

**ТРАНСПОРТНАЯ
ЭНЕРГЕТИКА
(ТЕПЛОТЕХНИКА)**

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА (ТЕПЛОТЕХНИКА)

Методические указания по выполнению контрольной работы
для студентов специальностей 190702 и 190601
дневной и заочной форм обучения



Тамбов
Издательство ТГТУ
2006

УДК 621.1.016
ББК Ж 311я73-5
Л1992

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент ТГТУ
В.М. Мелисаров

Составитель

В.И. Ляшков

Л992 Транспортная энергетика (теплотехника) : метод. указания / сост. В.И. Ляшков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 32 с. – 200 экз.

Методические указания составлены в соответствии с программой и учебным планом дисциплины «Транспортная энергетика» и «Теплотехника» и содержат контрольные задания по термодинамическому анализу наиболее характерных тепловых циклов и тепловому расчету теплообменных аппаратов. Приведены примеры расчета и оформления задач и рекомендуемая литература. Предназначены для студентов специальностей 190702 и 190601 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.1.016

ББК 311я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2006

Учебное издание

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА (ТЕПЛОТЕХНИКА)

Методические указания

Составитель ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич

Редактор Т.М. Глинкина
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано в печать 29.12.2006.
Формат 60 × 84 / 16. 1,86 усл. печ. л.
Тираж 200 экз. Заказ № 888

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Для стабилизации и укрепления положительных тенденций в развитии экономики нашей страны необходимо направлять все усилия государства и общества на обновление средств и методов производства, использование высокопроизводительных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования, способных обеспечить выпуск конкурентоспособной на мировом рынке продукции. Как и прежде, решение перечисленных основных проблем во многом зависит от эффективной работы транспорта, где основными источниками энергии являются тепловые двигатели. В них теплота сжигаемого топлива трансформируется в механическую работу.

Широкое распространение на транспорте и транспортных предприятиях нашли различные холодильные системы и газотурбинные установки для дожигания вредных отходов, а также многое другое теплотехническое оборудование, энергетическая эффективность и степень совершенства которого определяются тем, насколько широко и правильно были проведены различные тепловые расчеты еще на этапе проектирования и доводки такого оборудования, его основных частей и агрегатов.

Методики теплоэнергетических расчетов разрабатываются в рамках двух отдельных наук: термодинамики, изучающей законы трансформации различных видов энергии друг в друга, и теплопередачи, вооружающей нас инженерными методиками расчета различных процессов теплообмена. Подходы, излагаемые в теории теплообмена, позволяют рассчитывать температурные поля и такие важнейшие характеристики процессов теплообмена, как передаваемый тепловой поток, плотность теплового потока, температурные градиенты, температурные напоры и др.

Поэтому твердое знание основ термодинамики и теории теплообмена, умение применить эти знания для решения практических задач является совершенно необходимым для всех инженерно-технических работников, связанных с проектированием, эксплуатацией, ремонтом и автоматизацией современных транспортных коммуникаций, транспортных предприятий и транспортных машин.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Контрольная работа выполняется студентами с целью закрепления и углубления учебного материала. 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 прививает навыки практического применения основных методик анализа температурных полей и тепловых потоков при теплопроводности. Она знакомит студента с использованием различных критериальных уравнений для расчетов интенсивности теплоотдачи, позволяет на конкретном примере освоить методику теплового расчета самых распространенных теплотехнических устройств – рекуперативных теплообменников. Работа включает решение двух 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 *a* и *b* указывают номер раздела, а стоящие рядом цифры – номера задач в этом разделе. Последние две цифры – это номер варианта каждой из задач. Например, шифр *a3b2-32* означает, что студенту надлежит решить задачу 3 из раздела *a* и задачу 2 из раздела *b* и для обеих задач принимать вариант 32.

Чтобы успешно подготовиться и выполнить контрольную работу необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с содержанием задач, выписать их, вставляя в 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 [1 – 6] и получить в библиотеке университета один из учебников или учебное пособие «Теоретические основы теплотехники», подробно ознакомиться с описанием цикла или процесса, предложенного для анализа.
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 даны в приведенных ниже примерах.
4. Оформить отчет по работе в соответствии с требованиями стандарта ТГТУ [7], ориентируясь при этом на приведенные в настоящей методической разработке примеры.

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

Рекомендуется необходимые расчеты проводить на компьютере, используя для этого алгоритмы, модули и процедуры из [5].

Приведем краткий перечень основных требований к оформлению отчета о работе, вытекающих из [7]:

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 (210 × 297). Допускаются написание текста с обеих сторон листа и небольшие отклонения от стандартных размеров листа. Как исключение, можно оформлять отчет в ученической тетради.

3. Графический материал (эскизы, диаграммы, графики) можно рисовать мягким карандашом на небольших листках миллиметровой или клетчатой бумаги, наклеивая их на страницы отчета. Каждый рисунок должен быть пронумерован и 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, результат вычислений 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. Такие ссылки оформляются по стандарту так:

[1, с. 233, табл. 6] или [3, с. 37, формула (18)].

Варианты контрольных работ

Раздел а (термодинамические расчеты газовых циклов)

Задача а1. Цикл поршневого ДВС задан параметрами: давление в конце процесса всасывания $p_1 = \dots$ МПа, температура в конце процесса всасывания $T_1 = \dots$ К, степень сжатия $\varepsilon = \dots$, степень увеличения давления $\lambda = \dots$, степень предварительного расширения $\rho = \dots$, показатель политропы сжатия $n_1 = \dots$, показатель политропы расширения $n_2 = \dots$. Определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исходные данные принять по табл. 1. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух.

1. Исходные данные к задаче а1

Первая цифра номера варианта	p_1 , МПа	T_1 , К	ε	λ	Вторая цифра номера варианта	ρ	n_1	n_2
1	0,14	300	18,0	1,30	1	1,41	1,36	1,27
2	0,12	310	9,3	1,33	2	1,51	1,39	1,25
3	0,10	315	22,0	1,41	3	1,48	1,34	1,28
4	0,09	320	16,0	1,35	4	1,39	1,31	1,24
5	0,08	325	20,0	1,49	5	1,27	1,35	1,29
6	0,08	305	17,5	1,38	6	1,38	1,33	1,26
7	0,09	325	14,8	1,27	7	1,27	1,31	1,23

Задача а2. Для цикла проточной газотурбинной установки, заданного параметрами: давление воздуха на входе в установку $p_1 = \dots$ МПа, температура воздуха на входе в установку $T_1 = \dots$ К, степень повышения давления в компрессоре $\beta = \dots$, степень предварительного расширения продуктов сгорания $\rho = \dots$, показатель политропы сжатия $n_1 = \dots$, показатель политропы расширения $n_2 = \dots$, определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исходные данные для расчетов принять по табл. 2. В качестве рабочего тела принимать сухой воздух.

2. Исходные данные к задаче а2

Первая цифра номера варианта	p_1 , МПа	T_1 , К	β	Вторая цифра номера варианта	ρ	n_1	n_2
------------------------------	-------------	-----------	---------	------------------------------	--------	-------	-------

1	0,08	330	3,80	1	2,56	1,38	1,24
2	0,09	325	4,18	2	2,42	1,36	1,29
3	0,10	320	4,54	3	3,05	1,32	1,27
4	0,11	315	4,96	4	2,86	1,37	1,25
5	0,11	327	3,75	5	2,74	1,36	1,26
6	0,09	318	5,67	6	3,12	1,29	1,28
7	0,08	323	5,42	7	2,74	1,31	1,29

Задача а3. Для цикла холодильной газовой машины, заданного параметрами: давление воздуха на входе в компрессор $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа, температура воздуха на входе в компрессор $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К, температура воздуха на выходе из охладителя $T_3 = \underline{\hspace{1cm}}$ К, степень повышения давления в компрессоре $\beta = \underline{\hspace{1cm}}$, степень расширения в детандере $\rho = \underline{\hspace{1cm}}$, показатель политропы сжатия в компрессоре $n_1 = \underline{\hspace{1cm}}$, определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исходные данные для расчетов принять по табл. 3

3. Исходные данные к задаче а3

Первая цифра номера варианта	p_1 , МПа	T_1 , К	T_3 , К	Вторая цифра номера варианта	β	ρ	n_1
1	0,12	305	315	1	5,81	5,36	1,12
2	0,11	310	325	2	6,10	4,39	1,25
3	0,10	315	330	3	5,48	4,34	1,18
4	0,09	320	340	4	5,39	3,31	1,21
5	0,08	325	350	5	6,27	4,05	1,29
6	0,11	308	318	6	4,78	3,85	1,35
7	0,12	318	330	7	5,05	4,10	1,23

Задача а4. Для цикла идеального многоступенчатого центробежного компрессора, служащего для сжатия $\underline{\hspace{1cm}}$ и заданного параметрами: давление газа на входе в компрессор $p_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа, температура газа на входе в компрессор $T_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ К, температура газа на выходе из каждой ступени компрессора $T_{3i} = \underline{\hspace{1cm}}$ К, давление газа на выходе из компрессора $p_z = \underline{\hspace{1cm}}$ МПа, показатель политропы сжатия $n = \underline{\hspace{1cm}}$, определить число ступеней давления Z , параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. Исходные данные для расчетов принять по табл. 4.

4. Исходные данные к задаче а4

Первая цифра номера варианта	Название газа	p_1 , МПа	T_1 , К	T_{3i} , К	Вторая цифра номера варианта	p_z , МПа	n
1	Воздух	0,13	300	320	1	6,0	1,05
2	Азот	0,09	310	330	2	4,5	1,15
3	Кислород	0,11	320	340	3	3,6	1,12
4	Водород	0,08	330	350	4	2,9	1,09
5	Аргон	0,12	340	355	5	5,1	1,21
6	Воздух	0,09	299	320	6	4,6	1,22
7	Азот	0,98	312	330	7	5,1	1,24

Раздел б (расчет теплообменных аппаратов)

Задача б1. Определить поверхность теплообмена, необходимую для охлаждения антифриза в автомобильном радиаторе от температуры $t_{11} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С до температуры $t_{12} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С, если известно, что расход его $M = \underline{\hspace{1cm}}$ кг/с, коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам трубок $\alpha_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ Вт/(м² · К), а коэффициент теплоотдачи от стенок трубок к воде $\alpha_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ Вт/(м² · К). Теплоемкость антифриза принять $c_p = 3,85$ кДж/(кг · К), температура охлаждающего воздуха на входе в аппарат $t_{21} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С, температура охлаждающего воздуха на выходе из аппарата $t_{22} = \underline{\hspace{1cm}}$ °С.

рата $t_{22} = \text{---} \text{ }^\circ\text{C}$, трубки латунные толщиной $\delta = 2 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности латуни $\lambda = 290 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Схема движения теплоносителей – перекрестный ток. Исходные данные выбрать из табл. 5.

5. Исходные данные к задаче b1

Первая цифра номера варианта	$t_{11}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{12}, \text{ }^\circ\text{C}$	$M, \text{ кг/с}$	Вторая цифра номера варианта	$t_{21}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{22}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_1, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	$\alpha_2, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
1	98	59	0,05	1	41	49	1300	62
2	97	60	0,06	2	42	65	1400	64
3	96	61	0,06	3	43	54	1500	66
4	95	62	0,07	4	44	68	1550	68
5	94	63	0,07	5	45	71	1450	70
6	93	64	0,08	6	46	60	1350	72
7	92	65	0,08	7	47	56	1250	74

Задача b2. Определить поверхность теплообмена кожухотрубчатого конденсатора, предназначенного для конденсации сухого насыщенного водяного пара при давлении $p_1 = \text{---} \text{ МПа}$ в количестве $M_1 = \text{---} \text{ кг/ч}$. Охлаждение осуществляется водой, протекающей внутри латунных трубок с размерами $\text{---} \text{ мм}$. Средняя скорость воды в трубках $w_2 = \text{---} \text{ м/с}$. Начальная температура воды $t_{21} = \text{---} \text{ }^\circ\text{C}$. Трубки в количестве $Z = \text{---} \text{ штук}$ размещены в цилиндрическом корпусе и расположены по сторонам и вершинам правильных шестиугольников. Положение аппарата горизонтальное. Исходные данные выбрать из табл. 6.

6. Исходные данные к задаче b2

Первая цифра номера варианта	$p_1, \text{ МПа}$	$M_1, \text{ кг/с}$	Размер трубок	Вторая цифра номера варианта	$w_2, \text{ м/с}$	$t_{21}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Z, \text{ шт.}$
1	0,11	7200	24 × 2	1	1,4	22	61
2	0,085	3600	22 × 2	2	2,1	14	91
3	0,016	3800	19 × 1	3	1,6	24	61
4	0,045	1600	19 × 1	4	1,2	12	37
5	0,109	3500	22 × 1	5	0,6	16	61
6	0,025	2000	19 × 1	6	1,4	14	37
7	0,064	4200	24 × 1	7	0,7	18	61

Задача b3. Определить поверхность теплообмена, необходимую для непрерывного нагрева --- в количестве $M_1 = \text{---} \text{ кг/ч}$ от температуры $t_{21} = \text{---} \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $t_{22} = \text{---} \text{ }^\circ\text{C}$. Теплообменник представляет собою расположенный в круглой обечайке змеевик диаметром $D = \text{---} \text{ мм}$ из стальной трубы --- . Нагревание осуществляется сетевой водой с начальной температурой $t_{11} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$, которая охлаждается до $t_{12} = \text{---} \text{ }^\circ\text{C}$. При расчетах скоростью вынужденного движения воды в обечайке пренебрегать и считать, что теплообмен там происходит в результате свободной конвекции.

7. Исходные данные к задаче b3

Первая цифра номера варианта	Нагреваемая жидкость	$t_{11},$ °C	$t_{12},$ °C	, мм	Вторая цифра номера варианта	Размеры трубы, мм	$t_{22},$ °C
1	Мазут	25	45	450	1	38 × 2	83
2	Дизтопливо	19	40	500	2	38 × 1	78
3	Вода	5	60	400	3	57 × 3	71
4	Мазут	15	80	600	4	95 × 3	80
5	Вода	8	35	550	5	57 × 2	65
6	Мазут	14	65	480	6	38 × 2	74
7	Вода	21	80	380	7	38 × 1	68

Примечание. Свойства мазута принимать такими же, как у масла МС-20, свойства дизтоплива – как у трансформаторного масла [4, с. 271].

Задача б4. По горизонтальному стальному трубопроводу с размерами _____ мм, подвешенному в воздухе, течет вода со средней скоростью $w_1 =$ ___ м/с при температуре на входе $t_{11} =$ ___ °C. На выходе из трубы температура воды $t_{12} =$ ___ °C. Температура окружающего воздуха $t_{21} = t_{21} =$ ___ °C, средняя скорость ветра $w_{вет} =$ ___ м/с. Определить длину трубопровода, на которой происходит указанное падение температуры, учитывая, что трубопровод покрыт слоем теплоизоляции из шлаковаты толщиной $\delta =$ ___ мм.

8. Исходные данные к задаче б4

Первая цифра номера варианта	Размеры трубы, мм	$w_1,$ м/с	$t_{11},$ °C	$t_{12},$ °C	Вторая цифра номера варианта	$t_{21},$ °C	$w_{вет},$ м/с	$\delta,$ мм
1	89 × 3,5	0,35	115	93	1	15	5	35
2	159 × 4,5	0,40	115	85	2	22	7	20
3	133 × 6	0,65	95	85	3	5	9	25
4	219 × 4	0,38	95	70	4	-10	6	30
5	426 × 9	0,42	115	80	5	-15	4	35
6	133 × 4	0,28	90	70	6	4	8	40
7	108 × 3	0,32	95	80	7	18	10	45

Примечание. Теплопроводность шлаковаты рассчитывать по формуле: $\lambda = 0,06 + 0,000145t_{мат}$; коэффициент теплоотдачи от атмосферного ветра к поверхности цилиндра, расположенного на высоте от 2 до 4 м, рассчитывать по эмпирической формуле: $\alpha = 11,6 + 7\sqrt{w_{вет}}$.

Далее приводится пример выполнения контрольной работы, который рекомендуется использовать при самостоятельном выполнении задания. В примере принята собственная последовательная нумерация формул, таблиц и рисунков, но сохранена сквозная (для всего печатного издания) нумерация страниц.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ а1-24*

1.1. Содержание задачи

Цикл поршневого ДВС задан параметрами: давление в конце процесса всасывания $p_1 = 0,14$ МПа, температура в конце процесса всасывания $T_1 = 300$ К, степень сжатия $\epsilon = 18$, степень увеличения давления $\lambda = 1,4$, степень предварительного расширения $\rho = 1,3$, показатель политропы сжатия $n_1 = 1,32$, показатель политропы расширения $n_2 = 1,25$. Определить параметры всех характерных точек цикла, термодинамические характеристики каждого процесса и цикла в целом. 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).

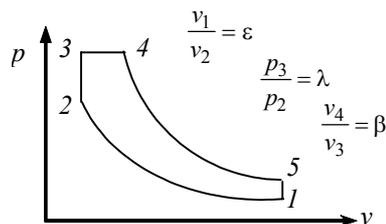


Рис. 1. $p-v$ диаграмма цикла ДВС со смешанным подводом теплоты

* В настоящем расчете все исходные параметры уменьшены в 1,08 раза.

Основными исходными характеристиками цикла являются [2]:

- 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 n_1 и расширения 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) [1]:

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

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 [2] соотношение

$$p_1 v_1^{n_1} = p_2 v_2^{n_1},$$

откуда

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n_1} = p_1 \varepsilon^{n_1} = 0,13 \cdot 16,7^{1,22} = 4,03 \text{ МПа}.$$

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

Температуру T_3 находим из уравнения (1):

$$T_3 = \frac{p_3 v_2}{R} = \frac{4,83 \cdot 10^6 \cdot 0,037}{287} = 622,6 \text{ К}.$$

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:

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

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

Точка 4. $p_4 = p_3 = 4,83$ МПа; $v_4 = v_3 \rho = 0,037 \cdot 1,3 = 0,048$ м³/кг. Температуру T_4 найдем, воспользовавшись известным соотношением для изобарных процессов (закон Гей-Люсака): $v_3/v_4 = T_4/T_3$, откуда $T_4 = T_3 v_4/v_3 = T_3 \rho = 622,6 \cdot 1,3 = 808,6$ К.

Точка 5. $v_5 = v_1 = 0,61$ м³/кг. Давление в точке 5 найдем так же, как находили его для точки 2:

$$p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{n_2} = 4,83 \left(\frac{0,048}{0,61} \right)^{1,16} = 0,25 \text{ МПа.}$$

Температуру T_5 находим, воспользовавшись уравнением состояния:

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

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

1.3.2. Расчет термодинамических процессов

Полный термодинамический расчет процесса включает определение теплоты q и работы l за процесс, изменений внутренней энергии Δu , энтальпии Δh и энтропии Δs за процесс. Для политропного процесса расчетные формулы для названных характеристик имеют вид [2]:

$$q = c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} \frac{n-k}{n-1} (T_k - T_n); \quad (2)$$

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

$$\Delta u = c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} (T_k - T_n); \quad (4)$$

$$\Delta h = c_{pm} \Big|_{t_n}^{t_k} (T_k - T_n); \quad (5)$$

$$\Delta s = c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} \ln \frac{T_k}{T_n} + R \ln \frac{v_k}{v_n}; \quad (6)$$

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

$$k = c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} / c_{pm} \Big|_{t_n}^{t_k}; \quad T_n = t_n + 273,15; \quad T_k = t_k + 273,15,$$

v_n и v_k – удельный объем в начале и в конце процесса.

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

$$c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} = a + b(t_n + t_k), \quad (7)$$

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

$$c_{pm} \Big|_{t_n}^{t_k} = c_{vm} \Big|_{t_n}^{t_k} + R. \quad (8)$$

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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} :

$$\begin{aligned} \Delta S_{1-2} &= c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{p_2}{p_1} = \\ &= 0,732 \cdot \ln \frac{519,5}{277,8} + 287 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{0,037}{0,61} = -0,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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 [2]:

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

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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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):

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

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

$$c_{pm}|_{t_4}^{t_5} = c_{vm}|_{t_4}^{t_5} + R = 0,78 + 287 \cdot 10^{-3} = 1,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$k = c_{pm}|_{t_4}^{t_5} / c_{vm}|_{t_4}^{t_5} = \frac{1,07}{0,78} = 1,37.$$

Далее рассчитываем калорические величины процесса 4 – 5 по формулам (2) – (6):

$$q_{4-5} = c_{vm}|_{t_4}^{t_5} \frac{n_2 - k}{n_2 - 1} (T_5 - T_4) = 0,78 \cdot \frac{1,16 - 1,37}{1,16 - 1} \cdot (531,3 - 808,6) = 283,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

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

$$\Delta u_{4-5} = c_{vm}|_{t_4}^{t_5} (T_5 - T_4) = 0,78 \cdot (531,3 - 808,6) = -216,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta h_{4-5} = c_{pm}|_{t_4}^{t_5} (T_5 - T_4) = 1,07 \cdot (531,3 - 808,6) = -296,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{4-5} &= c_{vm}|_{t_4}^{t_5} \ln \frac{T_5}{T_4} + R \ln \frac{p_5}{p_4} = \\ &= 0,78 \cdot \ln \frac{531,8}{808,6} + 287 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{0,61}{0,048} = 0,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Проверка:

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

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

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

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

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

Основные характеристики процесса

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

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

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

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

Проверку проведем по формуле (9):

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

Погрешность

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

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

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

где $t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273,15 \text{ K}$), $p_0 = 0,1013 \text{ МПа}$ – параметры воздуха при нормальных условиях; при таком состоянии считается, что $S = 0$ [2].

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

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

Далее находим

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

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

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

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

Эту же величину можно рассчитать и по-другому:

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

Практическое совпадение значений S_5 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.

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

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 равны нулю.

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

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

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

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

Рассчитываем термический КПД цикла [2]:

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

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

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

Термический КПД цикла Карно [2] для того же интервала температур, в котором реализуется реальный цикл:

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

Результаты расчетов заносим в сводную таблицу (табл. 1).

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	0,037	519,5	-0,3	
	3	4,83	0,037	622,6	-0,17	
	4	4,83	0,048	808,6	0,11	
	5	0,25	0,61	531,3	0,51	
		q	l	Δu	Δh	ΔS
Характеристики процессов	1 – 2	-136,7	-315,3	176,9	246,5	-0,35
	2 – 3	78,4	0	78,4	108,3	0,13
	3 – 4	200,9	53,4	147,5	200,9	0,28
	4 – 5	238,9	497,4	-216,3	-296,7	0,4
	5 – 1	-185,0		-185,0	-258,6	-0,47
Суммы		241,5	235,5	1,5	0,4	-0,01
Термический КПД реального цикла				η_t	0,42	
Термический КПД идеализованного цикла				$\eta_{\text{ти}}$	0,65	
Термический КПД цикла Карно				$\eta_{\text{тк}}$	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: $\mu_t = 10$ К/мм, $\mu_s = 0,01$ кДж/(кг · К)/мм. Изображаем оси T и S , наносим координатную сетку, а затем и характерные точки цикла. Точки 2 и 3, 3 и 4, 5 и 1 соединяем по лекалу кривыми, по характеру близкими к экспонентам, а политропные процессы 1 – 2 и 4 – 5 с достаточной точностью можно изображать прямыми линиями (рис. 2).

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

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

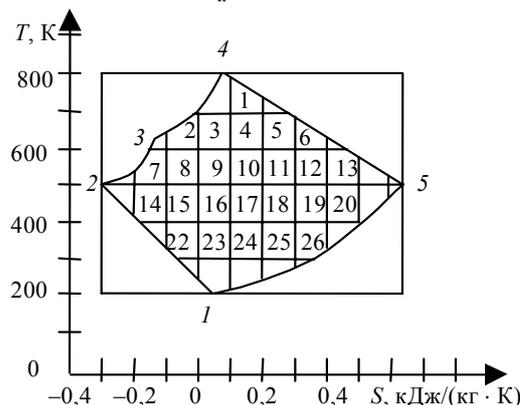


Рис. 2. T - s диаграмма цикла

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ $b2^*$

Задача $b2-15$. Определить поверхность теплообмена кожухотрубчатого конденсатора, предназначенного для конденсации сухого насыщенного водяного пара при давлении $p_1 = 0,15$ МПа в количестве $M_1 = 4600$ кг/ч. Охлаждение осуществляется водой, протекающей внутри латунных трубок с размерами $\varnothing 19 \times 1$ мм. Средняя скорость воды в трубках $w_2 = 1,6$ м/с. Начальная температура воды $t_{21} = 18$ °С. Трубки в количестве $Z = 91$ шт. размещены в цилиндрическом корпусе и расположены по сторонам и вершинам правильных шестиугольников. Положение аппарата горизонтальное.

Представим сначала общую схему теплообменника (рис. 3) и схему расположения трубок внутри его корпуса (рис. 4).

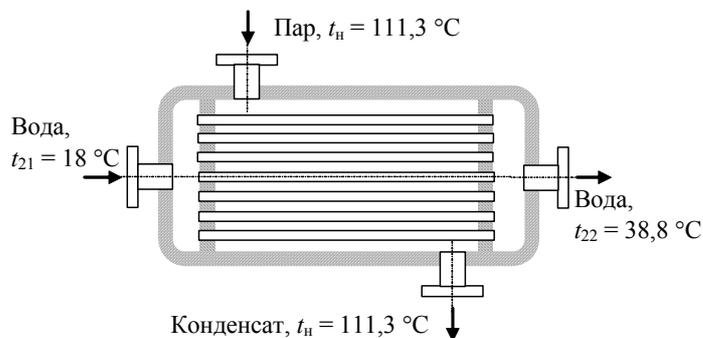


Рис. 3. Общая схема конденсатора

* Все числовые исходные данные в настоящем примере изменены по сравнению с заданием b2-15.

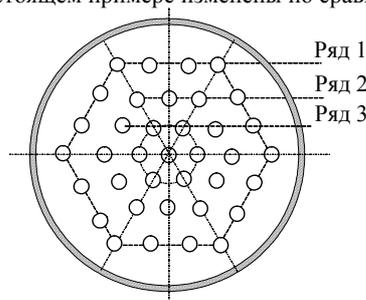


Рис. 4. Расположение греющих трубок

Поверхность теплообмена F найдем из основного уравнения теплопередачи:

$$Q = k \Delta t_{cp} F, \quad (10)$$

где Q – передаваемый тепловой поток; k – коэффициент теплопередачи; Δt_{cp} – средний температурный напор между теплоносителями. Определив F , найдем затем и необходимую длину трубок L .

Из формулы (10) видно: чтобы найти F , необходимо предварительно рассчитать значения Q , k и Δt_{cp} .

Будем считать, что образующийся в аппарате конденсат не переохлаждается. В этом случае можем определить тепловую нагрузку Q по заданному расходу пара M_1 и его теплоте парообразования r :

$$Q = M_1 \cdot r. \quad (11)$$

Пересчитаем сначала M_1 в систему СИ: $M_1 = 4600 / 3600 = 1,28$ кг/с. Значение r будем определять линейным интерполированием по таблице свойств насыщенного пара [4, с. 265, табл. 12]. Для этого подробнее рассмотрим процедуру линейного интерполирования.

На рис. 5 графически (точками 1 и 2) отражена некая табличная зависимость $Y = f(X)$. Постулируя линейную зависимость между Y и X на интервале $X_1 - X_2$, проводим через эти точки прямую линию и для некоторого промежуточного значения X из подобия треугольников $12C$ и $1AB$ запишем соотношения между отрезками:

$$\frac{1B}{1C} = \frac{AB}{2C} \quad \text{или} \quad \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1},$$

откуда находим

$$Y = Y_1 + \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} (Y_2 - Y_1). \quad (12)$$

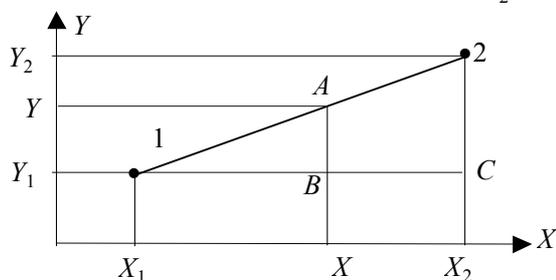


Рис. 5. Линейное интерполирование

Отметим, что полученная формула может применяться и для убывающих зависимостей, и для экстраполирования данных. Она удобна еще и тем, что множитель $(X - X_1) / (X_2 - X_1)$ остается одинаковым для любых параметров, зависящих от X . Итак, используя таблицу свойств насыщенного пара, по формуле (12) рассчитываем

$$r = 2230 + \frac{0,15 - 0,143}{0,198 - 0,143} \cdot (2202,8 - 2230) =$$

$$= 2230 + 0,1273 \cdot (2202,8 - 2230) = 2226,5 \text{ кДж/кг};$$

$$t_n = 110 + 0,1273 \cdot (120 - 110) = 111,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Далее по формуле (11) рассчитываем

$$Q = 1,28 \cdot 2226,5 \cdot 10^3 = 2849,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Если пренебрегать тепловыми потерями в окружающую среду, то этот же тепловой поток воспринимается и охлаждающей водой, и для нее можно записать

$$Q = M_2 c_{p2} (t_{22} - t_{21}), \quad (13)$$

где M_2 – массовый расход воды; c_{p2} – удельная теплоемкость воды; t_{22} и t_{21} – температуры воды на входе и выходе из теплообменника.

Расход воды M_2 находим по уравнению неразрывности [2]:

$$M_2 = w_2 f_2 \rho_2,$$

где f_2 – общая площадь поперечного сечения для потока воды; ρ_2 – плотность воды при ее средней температуре $t_{2cp} = (t_{22} + t_{21}) / 2$.

Чтобы по таблице свойств воды [4, с. 264, табл. 11] найти ее плотность и теплоемкость, зададимся в первом приближении температурой t_{22} , приняв $t_{22} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда

$$t_{2cp} = (t_{22} + t_{21}) / 2 = (52 + 18) / 2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Линейным интерполированием находим

$$\rho_2 = 993,9 \text{ кг/м}^3, \quad c_{p2} = 4,174 \text{ кДж/кг}.$$

Рассчитываем величину f_2 , учитывая, что внутренний диаметр трубки меньше наружного диаметра на две толщины ($d_{\text{вн}} = d_{\text{нар}} - 2\delta = 19 - 2 \cdot 1 = 17 \text{ мм}$):

$$f_2 = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} Z = \frac{3,1416 \cdot 0,017^2}{4} \cdot 91 = 2,065 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Тогда расход охлаждающей воды будет

$$M_2 = w_2 f_2 \rho_2 = 1,6 \cdot 2,065 \cdot 10^{-2} \cdot 993,9 = 32,8 \text{ кг/с}.$$

Из уравнения (13) получаем формулу для t_{22} и рассчитываем эту величину:

$$t_{22} = \frac{Q}{M_2 c_{p2}} + t_{21} = \frac{2849,9 \cdot 10^3}{32,8 \cdot 4174} + 18 = 38,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Отметим, что хотя величина t_{22} получилась и не очень близкой к принятой в первом приближении, дальнейших уточнений ее не требуется, поскольку значения c_{p2} и ρ_2 при изменении температуры изменяются весьма незначительно. Действительно, во втором приближении $t_{2cp} = (t_{22} + t_{21}) / 2 = (38,8 + 18) / 2 = 28,4 \text{ }^\circ\text{C}$, а при этой температуре $\rho_2 = 996,1$ (найденно интерполированием) и это значение менее чем на 0,2 % отличается от полученного при первом приближении. Так что для дальнейших расчетов принимаем $t_{22} = 38,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{2cp} = 28,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определяем средний температурный напор Δt_{cp} , изобразив условную схему движения теплоносителей (рис. 6) и определив значения напоров на входе и выходе из аппарата. Обычно Δt_{cp} определяется как среднелогарифмический напор:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}},$$

но у нас $\Delta t_6 / \Delta t_m = 93,3 / 72,5 = 1,29$, что меньше 2, и, следовательно, можно рассчитывать среднеарифметический напор:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2 = (93,3 + 72,5) / 2 = 82,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Чтобы убедиться в этом, рассчитаем все же и среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{cp} = \frac{93,3 - 72,5}{\ln \frac{93,3}{72,5}} = 82,46 \text{ }^\circ\text{C},$$

что практически совпадает с предыдущим результатом.

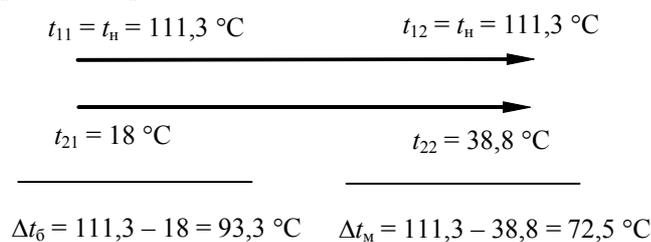


Рис. 6. Схема движения теплоносителей

Поскольку у нас $d_n / d_{вн} = 19 / 17 = 1,12$ (меньше 2), то значение коэффициента теплопередачи k можно рассчитать по формуле для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (14)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя (от конденсирующегося пара) к наружной стенке трубки и к холодному теплоносителю (от внутренней стенки к воде); $\delta_{ст}$ и $\delta_{нак}$ – толщина стенки и слоя накипи; $\lambda_{ст}$ и $\lambda_{нак}$ – коэффициенты теплопроводности материала трубки и накипи, соответственно. Заметим, что в нашем задании $\delta_{нак} = 0$ и формула (14) несколько упрощается.

Чтобы реализовать формулу (14), нужно рассчитать предварительно значения α_1 и α_2 . Коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного пара на горизонтальных пучках рассчитывают по формуле Нуссельта для одиночной горизонтальной трубы с введением специального поправочного множителя ε_n , зависящего от числа труб n в одном вертикальном ряду [2]:

$$\alpha_{1n} = \alpha_1 \varepsilon_n = 0,725 \sqrt[4]{\frac{gr\rho_1^2 \lambda_1^3}{\mu_1(t_n - t_{c1})d}} \varepsilon_n. \quad (15)$$

В формулу входят неизвестное значение температуры стенки со стороны конденсата t_{c1} (аналогичная ситуация возникает и при расчетах α_2 , только там неизвестная будет t_{c2}), а также теплофизические характеристики ρ_1 , λ_1 и μ_1 конденсата. Поэтому задачу решаем методом последовательных приближений, рассчитывая в соответствии с рекомендациями [2] первые приближения t_{c1} и t_{c2} так:

$$t_{c1} = t_{ж1\text{ ср}} - \Delta t_{ср} / 2 = 111,3 - 82,9 / 2 = 69,9 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{c2} = t_{ж2\text{ ср}} + \Delta t_{ср} / 2 = 28,4 + 82,9 / 2 = 69,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Линейным интерполированием по формуле (12) находим значения ρ_1 и λ_1 воды при заданном давлении насыщенного пара $p_n = 0,15$ МПа, используя табличные данные [4, с. 264, табл. 11]:

$$\rho_1 = 951,0 + 0,1273 \cdot (943,1 - 951,0) = 950 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_1 = 0,685 + 0,1273 \cdot (0,686 - 0,685) = 0,685 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Линейное интерполирование вязкости может приводить к недопустимо большим погрешностям, поэтому рекомендуется использовать температурную корреляцию Андраде и значение μ_1 рассчитывать по формуле [6]:

$$\mu_t = \mu_{1T}^{(t_2-t)/(t_2-t_1)} \mu_{2T}^{(t-t_1)/(t_2-t_1)}, \quad (16)$$

где μ_{1T} и μ_{2T} – табличные значения μ , соответствующие табличным температурам t_1 и t_2 ; t – температура, при которой нужно определить значение μ . Пользуясь данными из [4, с. 237, табл. 4], рассчитываем:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 259 \cdot 10^{-6}^{(120-111,3)/(120-110)} \cdot 237,4 \cdot 10^{-6}^{(111,3-110)/(120-110)} = \\ &= 256,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2. \end{aligned}$$

Величину поправочного множителя ε_n находим как для шахматного пучка, определив предварительно по схеме (рис. 4) число труб, расположенных в одном вертикальном ряду: $n = 6$. Тогда, используя формулу из [2], рассчитываем

$$\varepsilon_n = 0,1 + \sqrt[4]{\frac{1}{n}} = 0,1 + \sqrt[4]{\frac{1}{6}} = 0,74.$$

Теперь рассчитываем α_{1n} по формуле (15):

$$\alpha_{1n} = 0,725 \sqrt[4]{\frac{9,81 \cdot 2226,5 \cdot 10^3 \cdot 950^2 \cdot 0,685^3}{256,1 \cdot 10^{-6} (111,3 - 69,9) \cdot 0,019}} \cdot 0,74 = 7144,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Чтобы рассчитать коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю (теплоотдача при движении теплоносителя в трубе), сначала установим режим течения теплоносителя, рассчитав значение критерия Re [2]:

$$Re_2 = \frac{w_2 d_{вн}}{\nu_2}, \quad (17)$$

где ν_2 – коэффициент кинематической вязкости воды при ее средней температуре $t_{ср} = 28,4$ °С. Рассчитываем эту величину, используя данные пособия [4, табл. 4] и применяя формулу (16):

$$\nu_2 = 1,006 \cdot 10^{-6}^{(30-28,4)/(30-20)} \cdot 0,805 \cdot 10^{-6}^{(28,4-20)/(30-30)} = 0,834 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тогда по формуле (17)

$$Re_2 = \frac{1,6 \cdot 0,017}{0,834 \cdot 10^{-6}} = 31 \text{ } 850.$$

Поскольку $Re > 10^4$, то режим течения воды турбулентный, и для него рекомендуется критериальное уравнение М.А. Михеева:

$$Nu_2 = 0,021 Re_2^{0,8} Pr_{ж2}^{0,43} (Pr_{ж2} / Pr_{с2})^{0,25} \varepsilon_l, \quad (18)$$

где $Pr_{ж2}$ и $Pr_{с2}$ – значения критерия Прандтля при температурах $t_{ж2}$ и $t_{с2}$, соответственно; ϵ_l – поправочный множитель, учитывающий влияние начального участка трубы. Для труб, длина которых более двадцати диаметров, $\epsilon_l = 1$. Значения $Pr_{ж2}$ и $Pr_{с2}$ находим интерполированием по формуле (16)

$$Pr_{ж2} = 7,02^{(30-28,4)/(30-20)} \cdot 5,42^{(28,4-20)/(30-30)} = 5,65;$$

$$Pr_{с2} = 2,98^{(70-69,9)/(70-60)} \cdot 2,55^{(69,9-60)/(70-60)} = 2,55.$$

Определяем значение числа Нуссельта по формуле (18)

$$Nu_2 = 0,021 \cdot 31850^{0,8} \cdot 5,65^{0,43} \cdot (5,65/2,55)^{0,25} \cdot 1 = 216,$$

после чего находим значение коэффициента теплоотдачи [2]

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d}, \quad (19)$$

где λ_2 находим линейным интерполированием по формуле (12):

$$\lambda_2 = 0,599 + (28,4 - 20) / (30 - 20) \cdot (0,618 - 0,599) = 0,615 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Рассчитываем α_2 по формуле (19):

$$\alpha_2 = \frac{216 \cdot 0,615}{0,017} = 7814 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Рассчитываем теперь значение коэффициента теплопередачи k в первом приближении, определив предварительно по [4, с. 235, табл. 2] значение коэффициента теплопроводности для меди при $t_{с\text{ ср}} = 59,9$ °С: $\lambda_{с\text{ ср}} = 394$ Вт/(м · К). Тогда по формуле (14) находим

$$k = \frac{1}{\frac{1}{7144,7} + \frac{0,001}{394} + \frac{1}{7814}} = 3697,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

При таком значении k удельный тепловой поток

$$q = k \Delta t_{ср} = 3697,2 \cdot 82,9 = 3,06 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Рассчитаем теперь значения $t_{с1}$ и $t_{с2}$ во втором приближении [2]:

$$t_{с1} = t_{ж1} - \frac{q}{\alpha_1} = 111,3 - \frac{3,06 \cdot 10^5}{7144,7} = 68,4 \text{ °С};$$

$$t_{с2} = t_{ж2\text{ ср}} + \frac{q}{\alpha_2} = 28,4 + \frac{3,06 \cdot 10^5}{7814} = 67,5 \text{ °С}.$$

Именно с этими величинами теперь следует определить во втором приближении значения α_1 , α_2 , k и q , а далее $t_{с1}$ и $t_{с2}$ в третьем приближении и уж потом сравнить полученные результаты. Если они отличаются от результатов предыдущего приближения менее чем на 5 %, то приближения можно прекратить и рассчитать необходимую поверхность теплообмена по формуле

$$F = \frac{Q}{q}$$

и далее длину трубок

$$L = \frac{F}{\pi d Z}.$$

Все остальные приближения, начиная третьего, выполняются аналогично, но их дальнейший расчет нами не проводится.

Приводим результаты расчетов в форме сводной таблицы (табл. 2).

2. Результаты расчета конденсатора

№ п/п	Параметры задачи	Приближения	
		1	2
1	t_{11} , °С	111,3	
2	t_{12} , °С	111,3	
3	t_{21} , °С	18	
4	t_{22} , °С	38,8	
5	w_1 , м/с	0	
6	w_2 , м/с	1,6	
7	$t_{с1}$, °С	69,9	68,4
8	$t_{с2}$, °С	69,9	67,5
9	α_1 , Вт/(м ² · К)	7144,7	7096
10	α_2 , Вт/(м ² · К)	7814	7734

11	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	3697,2	3666
12	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	$3,06 \cdot 10^5$	$3,02 \cdot 10^5$
13	$F, \text{м}^2$	–	9,41
14	$L, \text{м}$	–	1,83

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплотехника / под ред. В.И. Крутова. – М. : Машиностроение, 1986. – 427 с.
2. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 260 с.
3. Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.
4. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М. : Энергия, 1980. – 287 с.
5. Ляшков, В.И. Компьютерные расчеты в термодинамике / В.И. Ляшков. – Тамбов, 1997. – 134 с.
6. Ляшков, В.И. Тепловой расчет теплообменных аппаратов / В.И. Ляшков, И.А. Черепенников. – Тамбов : ТИХМ, 1991. – 48 с.
7. СТП ТГТУ 07–97. Проекты (работы) дипломные и курсовые. Правила оформления. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 40 с.