136,7 + 78,4 + 200,9 + 283,9 - 185,0 = 241,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Работа за цикл

$$l_{\text{ц}} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1} = -315,3 + 0 + 53,4 + 497,4 + 0 = 235,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Известно, что за цикл $q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}$. В наших расчетах несовпадение незначительно. Невязка объясняется округлениями в промежуточных расчетах.

$$\delta = \frac{|q_{\text{ц}} - l_{\text{ц}}|}{q_{\text{ц}}} 100 = \frac{241,5 - 235,5}{241,5} 100 = 2,5 \%$$

Количество подведенного тепла

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-5} = 78,4 + 200,9 + 283,9 = 563,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Найдем изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии за цикл. Теоретически эти изменения должны быть равными нулю.

$$\begin{aligned} \Delta u_{\text{ц}} &= \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-5} + \Delta u_{5-1} = \\ &= 176,9 + 78,4 + 147,5 - 216,3 - 185,0 = 1,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta h_{ц} &= \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-5} + \Delta h_{5-1} = \\ &= 246,5 + 108,3 + 200,9 - 296,7 - 258,6 = 0,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta S_{ц} &= \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} + \Delta S_{3-4} + \Delta S_{4-5} + \Delta S_{5-1} = \\ &= -0,35 + 0,13 + 0,28 + 0,4 = -0,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.\end{aligned}$$

Некоторые отличия рассчитанных величин от нулей объясняются округлениями при расчетах. Естественно, что сопоставлять невязку, например, нужно не с нулем, а с любым слагаемым, входящим в сумму. И тогда видно, что невязка и здесь составляет доли процента.

Рассчитываем термический КПД цикла

$$\eta_t = -\frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{235,5}{563,2} = 0,42.$$

Рассчитываем термический КПД идеализированного цикла с адиабатными процессами сжатия и расширения по формуле, приведенной в [1] и принимая в среднем $k = 1,39$:

$$\begin{aligned}\eta_{тц} &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1,0}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} = \\ &= 1 - \frac{1}{16,7^{1,39}} \frac{1,2 \cdot 1,3^{1,39} - 1,0}{(1,2 - 1) + 1,39 \cdot 1,2(1,3 - 1)} = 0,65.\end{aligned}$$

Термический КПД цикла Карно для того же интервала температур, в котором реализуется реальный цикл

$$\eta_{тк} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{277,8}{808,6} = 0,66.$$

Результаты расчетов заносим в сводную таблицу.

Таблица 1

Сводная таблица исходных данных и результатов расчета

Наименование		Значения параметров			
		p , МПа	v , м ³ /кг	T , К	S , кДж/(кг·К)
Параметры точек	1	0,13	0,61	277,8	0,05
	2	4,03		519,5	-0,3
	3	4,83	0,037	622,6	-0,17
	4	4,83		808,6	0,11
	5	0,25	0,037	531,3	0,51

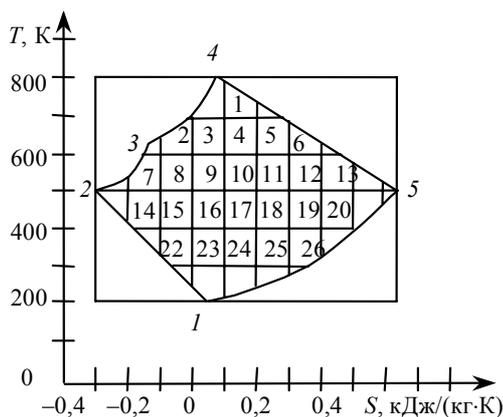
			0,048	
			0,61	

Продолжение табл. 1

Наименование		Значения параметров				
		q	l	Δu	Δh	ΔS
Характеристики процессов	1-2	–	–	176,9	246,5	–0,35
	2-3	136,7	315,3	78,4	108,3	0,13
	3-4		0	147,5	200,9	0,28
	4-5	78,4	53,4	–216,3	–	0,4
	5-11		497,4	–185,0	296,7	–0,47
			200,9			–
		238,9			258,6	
		–				
		185,0				
Суммы		241,5	235,5	1,5	0,4	–0,01
Термический КПД	η_t	0,42				
Термический КПД идеализированного цикла	η_{t4}	0,65				
Термический КПД цикла Карно	$\eta_{тк}$	0,66				
Коэффициент заполнения цикла	k	0,51				

1.3.4 Построение $T-s$ диаграммы цикла

Чтобы построить $T-s$ диаграмму, выбираем масштабы по осям координат: $T_t = 10$ К/мм; $s_s = 0,01$ кДж/(кг·К) / мм. Изображаем оси T и s , наносим сетку, а затем и характерные точки цикла. Точки 2 и 3, 3 и 4, 4 и 5 и 1 соединяем по лекалу кривыми, по близким к экспонентам, а политропные и 4-5 с достаточной точностью можно изображать прямыми линиями (рис. 2).



Чтобы найти площадь диаграммы, пересчитывая квадратные сантиметры (на пронумерованы): $F_{ц} = 25,4$ см². Площадь опи- Карно рассчитываем, измерив размеры прямоугольника в сантиметрах: $F_{к} = 8,5 \cdot 5,9 = 50,2$ см².

Тогда коэффициент заполнения цикла будет

определить коэффициент заполнения цикла, площадь цикла $1-2-3-4-5-1$ непосредственно на пересчитывая квадратные сантиметры (на пронумерованы): $F_{ц} = 25,4$ см². Площадь опи- Карно рассчитываем, измерив размеры прямоугольника в сантиметрах: $F_{к} = 8,5 \cdot 5,9 = 50,2$ см². Тогда коэффициент заполнения цикла будет

$$k = \frac{F_{ц}}{F_{к}} = \frac{25,4}{50,2} = 0,51.$$

1.4 Оптимизация цикла варьированием параметра n_1

1.4.1 Анализ результатов машинного расчета

Ниже приведена таблица результатов варьирования, полученная при расчетах на компьютере (табл. 2), туда же включен и результат ручного расчета.

Таблица 2

Результаты варьирования параметра n_1

Значение варьируемого параметра n_1	% изменения	Значение	
		η_t	T_{\max}
1,156	-20	0,383	721,8
1,288	-10	0,412	785,2
1,320	0	0,452	808,6
1,452	10	0,387	864,9
1,584	20	0,319	935,6

Используя данные таблицы, строим графики зависимостей $\eta_t = f(n_1)$ и $T_4 = f(n_1)$.

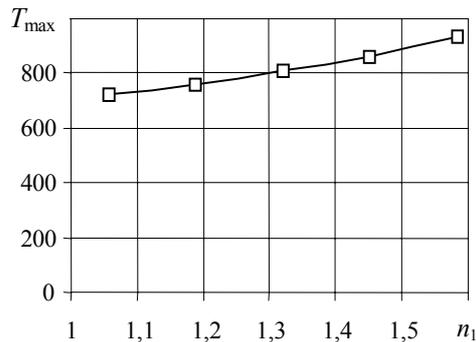


Рис. 3 Зависимость T_{\max} от n_1

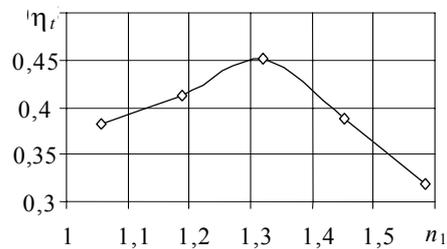


Рис. 4 Зависимость η_t от n_1

Из рисунков видно, что наибольшую эффективность имеет цикл с $n_1 = 1,37$. Это и понятно, поскольку при $n_1 = k$ процесс сжатия протекает адиабатно, а адиабатные про-

цессы самые "экономичные". Вывод: оптимальным является значение $n_1 = 1,37$. При этом $T_4 < T_{пр}$.

Рис. 1 Схема па

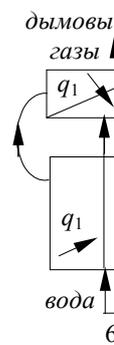
Задача № 2

2.1 Содержание задачи № 2 (вариант 42)

Цикл Ренкина задан параметрами $p_1 = 3,84$ МПа; $t_1 = 300$ °С; $p_2 = 0,03$ МПа. Исследовать влияние параметра t_1 на величину термического КПД цикла η_t и удельный расход тепла q , рассчитав эти величины при варьировании заданного параметра в пределах 20 %. Построить графики зависимостей η_t и q от варьируемого параметра, на основании которых сделать заключение об оптимальном его значении. Один из расчетов (0 %) выполнить вручную, остальные будут выполнены компьютером.

2.2 Краткое описание цикла

На рис. 1 приведена схема паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина. Установка включает паровой котел 1 и пароперегреватель 2. Перегретый пар при высоком давлении и температуре направляется в паровую турбину 3, где расширяется, совершая механическую работу, которая идет на



привод электрогенератора 4. Отработанный пар попадает в конденсатор 5, где конденсируется, а затем насосом 6 образовавшийся конденсат снова закачивается в котел и цикл повторяется.

На рис. 2 на фоне пограничных кривых приведены $p-v$ и $h-s$ диаграммы этого цикла. Цикл начинают с процесса расширения пара в турбине. Процесс 1-2 – это процесс адиабатного расширения, и на $h-s$ диаграмме он изображается отрезком вертикали. В процессе расширения давление и температура пара уменьшаются до T_2 и p_2 , как правило, пар становится влажным со степенью сухости $x \approx 0,95$. Процесс 2-3 – это конденсация отработанного пара, он протекает при постоянстве давления p_2 в конденсаторе. Температура при этом остается неизменной и равной $T_{н2}$. При работе насоса давление конденсата увеличивается до $p_3 = p_1$, а температура T , удельный объем v и энтальпия h практически не изменяются ($v_4 = v_3$, $h_4 = h_3$), поскольку воду можно считать несжимаемой жидкостью. Под высоким давлением вода попада-

ет в паровой котел и сначала нагревается там до температуры насыщения $T_{н1}$ (процесс 4-5), а затем выкипает (процесс 5-6). Оба эти процесса

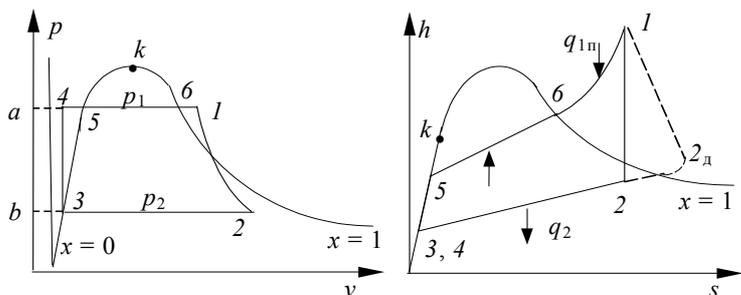


Рис. 2 P - v и h - s диаграммы цикла Ренкина с пере-

ходят при $p = \text{const}$ и сопровождаются увеличением энтальпии. Энтальпия пара еще более увеличивает-ся в процессе его изобарного перегрева 5-6 в пароперегревателе.

На рис. 2 показан также процесс $1-2_d$, отображающий условно расширение пара в турбине с учетом потерь на внутреннее трение.

Основными выходными характе-

ристиками цикла являются:

- термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{q_{ц}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3};$$

- удельный расход пара d_0

$$d_0 = 3600/(h_1 - h_2), \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч});$$

- удельный расход тепла

$$q = 1/(3600 d_0), \text{ кДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч});$$

- внутренний относительный КПД

$$\eta_{io} = \frac{h_1 - h_{2_d}}{h_1 - h_2}.$$

2.3 Расчет цикла*

Для определения параметров p , v , t , h и s каждой из характерных точек цикла воспользуемся таблицами состояний [2] и известной h - s диаграммой воды и пара.

Точка 1. Давление и температура здесь заданы: $p_1 = 3,494$ МПа; $t_1 = 273$ °С. Тогда на пересечении изобары: $p = 34,9$ бар и изотермы $t_1 = 273$ °С на h - s диаграмме находим положение точки 1 и по соответствующим изолиниям определяем значения остальных параметров: $v_1 = 0,0636$ м³/кг; $h_1 = 2900,2$ кДж/кг; $s_1 = 6,321$ кДж/(кг·К). Эти же значения можно определить и по таблицам состояний перегретого пара, применяя двунаправленное линейное интерполирование, подробно описанное в [1] и [2].

Точка 2. Поскольку процесс $1-2$ принимается адиабатным, положение точки 2 находим, проводя вертикальную линию вниз ($s = \text{const}$) до пересечения с изобарой $p = p_2 = 0,27$ бар.

* В настоящем расчете все исходные параметры умножены на 0,91, чтобы вариант 42 оставался доступным для работы.

По соответствующим изолиниям находим: $t_2 = t_{\text{нас}} = 66,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_2 = 4,5157 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_2 = 2117,6 \text{ кДж/кг}$; $s_2 = s_1 = 6,321 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $x_2 = 0,78$. Эти же значения можно рассчитать, пользуясь таблицами насыщенных состояний и определив сначала значение x_2 :

$$x_2 = (s_2 - s'') / (s'' - s'),$$

после чего и значения других параметров, например:

$$h_2 = (1 - x_2) h' + x_2 h''.$$

Параметры остальных точек находим по таблицам насыщенных состояний (по давлению).

Точка 3. Давление $p_3 = p_2 = 0,27 \text{ бар}$, остальные параметры – это параметры воды на линии насыщения при этом давлении. Из таблицы находим: $t_3 = t_{\text{нас}} = 66,9 \text{ }^\circ\text{C}$; $v_3 = 0,0010 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_3 = 280,0 \text{ кДж/кг}$; $s_3 = 0,917 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Точка 4. Давление $p_4 = p_1 = 3,494 \text{ бар}$, температура: $t_4 = t_3 = 242,4 \text{ }^\circ\text{C}$. По этим значениям с помощью таблицы состояний воды следовало бы найти остальные параметры. Однако, учитывая, что величина параметров воды очень мало зависит от ее давления, обычно принимают $v_4 = v_3 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_4 = h_3 = 280,0 \text{ кДж/кг}$; $s_4 = s_3 = 0,917 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Точка 5. Здесь $p_5 = p_1 = 3,494 \text{ бара}$, а остальные параметры этой точки – это параметры воды на линии насыщения при этом давлении: $t_5 = t_{\text{нас}} = 242,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $v_5 = v' = 0,0012 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_5 = h' = 1049,3 \text{ кДж/кг}$; $s_5 = s' = 2,724 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Точка 6. Давление $p_6 = p_1 = 3,494 \text{ бара}$, все же остальные параметры определяются как параметры сухого насыщенного пара при этом давлении. Из таблицы насыщенных состояний воды находим: $t_6 = t_{\text{нас}} = 242,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $v_6 = v'' = 0,0572 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_6 = h'' = 2802,5 \text{ кДж/кг}$; $s_6 = s'' = 6,126 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

2.3.1 Расчет термического КПД и других параметров цикла

Рассчитываем теперь основные характеристики цикла. Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{2900,2 - 2117,6}{2900,2 - 280,0} = 0,299.$$

Удельный расход тепла

$$q = 3600 / \eta_t = 3600 / 0,299 = 12345 \text{ кДж}/(\text{кВт}\cdot\text{ч}).$$

Удельный расход пара

$$d_0 = 3600 / (h_1 - h_2) = 3600 / (2900,2 - 2117,6) = 4,6 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч}).$$

Результаты расчетов сводим в итоговую табл. 1.

Параметры характерных точек цикла

Точка	p , МПа	t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	x , 1/1
1	3,494	273, 0	0,0636	2900,2	6,321	
2	0,027	66,9	4,5157	2117,6	6,321	0,78
3	0,027	66,9	0,0010	280,0	0,917	
4	3,494	242, 4	0,0010	280,0	0,917	
5	3,494	242, 4	0,0012	1049,3	2,724	
6	3,494	242, 4	0,0572	2802,5	6,126	

2.4 Результаты варьирования и их анализ

Программа проверки задачи № 2 на компьютере рассчитала выходные параметры цикла при варьировании значения t_1 в пределах 20 %. Результаты этого расчета, включая и результаты ручного расчета, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета основных параметров цикла

Значение варьируемого параметра t_1 , °С	% измене- ния	d , кг/кВт·ч	q , кДж/кВт·ч	η_b , 1/1
218,4	-20	5,079	12353	0,291
245,7	-10	4,807	12183	0,295
273,0	0	4,600	12053	0,299
300,3	10	4,425	11930	0,302
327,6	20	4,267	11804	0,305

Ниже на рис. 3 – 5 полученные результаты отражены графически в виде соответствующих зависимостей.

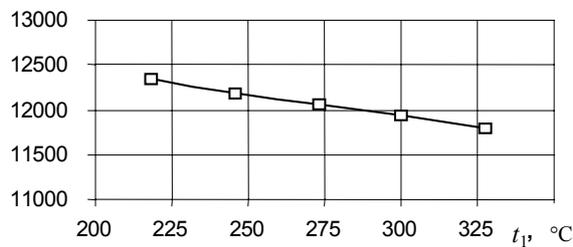


Рис. 3 Зависимость $q = f(t_1)$

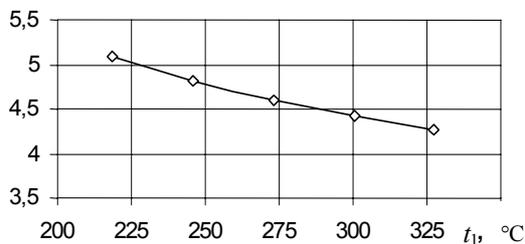


Рис. 4 Зависимость $d = f(t_1)$

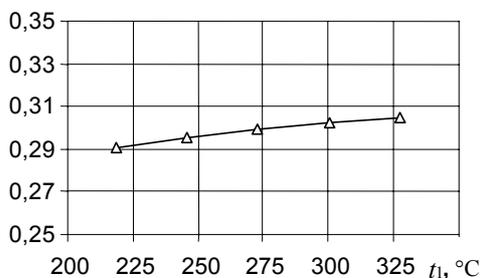


Рис. 5 Зависимость термического КПД от температуры t_1

Из рисунков видно, что с увеличением температуры t_1 эффективность цикла увеличивается практически по линейному закону. При этом удельные расходы пара и тепла уменьшаются примерно на 12 %, а термический коэффициент полезного действия увеличивается примерно на столько же процентов.

Список использованной литературы

- 1 Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники. Тамбов, 2002. 260 с.
- 2 Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. М., 1973. 344 с.
- 3 Ляшков В. И. Компьютерные расчеты в термодинамике. Тамбов, 1997. 163 с.

Конец примера.

Список рекомендуемой литературы

- 1 Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники. Тамбов, 2002. 260 с.
- 2 Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. М., 1980. 496 с.
- 3 СТП ТГТУ 07-97. Стандарт предприятия. Проекты (работы) дипломные и курсовые. Правила оформления. Тамбов, 2000. 39 с.
- 4 Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. М., 1973. 344 с.
- 5 Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и пара. М., 1980. 423 с.
- 6 Ляшков В. И. Компьютерные расчеты в термодинамике. Тамбов, 1997. 163 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
.....	
ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ	4
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ	6
Раздел ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ЦИКЛОВ	6
<i>a.</i>	
Раздел РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦИКЛОВ ПАРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	10
<i>b.</i>	
Раздел ПРОЦЕССЫ С ВЛАЖНЫМ ВОЗДУХОМ	11
<i>c.</i>	
Раздел ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ	13
<i>d.</i>	
ПРИМЕР РАСЧЕТА И ОФОРМЛЕНИЯ	15
.....	

ЗАДАЧА	№	1	17
.....			
1.1	Содержание задачи № 1 (вариант 14)		17
.....			
1.2	Краткое описание цикла		17
.....			
1.3	Расчет	цикла	ДВС 18
.....			
1.3.1	Определение параметров характерных точек цикла ..		18
1.3.2	Расчет термодинамических процессов		20
.....			
1.3.3	Расчет характеристик цикла		28
.....			
1.3.4	Построение $T-s$ диаграммы цикла		30
.....			
1.4	Оптимизация цикла варьированием параметра n_1		31
.....			
1.4.1	Анализ результатов машинного расчета		31
.....			
ЗАДАЧА № 2			33
.....			
2.1	Содержание задачи № 2 (вариант 42)		33
.....			
2.2	Краткое описание	цикла	33
ла.....			
2.3	Расчет	цикла	35
.....			
2.3.1	Расчет термического КПД и других параметров цикла		36
2.4	Результаты варьирования и их анализ		37
.....			
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ			39
.....			

Таблица 1

Исходные данные к задаче 1 раздела *a*

Первая цифра номера варианта	p_1	T_1	ε	λ	Вторая цифра номера варианта	ρ	n_1	n_2	$T_{пр}$	Варируется
1	0,14	300	18,0	1,30	1	1,41	1,36	1,27	1500	ε
2	0,12	310	9,3	1,33	2	1,51	1,39	1,25	1550	λ
3	0,10	315	22,0	1,41	3	1,48	1,34	1,28	1600	ρ
4	0,09	320	16,0	1,35	4	1,39	1,31	1,24	1500	n_1
5	0,08	325	20,0	1,49	5	1,27	1,35	1,29	1700	n_2

Таблица 2

Исходные данные к задаче 2 раздела *a*

Первая цифра номера варианта	P_1	T_1	β	n_1	Вторая цифра номера варианта	ρ	λ	n_2	z	Варируется
1	0,08	330	3,80	1,38	1	–	3,12	1,24	1500	β
2	0,09	325	4,18	1,36	2	2,42	–	1,29	1550	ρ
3	0,10	320	4,54	1,32	3	–	2,76	1,27	1600	λ
4	0,11	315	4,96	1,37	4	2,86	–	1,25	1650	n_1
5	0,12	310	5,58	1,35	5	–	3,14	1,22	1700	n_2