

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н. А. Белоусов

**Термодинамика и теплопередача**  
(Основы теории, типовые задачи,  
задания и методические указания)

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации  
по высшему нефтегазовому образованию в качестве учебного пособия  
для студентов, обучающихся по специальностям:  
090600 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»,  
090800 «Бурение нефтяных и газовых скважин»  
и 170200 «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

Ухта 2002

ББК 31.31

Т38

УДК 621.1.018 (075.8)

ISBN 5-88179-0134-7

Белоусов Н. А. Термодинамика и теплопередача (Основы теории, типовые задачи, задания и методические указания): Учебное пособие. – Ухта, 2002. – 73 с.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей: 090600 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», 090800 «Бурение нефтяных и газовых», 170200 «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» и 170400 «Машины лесного комплекса» при изучении курсов дисциплин «Теплотехника», «Термодинамика и теплопередача», а также может быть использовано студентами безотрывной формы обучения в качестве пособия для самостоятельной работы по этим дисциплинам.

Изложены основы теории технической термодинамики и теплообмена. Каждый раздел пособия включает типовые задачи с методикой их решений и задачи для самостоятельной работы студентов, а также контрольные вопросы по изложенному материалу.

Рецензенты:

кафедра ПиАХТ МГАТХТ им. М. В. Ломоносова, д.т.н., профессор Б. Г. Варфоломеев;  
заведующий отделом эксплуатации скважин и промысловых систем института «ПечорНИПИнефть», д.т.н., профессор В. И. Литвиненко

© Ухтинский государственный  
технический университет, 2002

© Белоусов Н. А., 2002

ISBN 5-88179-0134-7

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Раздел 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА.....	4
Раздел 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА.....	6
Раздел 3. ТОПЛИВО И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ.....	6
Раздел 4. КОТЛОАГРЕГАТЫ.....	7
Раздел 5. ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ И ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ.....	8
Раздел 6. ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС).....	8
Раздел 7. КОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКИ.....	9
Раздел 8. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	10
Задание на контрольную работу № 1 по разделу «Техническая термодинамика».....	11
Методические указания к выполнению контрольной работы №1.....	18
Задание на контрольную работу № 2 по разделу «Основы теплопередачи».....	28
Методические указания к выполнению контрольной работы № 2.....	39
Расчет термодинамического цикла.....	44
Расчет цикла паросиловой установки, расчет сопел.....	57
Библиографический список.....	68

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетика и ее значение в народном хозяйстве. Тепловые установки и их роль в энергетике страны. Топливные ресурсы и топливный баланс. Атомная (ядерная) энергетика и перспективы ее развития. Энергетическое и технологическое использование топлива.

История развития теплоэнергетики и теплотехники как ее теоретической базы. Роль русских ученых в развитии теплотехники.

### Раздел 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Введение. Предмет технической термодинамики. Основные определения. Основные параметры состояния.

Основные законы идеальных газов. Уравнение состояния идеального газа. Характеристическая газовая постоянная. Универсальная газовая постоянная. Понятие об уравнении состояния реального газа.

Смеси идеальных газов. Понятие о газовой смеси. Способы задания смеси газов. Соотношение между массовыми и объемными долями. Определение кажущейся молекулярной массы смеси газов. Уравнение состояния для смеси газов. Определение парциальных давлений.

Теплоемкость идеальных газов. Основные определения. Зависимость теплоемкости от температуры. Средняя и истинная теплоемкость. Теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме. Определение количества тепла. Теплоемкость смеси идеальных газов.

Первый закон термодинамики. Определение термодинамического процесса. Равновесный и неравновесный процессы. Обратимый и необратимый процессы. Изображение термодинамических процессов в  $p$ - $v$ -диаграмме. Работа расширения или сжатия газа. Внутренняя энергия как функция состояния рабочего тела. Энтальпия идеальных газов. Сущность Первого закона термодинамики. Аналитическое выражение Первого закона термодинамики в двух формах записи:  $dq = di + pdv$  и  $dq = di - vdp$ .

Понятие об энтропии идеального газа как функции состояния.  $T$ - $s$ -диаграмма. Графическое изображение теплоты процесса в  $T$ - $s$ -диаграмме.

Процессы изменения состояния идеальных газов. Основные процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Аналитическое исследо-

вание этих процессов и графическое изображение в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах. Политропные процессы и их анализ.

Второй закон термодинамики. Круговые термодинамические процессы (циклы). Прямые и обратные циклы. Оценка эффективности прямого и обратного циклов. Прямой и обратный обратимые циклы Карно. Теорема Карно. Среднеинтегральная температура подвода и отвода тепла в цикле. Сущность Второго закона термодинамики и его основные формулировки. Аналитическое выражение Второго закона термодинамики. Возрастание энтропии конечной изолированной системы в необратимых процессах. Опровержение идеалистической теории о «тепловой смерти» вселенной.

Водяной пар. Основные определения. Процесс парообразования в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах. Определение параметров воды и водяного пара. Таблицы воды и водяного пара,  $i$ - $s$ -диаграмма водяного пара. Расчет основных термодинамических процессов водяного пара с помощью таблиц и  $i$ - $s$ -диаграммы.

Истечение газов и паров. Основные понятия. Уравнение Первого закона термодинамики для потока. Работа проталкивания. Связь между приращением кинетической энергии потока и технической (располагаемой) работой. Адиабатное течение в соплах. Скорость и массовый расход газа при адиабатном истечении. Исследование адиабатного истечения идеального газа из суживающегося сопла. Критическое отношение давлений. Критическая скорость и критические параметры газа при течении его в сопле. Сопло Лавалля. Особенности его расчета. Расчет истечения водяного пара из суживающихся сопел и сопла Лавалля с помощью таблиц и  $i$ - $s$ -диаграммы. Действительный процесс истечения.

Дросселирование (мятие) газов и паров. Сущность процессов дросселирования. Изменение параметров в процессе адиабатного дросселирования. Условное изображение процесса дросселирования в  $i$ - $s$ -диаграмме. Практическое использование процесса дросселирования.

Влажный воздух. Определение влажного воздуха. Абсолютная и относительная влажность воздуха. Влажосодержание воздуха. Температура точки росы. Удельный объем и энтальпия влажного воздуха,  $i$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха. Простейшие случаи ее применения.

Термодинамические основы компрессорных машин. Рабочий процесс идеального компрессора. Работа, затрачиваемая на привод одноступенчатого компрессора при изотермическом, адиабатном и политропном сжатии. Влияние объема вредного пространства на работу компрессора. Многоступенчатый ком-

прессор. Изображение в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах термодинамических процессов, протекающих в компрессорах.

Циклы тепловых двигателей и теплоэнергетических установок. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания и их анализ. Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Методы повышения КПД ГТУ.

Основной цикл паросиловых установок (цикл Ренкина). Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла Ренкина. Изображение этого цикла в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Понятие о промежуточном перегреве пара.

Циклы холодильных установок. Цикл паровой компрессорной холодильной установки. Характеристика холодильных агентов, применяемых в паровых холодильных установках. Холодильный коэффициент и холодопроизводительность установки.

## **Раздел 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Теплопроводность. Температурное поле. Закон теплопроводности Фурье. Коэффициент теплопроводности. Теплопроводность плоской и цилиндрической стенок в стационарных условиях.

Конвективный теплообмен. Особенности течения жидкостей в условиях естественной и вынужденной конвекции. Свойства теплоносителей. Коэффициент теплоотдачи. Понятие о теории подобия. Характерные критерии и основные формулы для расчета конвективного теплообмена в различных условиях течения. Теплообмен при кипении жидкостей и конденсации паров.

Теплоперенос излучением. Основные понятия и определения. Основные законы лучистого теплообмена. Лучистый теплообмен между телами, роль экранов.

Теплопередача и теплообменные аппараты. Теплопередача через плоскую и цилиндрическую стенки. Виды теплообменных аппаратов. Рекуперативные теплообменники. Уравнения теплового баланса и теплопередачи. Средний температурный напор. Основы расчета рекуперативных теплообменников.

## **Раздел 3. ТОПЛИВО И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ**

Топливо, его происхождение, виды. Характеристика твердого, жидкого и газообразного топлив. Перспективы применения различных видов топлив в

энергетике и на железнодорожном транспорте. Элементарный состав и теплота сгорания топлива. Условное топливо.

Расчеты горения топлива. Стехиометрические расчеты реакций горения элементов топлива. Определение теоретически необходимого воздуха и состава продуктов сгорания. Коэффициент избытка (расхода) воздуха, его связь с процессами смесеобразования. Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания:  $i$ -диаграмма. Теоретическая температура горения и ее определение по  $i$ -диаграмме.

Горение газов. Кинетика химических реакций. Кинетическое и диффузное горение газа. Энергия активации. Фронт пламени и скорость его распространения. Цепные разветвленные реакции. Взрывное горение и детонация. Смесеобразование и горение турбулентных газовых струй. Средняя объемная скорость горения. Самовоспламенение. Устройство газовых горелок.

Горение жидкого топлива. Способы распыления жидких топлив и их карбюрация. Смесеобразование и горение факела. Средняя объемная скорость горения. Устройство форсунок и горелок для жидкого топлива.

Горение твердого топлива. Кинетика гетерогенных реакций углерода. Диффузный и кинетический режимы горения углеродных частиц. Влияние выхода летучих на процесс воспламенения и горения твердого топлива. Горение твердого топлива в слое.

Принципы устройства слоевого сжигания топлива. Горение измельченного и пылевидного топлива. Горелки для сжигания пылевидного топлива.

#### **Раздел 4. КОТЛОАГРЕГАТЫ**

Назначение и принципиальная схема котельной установки, ее основные элементы и их компоновка. Тепловой баланс котлоагрегата. КПД котлоагрегата (брутто) и котельной установки (нетто), методы его повышения. Определение часового расхода натурального и условного топлив, испарительности топлива.

Типы топок. Классификация топок и общие требования к ним. Выбор типа топки в зависимости от рода топлива и паропроизводительности котла. Определение площади решетки, объема топочной камеры и лучевоспринимающей поверхности.

Слоевые топки, их конструктивные схемы. Полумеханические топки с неподвижным слоем. Топки с цепной решеткой.

Камерные топки – факельные и вихревые. Пылеугольные топки. Шахтно-мельничные топки. Вихревые и циклонные топки. Топки для жидкого и газообразного топлив.

Общие сведения о котельных агрегатах. Паровые котлоагрегаты с естественной и принудительной циркуляцией (барабанные и прямоточные). Водогрейные котлы. Котлы-утилизаторы.

Пароперегреватели, их типы, расчетные уравнения баланса тепла и теплообмена. Водяные экономайзеры и воздухоподогреватели, их назначение, конструктивное выполнение и принципы их расчета.

Эксплуатация котлоагрегатов и основные положения правил Ростехнадзора и техники безопасности.

## **Раздел 5. ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ И ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ**

Схемы устройства турбин и принципы их действия. Преобразование энергии в сопловом аппарате и на лопатках турбин. Активный и реактивный принципы работы потока пара или газа в ступени турбины. Треугольники скоростей. Баланс энергии, анализ потерь и КПД ступени турбины. Многоступенчатые турбины.

Паровые турбины. Конструктивные особенности конденсационных турбин и турбин с противодавлением, теплофикационных турбин. Характерные параметры и единичные мощности турбин.

Газотурбинные установки (ГТУ). Схема и основные элементы ГТУ. Выбор степени повышения давления в компрессоре ГТУ по максимуму удельной работы и максимуму КПД. Эффективный КПД ГТУ: влияние на него температуры газа перед турбиной. КПД турбины и компрессора.

Влияние регенерации тепла уходящих газов, промежуточного охлаждения воздуха между ступенями сжатия в компрессоре и ступенчатого сгорания на экономичность ГТУ. Замкнутый цикл ГТУ. Достоинства и недостатки ГТУ и перспективы их развития.

## **Раздел 6. ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС)**

Принципы работы и рабочие процессы ДВС. Схемы устройства, классификация и принципы действия двигателей. Рабочий процесс различных ДВС и



индикаторные диаграммы. Топливо для ДВС. Смесеобразование и зажигание. Методы регулирования мощности двигателя.

Параметры, характеризующие работу ДВС. Среднеиндикаторное давление и индикаторная мощность двигателя. Эффективная мощность и мощность трения. Тепловой баланс и потери в двигателях. Коэффициенты полезного действия ДВС. Определение часового и удельных расходов топлива. Способы повышения мощности и экономичности ДВС; наддув.

## Раздел 7. КОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Поршневые компрессоры. Рабочий процесс одноступенчатого поршневого компрессора и его действительная индикаторная диаграмма. Влияние вредного пространства и теплообмена между газами и стенками цилиндра на подачу компрессора. Коэффициент подачи. Определение производительности и мощности компрессора. Изотермический и адиабатный КПД.

Многоступенчатые компрессоры. Наивыгоднейшая степень повышения давления при многоступенчатом сжатии. Промежуточные охладители. Регулирование поршневых компрессоров.

Турбовоздуходувки и турбокомпрессоры. Многоступенчатые центробежные и осевые турбомашин, процесс сжатия в них, схема ступеней, треугольники скоростей.

Вентиляторы. Принцип действия центробежных и осевых вентиляторов, их характеристики. Классификация вентиляторов и их выбор.

### *Примерный перечень лабораторных работ*

1. Определение среднего показателя политропы сжатия индикаторной диаграммы одноступенчатого поршневого компрессора.
2. Определение зависимости температуры насыщенного пара от давления.
3. Исследование параметров влажного воздуха.
4. Определение коэффициента теплопроводности различных материалов.
5. Определение коэффициента теплоотдачи при свободной или вынужденной конвекции.
6. Определение степени черноты поверхности твердого тела.
7. Определение теплоты сгорания топлива.
8. Определение объемного состава дымовых газов.

9. Испытание парового или водогрейного котла.
10. Испытание газовой (паровой) турбины.
11. Испытание поршневого двигателя внутреннего сгорания.
12. Испытание компрессора.

## **Раздел 8. ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Выполнению контрольных работ должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса "Теплотехника". При их выполнении студент должен сначала письменно ответить на контрольные вопросы, а затем решить соответствующие задачи (контрольные вопросы и условия задач должны быть переписаны в пояснительную записку).

При подготовке к экзаменам студенту рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, предложенные в заданиях.

Ответы на контрольные вопросы должны быть краткими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами и эскизами конструкций. При решении задач студент указывает, по какой формуле и в каких единицах измерения определяются величины, откуда взяты подставленные в формулу значения (если они не содержатся в условиях задачи). Результаты решения сводят в таблицу.

При использовании таблиц, номограмм, эмпирических формул и других справочных материалов надо сделать ссылку на литературный источник.

В приложениях к заданиям приведены справочные таблицы средних изобарных теплоемкостей некоторых газов, термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения, физических свойств сухого воздуха и воды на линии насыщения.

Вычисления всех величин проводятся в развернутом виде. Если подставляемая в формулу величина определяется по какой-либо расчетной зависимости, это промежуточное вычисление подробно записывается. Обозначения величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках.

Решения задач нужно иллюстрировать схемами и графиками, тщательно выполненными и подклеенными к пояснительной записке в соответствующих местах. Пояснительная записка должна иметь поля для заметок рецензента. На

графиках необходимо показать все нужные числовые данные (значения давления, температуры и пр.).

Таблица 1

*Таблица вариантов для всех специальностей*

Задания № 1 и № 2	Последняя цифра учебного шифра студента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номер контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Номер контрольных задач	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	12	11	13	14	15	16	12	14	15	16
	21	17	18	19	20	17	18	19	20	22
	23	30	24	25	26	17	28	29	25	30

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из табл. 1, а числовые данные к задачам по предпоследней цифре шифра – из соответствующих таблиц каждой задачи, которые приведены в конце задания.

### **Задание на контрольную работу № 1 по разделу «Техническая термодинамика»**

#### *Контрольные вопросы*

1. Напишите уравнение состояния идеального газа. Поясните физический смысл газовой постоянной. Как определяют ее значение для газов?
2. Какова связь между массовой, мольной и объемной теплоемкостями газа? Что такое истинная и средняя теплоемкости?
3. Дайте определение внутренней энергии реального и идеального газов. Как найти изменение внутренней энергии идеального газа?
4. Покажите, как определяется работа в обратимых термодинамических процессах аналитически и графически в  $pV$ -диаграмме.
5. Приведите формулировку Первого закона термодинамики. Напишите аналитическое выражение этого закона для основных термодинамических процессов.

6. Как изменяется температура газа при изобарном и адиабатном расширении? Ответ проиллюстрируйте графиками процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
7. Что такое энтальпия газа, и как определяется изменение энтальпии идеального газа в каком-либо термодинамическом процессе?
8. Что называется энтропией рабочего тела? Как определяется изменение энтропии идеального газа в термодинамическом процессе?
9. Изобразите в  $pV$  и  $Ts$ -координатах идеальный прямой цикл Карно. Дайте необходимые пояснения.
10. В чем состоит содержание Второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона (достаточно привести две формулировки).
11. Опишите процесс парообразования в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
12. Изобразите процесс адиабатного расширения и (условно) адиабатного дросселирования пара в  $is$ -диаграмме.
13. Дайте определение процесса истечения газов и паров. По каким формулам подсчитываются скорость и массовый расход рабочего тела при адиабатном истечении?
14. В чем сущность процесса дросселирования, и как практически осуществляется этот процесс? Как условно изображается процесс дросселирования в  $is$ -диаграмме?
15. Что называется влажным воздухом? Дайте определение влагосодержания, относительной влажности воздуха и температуры точки росы.
16. Опишите  $Id$ -диаграмму влажного воздуха. Каковы простейшие случаи ее применения?
17. Изобразите в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах термодинамические процессы, протекающие в компрессорах. Почему изотермический процесс сжатия газа в процессах является энергетически более выгодным, чем политропный, при  $n > 1$ ?
18. Назовите теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Изобразите их  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Дайте необходимые пояснения.
19. От каких величин зависит термический КПД теоретического цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении? Изобразите этот цикл в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
20. Каково влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД основного цикла паросиловых установок (цикла Ренкина)? Ответ иллюстрируйте в  $is$ -диаграмме.

### Задачи

1. В цилиндре 1 кг воздуха сжимается в одном случае по изотерме, а в другом – по политропе со средним показателем  $n = 1,2$  так, что объем уменьшается в 8 раз. Определить конечные значения температуры, давления и плотности воздуха, а также работу, изменение энтропии в процессах сжатия. Начальные параметры:  $p_1 = 750$  мм рт. ст. и  $t_1$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

2. Смесь идеальных газов заданного массового состава занимает объем  $V$  при постоянном абсолютном давлении  $p$  и температуре  $t$ . Требуется определить газовую постоянную смеси, среднюю молекулярную массу, массу смеси, объемный состав смеси, а также среднюю мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси (при  $p = \text{const}$ ) для интервала температур  $0 - t$ .

3. Смесь идеальных газов заданного массового состава (см. задачу № 2) расширяется при постоянной температуре  $t = 127^\circ$  так, что отношение конечного объема к начальному равно  $\epsilon$ . Определить газовую постоянную, конечные параметры смеси  $p_2$  и  $V_2$ , работу расширения, количество теплоты и изменение удельной энтропии в процессе. Для смеси заданы масса  $G$  и начальное абсолютное давление  $p_1$ . Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

4. Найти объемный состав смеси идеальных газов, заданный массовыми долями (см. задачу № 2). Определить также парциальные давления компонентов смеси, если абсолютное давление смеси  $p$ .

5. В процессе политропного сжатия воздуха  $G$ , кг/с, в одноступенчатом поршневом компрессоре отводится теплота в количестве  $Q$ , кДж/с. При сжатии от начального абсолютного давления  $0,1$  МПа температура воздуха возрастает от  $15^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить показатель политропы процесса сжатия, конечное давление, затраченную работу, а также изменение в процессе удельной энтропии газа.

6. Определить показатель политропы сжатия воздуха в одноступенчатом поршневом компрессоре, если давление в процессе возрастает в  $\beta$  раз, а температура газа изменяется от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить также теплоту процесса, работу процесса, изменение внутренней энергии и энтропии 1 кг газа.

7. Определить количество теплоты, отдаваемое каждым килограммом отработавших газов дизеля в утилизационном котле, где газы при постоянном

давлении охлаждаются от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ . Объемный состав отработавших газов:

$$r_{CO_2} = 0,008; r_{H_2O} = 0,06; r_{O_2} = 0,10; r_{N_2} = 0,76.$$

8. Диаметр цилиндров тепловозного дизеля  $D = 318$  мм, ход поршней  $s = 330$  мм; степень сжатия  $\epsilon = 12$ .

Определить теоретическую работу политропного сжатия воздуха в одном цилиндре, изменения удельных значений внутренней энергии и энтропии в процессе. Абсолютное давление воздуха в начале сжатия  $p_1 = 95$  кПа, температура  $t_1 = 127^\circ\text{C}$ . Показатель политропы процесса сжатия  $n$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

9. Воздух, имея начальную температуру  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  и абсолютное давление  $p_1$ , изотермически расширяется до давления  $p_2 = 0,1$  МПа, а затем нагревается в изохорном процессе до тех пор, пока давление вновь не станет равным  $p_1$ . Требуется определить удельный объем воздуха в конце изотермического расширения и температуру в конце изохорного подвода теплоты, а также изменения удельных значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Изобразить процессы в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

10. 1 кг азота, имея начальную температуру  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , расширяется при постоянном давлении  $p$ , при этом удельный объем его увеличивается в  $\epsilon$  раз. Определить удельный объем и температуру азота в конце процесса, работу в процессе, изменения внутренней энергии и энтропии, а также подведенную теплоту. Средняя массовая теплоемкость азота имеет линейную зависимость от температуры.  $C_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$  кДж/кг.

11. Определить параметры состояния 1 кг воздуха в конце его адиабатного расширения от давления  $p_1$  до  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить также работу процесса и изменение внутренней энергии воздуха. Начальная температура  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ .

12. В установке по приготовлению дистиллированной воды для заправки системы охлаждения тепловозного дизеля насыщенный пар, имея абсолютное давление  $p_1$  и степень сухости  $x = 0,95$ , конденсируется и охлаждается до температуры  $t_1 = 80^\circ\text{C}$  проточной водой. Какое количество воды требуется для приготовления дистиллята в сутки в количестве  $G$ , если температурный перепад проточной воды в теплообменнике установки составляет  $\Delta t_w$ ? Теплообменом рабочих тел установки с окружающей средой пренебречь.

13. В закрытом сосуде объемом  $10 \text{ м}^3$  находится влажный насыщенный водяной пар с абсолютным давлением  $p$ . В объеме пара содержится  $30 \text{ кг}$  жидкости. Определить массу парообразной фазы в сосуде и степень сухости пара.

14. Влажный насыщенный водяной пар со степенью сухости  $x$  перегревается при постоянном абсолютном давлении  $p$  до температуры  $t$ . На сколько градусов перегреется пар? Какое количество теплоты затрачивается на подсушку и перегрев пара?

15.  $1 \text{ кг}$  перегретого водяного пара, имея температуру  $t_1$  и энтропию  $S_1$ , охлаждается в процессе постоянного объема до состояния, когда энтальпия пара становится равной  $2500 \text{ кДж/кг}$ . Определить состояние пара и его параметры в конце процесса, а также количество отведенной теплоты. Решение задачи иллюстрировать на  $is$ -диаграмме.

16. Влажный насыщенный водяной пар, имея начальные параметры  $t_1 = 139^\circ\text{C}$  и  $x = 0,94$ , сжимается в процессе без теплообмена с окружающей средой. При этом объем пара уменьшается в  $\epsilon$  раз. Определить состояние и параметры пара в конце процесса сжатия, а также изменение удельной энтальпии и работу  $1 \text{ кг}$  пара в процессе. Изобразить процесс в  $is$ -диаграмме.

17. Какой должна быть площадь сечения отверстия предохранительного клапана парового котла, чтобы при внезапном прекращении отбора сухого насыщенного пара из него в количестве  $G$  абсолютное давление не превысило  $1,4 \text{ МПа}$ ? Атмосферное давление  $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$  Потерей давления на мятие пара, теплообменом при прохождении отверстия и скоростью пара на входе в отверстие клапана пренебречь.

18. Определить основные размеры сопла Лавалья, через которое вытекает воздух в количестве  $0,5 \text{ кг/с}$  в среду с давлением  $0,1 \text{ МПа}$ . Начальные параметры газа: абсолютное давление  $p_1$  и температура  $t_1$ . Истечение считать адиабатным. Потерями энергии на трение пренебречь. Изобразить в масштабе разрез сопла, приняв при этом угол конусности расширяющейся части равным  $10^\circ$ .

19. В дроссельном клапане парового двигателя водяной пар с начальными параметрами  $p_1$  и  $t_1$  дросселируется до давления  $1 \text{ МПа}$ , а затем адиабатно расширяется в цилиндре двигателя до давления  $0,1 \text{ МПа}$ . Определить потерю располагаемой работы пара вследствие дросселирования. Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

20. Влажный насыщенный пар с абсолютным давлением  $p_1$  поступает в дроссельный калориметр для определения его влажности. После дросселирования до давления  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$  температура пара становится равной  $t_2$ . Какова

влажность пара до дросселирования? Как возрастает удельная энтропия пара в дроссельном калориметре? Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

21. В цилиндры двигателя внутреннего сгорания всасывается 200 кг атмосферного воздуха в час при давлении  $B = 745$  мм рт. ст., температуре  $t$  и относительной влажности  $\varphi$ . Какое количество воды всасывается двигателем в час?

22. Какое количество воздуха необходимо пропустить через сушильную камеру, чтобы от материала, помещенного в нее, отвести 1 т воды? Наружный воздух при барометрическом давлении  $B = 745$  мм рт. ст., имея температуру  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  и относительную влажность  $\varphi_1 = 50\%$ , в калорифере подогревается до температуры  $t_2$ , а затем воздух поступает в сушильную камеру и выходит из нее при относительной влажности  $\varphi_2 = 90\%$ . Решение задачи проиллюстрировать в  $Id$ -диаграмме.

23. 1 кг сухого воздуха в прямом обратимом цикле Карно совершает полезную работу  $l_0$ . Максимальное абсолютное давление воздуха 10 МПа и соответствующая абсолютная температура 1200 К. В цикле к газу подводится теплота  $q_1$ . Минимальное давление в цикле 0,1 МПа. Определить термический КПД и основные параметры во всех переходных точках цикла. Изобразить цикл в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах.

24. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме определить степень сжатия, основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если повышение давления в процессе сжатия  $\beta$  и понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет  $\Delta t$ . Рабочее тело (1 кг сухого воздуха) в начальной точке цикла имеет давление 0,1 МПа и температуру  $67^\circ\text{C}$ . Изобразить цикл в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах.

25. Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает по идеальному циклу с подводом  $q_1$  теплоты при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, его термический КПД и полезную работу, если начальное абсолютное давление 0,1 МПа, начальная температура  $80^\circ\text{C}$  и степень сжатия  $\varepsilon$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах.

26. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным



подводом теплоты, а также степень сжатия, термический КПД и полезную работу, если заданы характеристики цикла  $\lambda$  и  $p$ . В начальной точке цикла  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 67^\circ\text{C}$ . Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна  $600^\circ\text{C}$ . Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах.

27. Степень повышения давления в компрессоре газотурбинной установки (ГТУ) равна  $\lambda$ , температура рабочего тела (для  $k = C_p/C_v = 1,4$ ) перед соплами турбины равна  $800^\circ\text{C}$ . В идеальном цикле ГТУ теплота подводится при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, удельную полезную работу цикла, а также изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты, приняв теплоемкость рабочего тела не зависящей от температуры. Начальные параметры цикла  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ . Цикл представить в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах.

28. Теоретический одноступенчатый поршневой компрессор (без объема вредного пространства) имеет подачу воздуха  $V_1$  при давлении  $0,1$  МПа и температуре  $17^\circ\text{C}$ . Определить температуру и объем воздуха в конце политропного ( $n = 1,3$ ) процесса сжатия до абсолютного давления  $p_2$ . Определить также теоретическую мощность привода компрессора и сравнить ее с мощностью изотермического сжатия.

29. Вычислить и показать графически зависимость термического КПД Ренкина паросиловой установки от начальной температуры пара, приняв ее равной  $400, 450, 500, 550$  и  $600^\circ\text{C}$  при одинаковых значениях начального абсолютного  $p_1$  и конечного  $p_2 = 5$  кПа давления. Показать также влияние повышения начальной температуры пара в цикле на изменение степени влажности пара, выходящего из парового двигателя. Решение задачи проиллюстрировать на  $i$ - $s$ -диаграмме.

30. Определить, как при понижении начального давления путем дросселирования изменятся располагаемый теплотермический КПД цикла Ренкина паросиловой установки, если начальное абсолютное давление пара  $p_1$ , температура  $t_1$ , а давление в конденсаторе установки  $5$  кПа. Давление, до которого дросселируется пар, равно  $p_2$ . Решение задачи проиллюстрировать на  $i$ - $s$ -диаграмме.

## Методические указания к выполнению контрольной работы №1

### Задачи 1-11

Задачи составлены по следующим разделам технической термодинамики: уравнение состояния идеального газа, смесь идеальных газов, теплоемкость, первый закон термодинамики и основные термодинамические процессы.

При решении этих задач могут быть использованы следующие формулы и выражения.

Уравнения состояния идеального газа:

$$p\nu = RT \text{ (для 1 кг газа)}$$

или

$$pV = GRT \text{ (для } G \text{ кг газа),}$$

где  $R = 8314/\mu$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$\mu$  – масса 1 кмоль газа, кг (численно равна молекулярной массе газа).

Для газовых смесей вводят понятие о так называемой средней (кажущейся) молекулярной массе смеси, значение которой определяется по выражениям: через объемные доли

$$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i,$$

через массовые доли

$$\mu_{см} = 1 / \sum m_i / \mu_i,$$

где  $\mu_i$  – молекулярная масса компонента, входящего в смесь;

$m_i = \frac{G_i}{G}$  – массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входящего в смесь, к массе всей смеси);

$r = \frac{V_i}{V}$  – объемная доля (отношение приведенного объема какого-либо газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси:

$$r_i = m_i \mu_{см} / \mu_i; \quad m_i = r_i \mu_i / \mu_{см}.$$

Газовую постоянную смеси идеальных газов  $R$  можно определить или через газовые постоянные отдельных компонентов  $R_i$ , входящих в смесь,

$$R = \sum_1^n m_i R_i$$

или через среднюю молекулярную массу смеси  $R = 8314/\mu_{\text{см}}$  Дж/(кг·К).

Для определения парциального давления отдельного компонента  $p_i$ , входящего в смесь, служат формулы

$$p_i = r_i p \text{ и } p_i = m_i \frac{R}{R} p,$$

где  $p$  – общее давление смеси газов.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость  $\mu c$ , кДж/(моль·К), массовую –  $c$ , кДж/(кг·К) и объемную –  $c'$  кДж/(м<sup>3</sup>·К). Объемную теплоемкость относят к 1 м<sup>3</sup> при нормальных условиях ( $p_0 = 760$  мм рт. ст.,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Эти теплоемкости между собой связаны следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c}{p_0} \text{ и } c' = \frac{\mu c}{22,4} = c p_0,$$

где  $\mu$  – молекулярная масса газа;

$p_0$  – плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Мольная, массовая и объемная теплоемкости могут быть при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Разность массовых теплоемкостей при постоянном давлении  $C_p$  и постоянном объеме  $C_v$  равна газовой постоянной:

$$C_p - C_v = R \text{ (уравнение Майера).}$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты) обозначают буквой  $k$ , т.е.

$$k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{C_p}{C_v}.$$

Следовательно

$$c_v = \frac{R}{k-1}; \quad c_p = k c_v.$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т.е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной.

Примерные значения мольных теплоемкостей и показателя адиабаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Газы	Теплоемкость, кДж/(кмоль·К)		k
	$\mu c_v$	$\mu c_p$	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,40
<i>Трех- и многоатомные</i>	29,31	37,68	1,29

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В прил. 1 задания приведены средние молярные теплоемкости некоторых газов в пределах от  $0^\circ$  до  $t$ . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях производится интерполяция.

Для смесей идеальных газов массовая теплоемкость  $C_{см} = \sum_1^n m_i c_i$ , объемная теплоемкость  $c_{см} = \sum_1^n r_i c_i$  и молярная теплоемкость  $\mu c_{см} = \sum_1^n r_i \mu c_i$ .

Для нахождения, например, средней молярной теплоемкости в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость  $\mu c_{m1}$  и  $\mu c_{m2}$  – соответственно в пределах  $0^\circ - t_1$  и  $0^\circ - t_2$  (средние теплоемкости сопровождаются индексом  $m$ ). Затем по выражению  $\mu c_m = \frac{\mu c_{m2} t_2 - \mu c_{m1} t_1}{t_2 - t_1}$  определить искомую теплоемкость.

По аналогичным формулам определяются  $s$  и  $s'$ .

Если в процессе участвуют  $G$  кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе  $Q = G(\mu c_{m2} t_2 - \mu c_{m1} t_1)$ .

В  $p$ - $v$ -диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение  $p v^n = \text{const}$ , где  $n$  – показатель политропы. Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается следующими формулами:  $p_2 / p_1 = (v_1 / v_2)^n$ ;  $T_2 T_1 = (v_1 / v_2)^{n-1}$ ;  $T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{\frac{n-1}{n}}$ .

Для адиабатного процесса в этих формулах показатель  $n$  заменяется показателем  $k = c_p / c_v$ .

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формуле:

$$u_2 - u_1 = c_v (t_2 - t_1);$$

$$i_2 - i_1 = c_p ((t_2 - t_1));$$

$$S_2 - S_1 = c \ln T_2/T_1.$$

В последнем выражении  $c$  – теплоемкость соответствующего процесса.

Для политропного процесса теплоемкость  $c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$ .

Удельная работа политропного процесса:

$$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

или

$$l = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

Для адиабатного процесса:  $n = k$ , для изобарного процесса:  $n = 0$ .

В адиабатном процессе удельная работа равна изменению внутренней энергии с обратным знаком:  $l = (u_2 - u_1) = c_u(t_1 - t_2)$ .

В изотермическом процессе давление изменяется обратно пропорционально объему  $p_1/p_2 = V_2/V_1$ . Работа этого процесса равна теплоте:

$$L = Q = GRT \ln V_2/V_1.$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе

$$S_2 - S_1 = R \ln V_2/V_1.$$

Следует помнить, что  $T, \text{ }^\circ\text{K} = t, \text{ }^\circ\text{C} + 273,15$ , но  $dT = dt$ , т.е.  $\Delta T = \Delta t, \text{ K}$ .

### Задачи 12 и 13

Количество проточной воды  $W$ , которое потребуется для охлаждения  $G$ , кг, пара (задача 12) определится из уравнения теплового баланса  $G(i_x - i_{\text{кд}}) = W c_{\text{pm}} \Delta t$ , где энтальпия пара  $i_x = i' + g x$ , энтальпия конденсата (дистиллята)  $i_{\text{кд}} = c_{\text{pm}}$ .

В задаче 13 по заданному давлению надо в соответствующей таблице насыщенного пара найти значения удельных объемов кипящей жидкости  $v'$  и пара  $v''$ . Объем жидкости в сосуде  $V_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} v'$ . Масса парообразной фазы  $G_{\text{n}} = V_{\text{n}}/v''$ .

### Задачи 14-16

Задачи решаются при помощи  $i$ - $s$ -диаграммы водяного пара, практическая часть которой состоит из двух областей. Ниже пограничной кривой сухого на-

сыщенного пара (степень сухости  $x = 1$ ) будет область влажного насыщенного пара ( $0 < x < 1$ ), выше – область перегретого пара. Поэтому, когда в задаче требуется определить состояние пара, то нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В  $i$ s-диаграмме в области влажного пара соответствующие изобара и изотерма совпадают и изображаются одной линией, так как в этой области определенному давлению соответствует определенная температура насыщения. В области перегретого пара изотермы отклоняются от изобар вправо, асимптотически приближаясь к горизонтальной линии.

Удельная внутренняя энергия пара  $u = i - pv$  (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т.е.  $q = i_2 - i_1$ .

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса  $l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1v_1) - (i_2 - p_2v_2)$ .

### Задачи 17-20

Задачи составлены на процессы истечения и дросселирования газов и паров. Процесс истечения принимается без теплообмена, т.е. адиабатным, для которого в указаниях к задачам 1-11 приведены формулы, связывающие основные параметры идеального газа, и неразрывным (сплошным), когда соблюдается равенство (уравнение неразрывности).

$$Gv = fc,$$

где  $G$  – массовый расход газа или пара, кг/с;

$v$  – удельный объем газа или пара, м<sup>3</sup>/кг;

$f$  – площадь данного сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$c$  – скорость потока в рассматриваемом сечении, м/с.

Из этого равенства можно определить массовый расход или площадь данного сечения сопла.

Если адиабатное истечение газа или пара происходит при отношении давлений  $p_2/p_1$  больше критического значения  $(p_2/p_1)_{кр}$ , то применяют сужающееся сопло. В этом случае теоретическая скорость истечения определяется по формуле, м/с,

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

В этой формуле величины  $P$  и  $v$  имеют соответственно следующие единицы измерения: Па, м<sup>3</sup>/кг.

Для водяного пара скорость истечения определяют по формуле

$$c_2 = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2},$$

где  $i_1$  и  $i_2$  – соответственно энтальпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по  $is$ -диаграмме.

Критическое отношение давлений  $(p_2/p_1)_{кр}$  для двухатомных газов, в том числе для воздуха ( $k = 1,4$ ), равно 0,528, а для перегретого водяного пара – 0,546.

Если истечение происходит при  $(p_2/p_1) < (p_2/p_1)_{кр}$ , то применяют расширяющееся сопло Лавала, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла определяется по приведенной выше формуле, а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов – по формуле

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}$$

или

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1}.$$

Для перегретого пара

$$c_{кр} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{кр}},$$

где  $i_{кр}$  – энтальпия пара в минимальном сечении сопла в конце адиабатного процесса расширения пара до критического давления  $p_{кр} = 0,546 p_1$  определяется по  $is$ -диаграмме.

Площадь минимального сечения сопла Лавала может быть определена из уравнения неразрывности потока

$$f_{\min} = \frac{M v_{кр}}{c_{кр}},$$

где  $v_{кр} = v_1 (p_1/p_{кр})^{1/k}$  для газов. Для водяного пара величина  $v_{кр}$  может быть определена по  $is$ -диаграмме.

Так как в процессе адиабатного дросселирования газа его энтальпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в  $is$ -диаграмме, будет параллельна оси  $s$ .

### Задачи 21-22

Для решения указанных задач используется  $Id$ -диаграмма влажного воздуха. По заданным значениям  $t$  и  $\phi$  в задаче 21 находится влагосодержание  $d$ , т.е. количество водяного пара, содержащееся в 1 кг сухого воздуха, а затем количество влаги, всасываемой в цилиндр двигателя с 200 кг воздуха в час. В задаче 22 количество воздуха в кг для испарения 1 кг влаги в сушильной камере равно  $1000/(d_2 - d_1)$ , где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно влагосодержащая в г/кг сухого воздуха на входе его в сушильную камеру и на выходе из нее.

### Задачи 23-27

Вычерчивается цикл  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. Неизвестное значение удельного объема в конце изотермического расширения может быть определено из формулы теплоты этого процесса.

Так как в теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установках процессы сжатия и расширения с понижением давлением являются адиабатными, то основные параметры в точках этих процессов могут быть определены из зависимостей между начальными и конечными параметрами адиабатного процесса (см. указания к задачам 1-11).

В задаче 25 неизвестное значение температуры в соответствующей точке процесса определяется из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД  $\eta_t$  и удельная полезная работа  $l_0$ , то удельное количество подведенной теплоты в цикле  $q_1 = \eta_t l_0$ , а отведенной –  $q_2 = q_1 - l_0$ .

### Задача 28

Если объем всасываемого газа –  $V_1$ , м<sup>3</sup>/с, то теоретическая секундная работа (мощность) процесса политропного сжатия

$$L_{\text{сж}} = \frac{1}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$



При политропном сжатии теоретическая мощность привода компрессора в  $n$  раз больше мощности процесса сжатия.

Теоретическая работа привода компрессора при изотермическом сжатии равна работе процесса сжатия:

$$L = p_1 V_1 \ln(p_2/p_1).$$

### Задачи 29 и 30

Термический КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина)

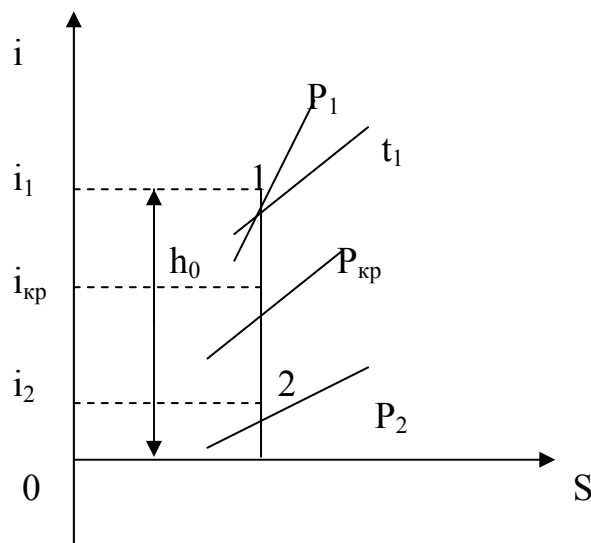
$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2},$$

где  $i_1$  – энтальпия пара в начале адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 1). Значение  $i_1$  определяется по  $i$ s-диаграмме по заданным начальным параметрам пара (см. рис.);

$i_2$  – энтальпия пара в конце адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 2 находится на пересечении линии расширения  $S_1 = \text{const}$  с изобарой  $p_2$  заданного давления в конденсаторе, рис.);

$i'_2$  – энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при заданном давлении в конденсаторе. Значение  $i'_2$  берется из табл. 2 приложения задания.

Процесс дросселирования пара условно изображают линией постоянной энтальпии.



Числовые данные к задачам контрольной работы № 1

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$\varepsilon$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$t_1, ^\circ\text{C}$	47	40	37	30	27	20	17	10	7	0
2	Массовый состав смеси; %:										
	$\text{CO}_2$	18	14	10	17	10	10	12	16	13	18
	$\text{H}_2\text{O}$	1	15	6	5	4	7	14	7	12	10
	$\text{N}_2$	65	45	76	70	80	60	47	62	54	46
	$\text{O}_2$	16	26	8	8	6	18	27	15	21	26
	$V, \text{м}^3$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$p, \text{МПа}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	1,0	
$T, ^\circ\text{C}$	200	300	400	500	600	600	500	400	300	200	
3	$E$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$G, \text{кг}$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	10
	$p_1, \text{МПа}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
4	$p, \text{МПа}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	$10^3 \cdot G, \text{кг/с}$	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	$Q, \text{кДж/с}$	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
	$t_2, ^\circ\text{C}$	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75
6	$B$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	$t_2, ^\circ\text{C}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
7	$t_1, ^\circ\text{C}$	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
	$t_2, ^\circ\text{C}$	230	235	240	245	250	260	270	280	290	300
8	$N$	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,29	1,27	1,25	1,23	1,2
9	$p_1, \text{МПа}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
10	$p, \text{МПа}$	7	6	5	4	3	2	1	0,8	0,6	0,5
	$\varepsilon$	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
11	$p_1, \text{МПа}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5

Продолжение таблицы 3

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
12	p, МПа	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,35	0,4
	G, т/сут	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	$\Delta t_w$ , К	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
13	p, МПа	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8
14	X	0,91	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9
	p, МПа	1	1,5	2	3	4	5	6	7	7	10
	t, °C	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
15	t, °C	270	480	290	320	400	530	420	500	520	560
	s <sub>1</sub> , кДж/(кг·К)	7,7	8,2	7,4	7,5	7,7	8	7,3	7,5	6,7	7,3
16	E	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15
17	G, кг/с	0,7	1,1	1,8	2,8	5,5	0,6	1,0	1,7	2,5	5
18	p <sub>1</sub> , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	1,1	1,2	1
	t <sub>1</sub> , °C	200	220	240	260	280	300	320	340	460	480
19	p <sub>1</sub> , МПа	5	5	4	4	3,5	3,5	3	3	2	2
	t <sub>1</sub> , °C	300	350	400	350	300	350	400	350	300	400
20	p <sub>1</sub> , МПа	1,6	1,2	1,3	1,4	2,0	1,5	1,0	0,8	0,7	0,6
	t <sub>2</sub> , °C	140	131	121	115	110	118	120	125	122	110
21	t, °C	12	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	φ, %	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
22	t <sub>2</sub> , °C	60	62	64	66	68	70	72	74	76	80
23	q <sub>1</sub> , кДж/кг	30	31	32	33	34	35	34	33	32	30
	l <sub>1</sub> , кДж/кг	20	20	20	22	24	25	26	23	22	21
24	B	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5
	Δt, К	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
25	q <sub>1</sub> , кДж/кг	1000	950	900	850	800	750	700	650	650	600
	ε	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5
26	Λ	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
	P	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,5	1,5	1,5
27	Λ	6	6,2	6,4	6,6	6,8	7	7,2	7,4	7,6	7,8

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
28	$V_1, \text{ м}^3/\text{мин}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	$p_2, \text{ бар}$	7	6,5	6	5,5	5	4,8	4,6	4,4	4,2	4
29	$p_1, \text{ бар}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
30	$p_1, \text{ бар}$	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
	$p_2, \text{ бар}$	10	10	10	15	15	20	20	30	40	500

**Задание на контрольную работу № 2  
по разделу «Основы теплопередачи»**

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из табл. 1, а числовые данные к задачам – из табл. 4.

*Контрольные вопросы*

1. Объясните физическую сущность трех основных способов переноса теплоты.

2. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье. Дайте пояснения к понятиям «плотность теплового потока» и «температурный градиент».

3. Изобразите графически характер распределения температуры по толщине плоской трехслойной стенки для стационарного теплового режима при следующих соотношениях между коэффициентами теплопроводности материала каждого слоя:

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3;$$

$$\lambda_1 > \lambda_2 = \lambda_3,$$

Напишите соответствующие соотношения для перепадов температур  $\Delta t_i$  в отдельных слоях, приняв их толщины  $\delta_i$  одинаковыми.

1. Дайте определение коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи.

2. Стенка теплообменной поверхности парового котла омывается с одной стороны горячими газами, а с другой – кипящей водой. Почему температура

поверхности со стороны воды значительно меньше отличается от температуры воды, чем от температуры газов?

3. Что такое термическое сопротивление цилиндрической стенки, и как оно определяется для многослойной стенки?

4. Какую роль играет вязкостный подслой в конвективном теплообмене при турбулентном течении жидкости около стенки?

5. В чем сущность подобия физических процессов? Приведите основные критерии теплового подобия.

6. Для определения коэффициента теплопередачи при турбулентном течении жидкости в трубах используется следующая критериальная формула:

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Rr_{ж}^{0,43} (Rr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} C_l.$$

Используя указанную формулу, поясните, как изменится коэффициент теплоотдачи, если при заданном расходе теплоносителя трубу с внутренним диаметром  $d$  заменить двумя трубами вдвое меньшего диаметра. Прочие условия оставить неизменными.

1.1. Для определения коэффициента теплоотдачи при ламинарном течении жидкости в каналах используется следующая критериальная формула:

$$Nu_{ж} = 0,15 Re_{ж}^{0,33} Rr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} (Rr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} C_l.$$

Поясните, влияние какого фактора на теплообмен учитывают в этой формуле критерии  $Gr_{ж}$  и  $Pr_{ст}$ .

1.2. Среднее значение критерия Нуссельта при поперечном обтекании газами коридорного пучка труб определяется (при  $Re > 4 \cdot 10^3$ ) по следующей критериальной формуле:

$$Nu = 0,177 Re^{0,64} Cz.$$

Поясните, используя указанную формулу, каково влияние скорости и диаметра труб на средний коэффициент теплоотдачи. Что учитывает в формуле коэффициент  $Cz$ ?

1.3. Средний коэффициент конвективной теплоотдачи при свободном движении теплоносителя около горизонтальной трубы определяется на основании следующей критериальной зависимости:

$$Nu = 0,51 (Gr_{ж} Pr_{ж,с})^{0,25} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}.$$

Поясните критерии, входящие в указанную зависимость. Влияние какого фактора учитывается множителем  $(Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}$ ?

1.4. Каково влияние отдельных факторов на коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации пара на горизонтальных и вертикальных трубах?

2. Плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, при пузырьчатом кипении воды в большом объеме (для  $p < 3 \cdot 10^6$  Па) в условиях свободной конвекции можно определить по следующей формуле:

$$q = 0,145 \Delta t^{3,33} p^{0,5},$$

где  $\Delta t$  – температурный напор;  $\Delta t = t_n - t_{ст}$ ;

$p$  – давление, Па.

Напишите формулу, связывающую коэффициент теплоотдачи  $a$  с плотностью теплового потока  $q$  и давлением  $p$ .

1. В чем заключается опасность наступления пленочного режима кипения?

2. В чем особенности излучения и поглощения лучистой энергии газами?

3. Дайте определение рекуперативного, регенеративного и смешительного теплообменников.

4. В каком случае изменение температуры греющего теплоносителя в теплообменнике будет больше, чем нагреваемого, и в каком меньше?

5. Укажите преимущества и недостатки противоточной и прямоточной схем движения теплоносителей в теплообменниках.

6. На каких основных уравнениях базируется тепловой расчет теплообменных аппаратов? В чем сущность проектного и поверочного тепловых расчетов?

### Задачи

1. Стенка холодильника, состоящая из наружного слоя изоляционного кирпича толщиной  $\delta_1 = 250$  мм и внутреннего слоя совелита толщиной  $\delta_2 = 200$  мм, имеет температуру наружной поверхности  $t_1^{cm}$  и внутренней  $t_3^{cm}$ . Коэффициенты теплопроводности материала слоев соответственно равны:  $\lambda_1 = 0,24$  Вт/(м·К) и  $\lambda_2 = 0,09$  Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока через стенку и температурные градиенты в отдельных слоях. Представить графически распределение температуры по толщине стенки.

2. По стальному паропроводу с внутренним диаметром  $d_1$  и толщиной стенки  $\delta_1 = 8$  мм протекает перегретый пар с температурой  $t_1$ . Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной  $\delta_2$ , коэффициент теплопроводности которой  $\lambda_2 = 0,1$  Вт/(м·К). Температура окружающего воздуха  $t_2 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и окружающего воздуха соответственно равны:  $\alpha_1 = 250$  Вт/(м·К),  $\alpha_2 = 12$  Вт/(м·К). Определить потери тепла  $q_1$  на 1 пог. м па-

ропровода, а также температуру наружной поверхности изоляции. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_1$  принять равным 35 Вт/(м·К).

3. Коэффициент теплопередачи через наружное ограждение (стену) помещения  $k$ , коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к поверхности стены  $\alpha_1$ . Определить, на сколько градусов изменится температура внутренней поверхности стены, если температура наружного воздуха понизится на 25°C, а температура воздуха внутри помещения уменьшится на 5°C.

4. Теплопровод покрыт двумя слоями изоляции, имеющими одинаковую толщину  $\delta$ . Средний диаметр второго слоя  $d_{m2}$  в  $n$  раз больше среднего диаметра первого слоя  $d_{m1}$ , а коэффициент теплопроводности изоляции второго слоя в  $n$  раз меньше коэффициента теплопроводности первого слоя. На сколько процентов изменится потеря тепла (линейная плотность теплового потока  $q_1$ , Вт/пог.м), если при неизменных температурах наружной и внутренней поверхности слои изоляции поменять местами?

5. До какого предельного значения можно понизить температуру воздуха в помещении, чтобы температура внутренней поверхности стены осталась не ниже  $t_1^{cm}$  при температуре наружного воздуха  $t_2 = -35^\circ\text{C}$ , если толщина стены  $\delta_{ст}$ , коэффициент теплопроводности материала стены  $\lambda_{ст}$ , а коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной сторон соответственно  $\alpha_1 = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и  $\alpha_2 = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ?

6. По стальному неизолированному трубопроводу диаметром 80x5 мм течет холодильный агент, температура которого  $t_2 = -20^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в помещении, где проходит трубопровод,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха  $\alpha_1 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , со стороны холодильного агента  $\alpha_2 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . На сколько процентов снизится потеря холода, если трубопровод покрыть слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$  толщиной  $\delta_2$ .

7. Определить потери тепла через кладку камеры сгорания толщиной  $\delta_{ст} = 0,45 \text{ м}$ , площадью  $F = 8 \text{ м}^2$ . Кладка выполнена в виде плоской стенки из шамотного кирпича, коэффициент теплопроводности которого  $\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К), связан с температурой зависимостью  $\lambda_{ст} = 0,84 + 0,0006t$ .

Температура газов в камере сгорания, температура холодного воздуха  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и воздуха соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

8. Какова толщина слоя изоляции паропровода, если при температуре внутренней поверхности  $t_1^{cm}$  наружная поверхность диаметром  $d_2$  имеет температуру  $t_2^{cm} = 50^\circ\text{C}$ ? Коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Температура воздуха  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ .

9. Плоская стальная стенка толщиной  $\delta_{ст} = 10 \text{ мм}$  омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой  $t_1 = 950^\circ\text{C}$ , а с другой стороны – водой с температурой  $t_2 = 250^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопередачи со стороны газов и со стороны воды соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda_{ст} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Определить плотность теплового потока через стенку и температуру ее поверхностей со стороны газов и воды для случая чистой стенки, а также для случая, когда она покрыта слоем накипи с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_n 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  толщиной  $\delta_n$ . Для обоих случаев показать графически распределение температуры по толщине стенки.

10. Голый металлический провод диаметром  $d = 4 \text{ мм}$  имеет температуру поверхности  $t_{ст} = 95^\circ\text{C}$ . Активное электрическое сопротивление провода  $r = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\text{м}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к окружающему воздуху  $\alpha$ . Температура воздуха  $t_в$ . Какой будет температура поверхности этого провода  $t_{ст}$  под слоем изоляции толщиной  $\delta = 3 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  при неизменном токе и прочих равных условиях? Определить также максимальное значение тока в изолированном проводе, если первоначальную температуру провода считать предельно допустимой. Дайте объяснение полученным результатам.

11. Определить требуемые значения кинематического коэффициента вязкости  $\nu_m$  и скорости течения жидкости  $w_m$  в модели, в которой исследуется теплообмен при вынужденной конвекции. Коэффициент температуропроводности жидкости в модели  $\alpha_m = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . В образце, представляющем собой канал с эквивалентным диаметром  $d_0$ , протекает воздух со средней скоростью  $w_0$ . Определяющая температура воздуха  $t_0$ , давление  $p_0 = 0,3 \text{ МПа}$ . Геометрические размеры модели в шесть раз меньше размеров образца.

12. Определить значение коэффициента теплоотдачи при течении воздуха по цилиндрической трубе диаметром  $d = 40 \text{ мм}$ . Средняя температура воздуха  $t_в$ , давление  $p = 0,3 \text{ МПа}$ , расход  $G$ . Относительная длина трубы  $l/d > 50$ .

13. По трубе с внутренним диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  течет вода со средней скоростью  $w$ . Средняя температура воды  $t_ж$ , температура стенки трубы  $t_{ст}$  по-



стоянна. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемого в единицу времени тепла (линейную плотность теплового потока, Вт/м), если относительная длина трубы  $l/d = 100$ .

14. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании пучка коридорно расположенных труб диаметром  $d = 20$  мм, если средняя определяющая скорость воздуха в пучке  $w$ , средняя температура воздуха  $t_b$ . Какова средняя линейная плотность теплового потока в пучке  $q_l$ , если температура поверхности трубы  $t_{ст}$  постоянна и равна  $200^\circ\text{C}$ ? Поправкой на число рядов труб пренебречь.

15. По трубе диаметром  $d = 40$  мм движется воздух при давлении  $p = 0,1$  МПа. Расход воздуха  $G$ , температура воздуха на входе  $t'_в$ . Какой должна быть длина трубы, имеющей температуру стенки  $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$ , чтобы температура воздуха на выходе была  $t''_в$ ?

16. По цилиндрическому каналу диаметром  $d = 14$  мм движется вода. Расход воды  $G$ , ее температура на входе  $t'_в$ . На каком расстоянии от входа средняя по сечению температура воды достигнет  $t''_в$ , если температура внутренней поверхности канала  $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$  постоянна?

17. Найти среднее значение коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара давлением  $p$  около горизонтальной трубки (диаметром  $d = 0,03$  м и длиной  $l = 0,8$  м), имеющей температуру поверхности  $t_{ст}$ . Какое количество указанных трубок потребуется для конденсации 500 кг пара в час?

18. Горизонтальный трубопровод с наружным диаметром  $d = 0,25$  м, длиной  $l = 20$  м имеет температуру поверхности  $t_{ст}$ , степень черноты поверхности  $\varepsilon_1 = 0,72$ . Определить количество тепла, которое отдает трубопровод в окружающую среду излучением и конвекцией, кВт (в условиях свободного движения воздуха), если температура воздуха  $t_b = 23^\circ\text{C}$ . Как изменится суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением (отношение суммарного удельного теплового потока к разности температур поверхности и среды), если при прочих неизменных условиях путем специального покрытия уменьшить степень черноты поверхности до  $\varepsilon_2$ ?

19. Трубопровод диаметром  $d_1 = 150$  мм, имеющий температуру поверхности  $t_1$  и степень черноты  $\varepsilon = 0,75$ , окружен цилиндрическим экраном диаметром  $d_2$ , обе поверхности которого имеют степень черноты  $\varepsilon_3$ .

Определить потери тепла излучением на 1 пог. м трубопровода при температуре окружающей среды  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , приняв ее поглощательную способность равной единице. На сколько процентов будут больше указанные потери при тех же условиях для трубопровода без экрана?

20. Для измерения температуры движущегося с относительно небольшой скоростью горячего воздуха в канале установлена термопара, показание которой  $t_r$ . Какова действительная температура воздуха, если коэффициент теплоотдачи от потока воздуха к спаям  $a$ , степень черноты спая  $\varepsilon = 0,82$ , а температура стенок канала  $t_{ст}$ ?

21. Определить температуру поверхности трубы с наружным диаметром  $d$ , если линейная плотность результирующего потока излучением от нее составляет  $q_l$ , а интегральная степень черноты поверхности  $\varepsilon$ . Температура окружающего воздуха  $t_b = 17^\circ\text{C}$ .

22. Определить расход греющего пара и требуемую площадь теплообменной поверхности пароводяного подогревателя для подогрева  $G_w$  воды  $t_w' = 10^\circ\text{C}$  до  $t_w'' = 80^\circ\text{C}$ . Давление греющего пара  $p$ , степень сухости  $x$ . Поверхность нагрева теплообменника состоит из стальных труб:  $d_n = 30$  мм;  $d_{вн} = 24$  мм;  $\lambda = 50$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке  $\alpha_1 = 6000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), от стенки к воде  $\alpha_2 = 5500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температуру конденсата на выходе из теплообменника принять равной температуре насыщения, соответствующей давлению  $p$ . Тепловыми потерями пренебречь.

23. Определить температуру масла  $t_m''$  на выходе из масляного холодильника на основании следующих данных:

- площадь теплообменной поверхности холодильника  $F = 80$  м<sup>2</sup>;
- расход охлаждаемого масла  $G_m = 20$  кг/с;
- расход охлаждаемой воды  $G_w = 30$  кг/с;
- температура воды на входе в холодильник  $t_w'$ ;
- температура масла на входе в холодильник  $t_m' = 85^\circ\text{C}$ ;
- коэффициент теплопередачи  $k$ ;
- удельная теплоемкость масла  $C_m = 2,2$  кДж/(кг·К).

Схема движения теплоносителей противоточная.

24. Определить требуемую площадь теплообменной поверхности охладителя наддувочного дизеля на основании следующих данных:

- температура воздуха на входе в охладитель  $t_g = 115^\circ\text{C}$ ;

- температура воздуха на выходе из охладителя  $t_g'' = 65^\circ\text{C}$ ;
- расход воздуха  $G_B$ ;
- температура охлаждающей воды на входе в охладитель  $t_w'$ ;
- расход охлаждающей воды  $G_w = 1,25$  кг/с;
- коэффициент теплопередачи  $k = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Схемы движения теплоносителей:

- а) противоточная;
- б) прямоточная.

25. В рекуперативном прямоточном теплообменнике температура греющего и нагреваемого теплоносителей равна:

- а) на входе в теплообменник  $t_1'' = 200^\circ\text{C}$ ,  $t_1' = 20^\circ\text{C}$ ;
- б) на выходе из теплообменника  $t_1''$ ,  $t_2''$ .

Расход греющего теплоносителя  $G_1$ , теплоемкость  $c_1 = 4,2$  кДж/(кг·К). Площадь теплообменной поверхности теплообменника  $F = 25$  м<sup>2</sup>. Определить средний коэффициент теплопередачи  $k$  при заданной схеме движения теплоносителей. На сколько процентов увеличится количество передаваемого тепла, если при неизменных температурах теплоносителей на входе в теплообменник его площадь поверхности теплообмена будет в два раза больше, т.е. 50 м<sup>2</sup>? Значение коэффициента теплопередачи считать неизменным.

26. Определить плотность теплового потока через плоскую стенку нагревательной печи, состоящую из двух слоев кладки: шамотного кирпича толщиной  $\delta_1 = 0,56$  м и диамитового кирпича  $\delta_2 = 0,24$  м, если температура внутренней поверхности кладки равна  $t_1^{cm}$ , а температура наружного воздуха  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности внутреннего слоя кладки  $\lambda_1 = 0,95$  Вт/(м·К), наружного слоя  $\lambda_2 = 0,15$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной поверхности  $\alpha_k = 8,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а ее степень черноты  $\varepsilon$ .

27. Между двумя вертикальными плоскими пластинами размером 0,5х0,5 м помещен электрический нагреватель с равномерно распределенной плотностью тепловыделения. Степень черноты поверхностей  $\varepsilon$ . Какова должна быть мощность электрического нагревателя, чтобы при температуре окружающего воздуха  $t_B$  поддерживать температуру поверхностей пластин  $t_{ct}$ , если коэффициент теплоотдачи конвекцией к воздуху определяется соотношением:

$$\alpha_k = 2,65(t_{ct} - t_B)^{0,25}?$$

(Теплоотдачу с торцов пластин не учитывать.)

28. Средняя температура поверхности токоведущей шины равна  $t_{ст}$ , а ее интегральная степень черноты  $\varepsilon$ .

Температура окружающего воздуха  $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи конвекцией связан с температурой поверхности  $t_{ст}$  соотношением:

$$\alpha_k = 2,65(t_{ст} - t_{в})^{0,25}.$$

В результате покрытия шин тонким слоем лака интегральная степень черноты поверхности равна  $\varepsilon' = 0,9$ . Какова теперь будет средняя температура поверхности шин  $t_{см}$  при том же значении тока и прочих неизменных условиях?

29. В рекуперативном теплообменнике вода нагревается насыщенным водяным паром (при  $p = \text{const}$ ) от начальной температуры  $t'_{ж}$  до конечной  $t''_{ж}$ . Определить соотношение масс пара и воды.

Коэффициент теплопередачи и прочие условия считать неизменными.

30. В пароводяном теплообменнике вода нагревается насыщенным паром (при  $p = 0,6 \text{ МПа}$ ) от температуры  $t'_w = 20^{\circ}\text{C}$  до  $t''_{w1} = 50^{\circ}\text{C}$ . В результате интенсификации теплообмена конечная температура подогрева воды повысилась до  $t''_{w2}$  при неизменном расходе  $G = 1 \text{ кг/с}$ . Определить, во сколько раз увеличился коэффициент теплопередачи.

Таблица 4

*Числовые данные к задачам контрольной работы № 2*

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного пособия									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$t_1^{см}, ^{\circ}\text{C}$	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
	$t_3^{см}, ^{\circ}\text{C}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	0
2	$d_1, \text{мм}$	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160
	$\delta_2, \text{мм}$	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	450	440	430	420	410	400	350	300	250	200
3	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	0,80	0,90	0,94	1,00	1,20	1,24	1,30	1,34	1,40	1,60
	$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	6,9	7,2	7,6	8,0	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2	12,8
4	N	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3

Продолжение таблицы 4

№ за- дачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного пособия									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
5	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$\delta_{ст}, \text{м}$	0,37	0,41	0,40	0,50	0,39	0,42	0,48	0,61	0,70	0,92
	$\lambda_{ст}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	1,10	1,04	0,87	0,92	0,58	0,50	0,44	0,40	0,30	0,19
6	$\lambda_2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
	$\delta_2, \text{мм}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
7	$t_1, ^\circ\text{C}$	1400	1350	1300	1250	1200	1150	1110	1050	1000	950
	$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100
	$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
8	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	150	200	250	275	300	325	350	400	450	500
	$d_2, \text{мм}$	250	275	330	325	350	400	450	500	550	600
9	$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35
	$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	2800	2750	2700	2650	2600	2550	2500	2450	2400	2350
	$\delta_{н}, \text{мм}$	2	3	4	5	6	7	8	6	5	4
10	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15
11	$w_0, \text{м}/\text{с}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	190
	$t_0, ^\circ\text{C}$	80	90	100	120	140	160	180	200	225	250
	$d_0, \text{мм}$	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
12	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
	$G, \text{кг}/\text{ч}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
13	$W, \text{м}/\text{с}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
	$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25
	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	100	95	90	85	80	75	70	62	60	55
14	$W, \text{м}/\text{с}$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11
	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного пособия									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
15	$G \cdot 10^3$ , кг/ч	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
	$t'_e$ , °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	$t''_e$ , °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
16	G, кг/ч	420	460	500	550	600	650	700	750	800	850
	$t$ , °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	$t''$ , °C	85	85	90	85	80	75	80	85	90	95
17	p, МПа	0,005	0,010	0,025	0,050	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	$t_{ст}$ , °C	10	15	20	22	25	30	35	40	45	50
18	$d_1$	300	290	280	270	260	250	240	230	220	210
	$\varepsilon_2$	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,16	0,12	0,10
19	$t_1$ , °C	400	420	450	480	500	520	540	560	580	600
	$d_2$ , мм	300	280	260	240	220	200	190	180	170	160
	$\varepsilon_3$	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,15	0,12	0,10
20	$t_T$ , °C	250	270	300	320	350	370	400	420	450	470
	$t_{ст}$ , °C	110	140	150	180	190	200	220	250	270	300
	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	25	28	35	37	40	45	48	50	52	55
21	$d$ , мм	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,38	0,32	0,28	0,22	0,18
	$q_1$ , кВт/пог.м	3,90	5,70	7,82	10,3	13,0	14,3	12,4	11,8	10,1	8,78
	$\varepsilon$	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
22	$G_w$ , т/ч	8	9	10	12	14	15	16	17	18	19
	p, МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60
	x	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
23	$t'_w$ , °C	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	k, кВт/(м <sup>2</sup> ·К)	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
24	$G_B$ , кг/с	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$t'_w$ , °C	38	36	34	32	30	28	26	24	22	22

## Окончание таблицы 4

№ задачи	Величина	Предпоследняя цифра учебного пособия									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
25	$t_1^*$ , °C	40	42	44	46	48	50	52	56	58	60
	$t_2^*$ , °C	26	30	32	36	38	40	42	44	46	50
	$G_1$ , кг/с	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
26	$t_1^{cm}$ , °C	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	$\varepsilon$	0,60	0,62	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8
27	$\varepsilon$	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
	$t_b$ , °C	30	27	25	22	20	17	15	10	5	0
	$t_{ct}$ , °C	350	320	300	280	250	220	200	180	150	120
28	$t_{ct}$ , °C	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	$\varepsilon$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
29	$n$	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
30	$t_{w2}^*$ , °C	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110

## Методические указания к выполнению контрольной работы № 2

Для определения плотности теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, через плоскую стенку и линейной плотности теплового потока  $q_1$ , Вт/м, через цилиндрическую стенку при известных температурах граничных поверхностей  $t_1^{cm}$  и  $t_{n+1}^{cm}$  используют формулы, полученные на основании закона Фурье:

$$q = \frac{t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm}}{\sum_1^n \delta_i / \lambda_i}; \quad (1)$$

$$q_1 = \frac{2\pi(t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm})}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln(d_{i+1} / d_i)}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$n$  – число отдельных слоев в стенке;

$\delta_i$  – толщина каждого слоя стенки, м;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности каждого слоя, Вт/(м·К).

Для сравнения линейной плотности тепловых потоков при перемене мест тепловой изоляции трубы в задаче 4 воспользоваться приближенной формулой

$$q_1 = \frac{\pi(t_1^{cm} - t_3^{cm})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 d_{m1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 d_{m2}}}, \quad (3)$$

где  $d_{m1}$  и  $d_{m2}$  – средние диаметры первого и второго цилиндрических слоев, м.

Относительное изменение линейной плотности теплового потока при перемене слоев изоляции местами

$$\Delta\% = \frac{q_1'' - q_1'}{q_1'} \cdot 100.$$

В задачах 3, 5, 7 и 9 для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку можно использовать следующие формулы:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_1^{cm}); \quad (4)$$

$$q = \alpha_2 (t_2^{cm} - t_2); \quad (5)$$

$$q = k (t_1 - t_2), \quad (6)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_1$  и  $t_2$  – температуры жидкостей, омывающих стенку;

$t_1^{cm}$  и  $t_2^{cm}$  – температуры поверхностей стенки со стороны горячей и холодной жидкостей;

$k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_1^n \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_2}. \quad (7)$$

Для учета зависимости коэффициента теплопроводности материала стенки от ее температуры (задача 7) последней следует предварительно задаться. Например,  $l_{cm}^{cp} \approx 0,5(t_1 + t_2)$ .

После определения коэффициента теплопередачи (7) и плотности теплового потока по уравнению (6) найти температуры поверхностей стенок из уравнений (4) и (5) и проверить значение средней температуры стенки. В случае существенного расхождения расчет следует повторить.

Расчетная формула для определения линейной плотности теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку (задачи 2 и 6) базируется на



основе совместного решения уравнений теплоотдачи (8) и (9) и теплопроводности (2):

$$q_1 = \alpha_1 (t_1 - t_1^{cm}) \pi d_1; \quad (8)$$

$$q_1 = \alpha_2 (t_{n+1}^{cm} - t_2) \pi d_2. \quad (9)$$

Исключая неизвестные величины  $(t_1^{cm})$ , получим

$$q_1 = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{1/\alpha_1 d_1 + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + 1/\alpha_2 d_2}, \quad (10)$$

где  $n$  – число слоев в цилиндрической стенке.

Для нахождения толщины слоя изоляции трубы в задаче 8 следует сначала определить линейную плотность теплового потока (по заданным величинам  $\alpha_2$ ,  $t_2^{cm}$ ,  $t_2$  и  $d_2$ ) и требуемое термическое сопротивление изоляции (см. формулу 2):

$$R_t = (1/2\pi\lambda) \ln d_2/d_1. \quad (11)$$

Линейная плотность теплового потока  $q_1$  и ток  $I$  в электрическом проводе (задача 10) могут быть найдены из уравнения теплового баланса

$$q_1 = \alpha(t_{ct} - t_b) \pi d_1 = I^2 r, \quad (12)$$

где  $r$  – активное электрическое сопротивление провода, Ом/м.

Для определения искомой температуры поверхности  $t_{cm}'$  изолированного провода при том же значении тока, т.е. при  $q_1 = idem$ , следует воспользоваться формулой (2) при  $n = 1$ , предварительно найдя температуру наружной поверхности изоляции  $t_{из}$  уравнения:

$$q_1 = \alpha(t_{из} - t_b) \pi d_2. \quad (13)$$

Максимальный ток определяется по предельно допустимой температуре  $t$  из уравнения:

$$q_1^{\max} = \frac{\pi(t_{cm}^{\max} - t_e)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d + 2\delta}{d} + 1/\alpha_2 d_2}. \quad (14)$$

Требуемые значения кинематического коэффициента вязкости  $\nu_m$  и скорости  $w_m$  течения жидкости в модели (задача 11) определяются из условия подобия процессов в модели и образце, а именно из условия равенства критериев  $Re$  и  $Rr$ , т.е.

$$\frac{w_m d_m}{\nu_m} = \frac{w_0 d_0}{\nu_0}; \quad \frac{\nu_m}{\alpha_m} = \frac{\nu_0}{\alpha_0}.$$

Для нахождения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в задачах 12, 13, 14, 15, 16 и 18 рекомендуется воспользоваться формулами, приведенными в контрольных вопросах 9-12. В формулах индекс «ж» указывает, что величины отнесены к определенной температуре  $t_{ж}$ , т.е. средней температуре жидкости (среды).

Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), при пленочной конденсации пара на поверхности горизонтальной трубы может быть определен по зависимости 8-3 [5] или по формуле

$$\alpha = 0,72(A/d\Delta t)^{0,25}, \quad (15)$$

где  $A = 5400\lambda^3 pr/v$ ;

$\Delta t = t_n - t_{ст}$ ;

$r$  – теплота парообразования (конденсации), кДж/кг.

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , плотности  $\rho$  и коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  конденсата здесь отнесены к средней температуре пленки  $t_{ср} = 0,5(t_n + t_{ст})$ .

Температура насыщения  $t_n$  определяется по заданному давлению пара из таблиц насыщенного водяного пара. Из этих же таблиц находят значение теплоты парообразования.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в условиях свободного движения воздуха около горизонтальной трубы (задача 18) следует использовать критериальную формулу, приведенную в вопросе 12. Тепловой поток излучением может быть найден по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{л} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{г}}{100} \right)^4 \right] \pi dl, \quad (16)$$

где  $C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{л} = \frac{Q_{л}}{\pi dl (t_{cm} - t_{г})}. \quad (17)$$

Потери тепла излучением от цилиндрической поверхности  $F_1 = \pi d_1 l$ , окруженной цилиндрическим экраном  $F_2 = \pi d_2 l$  (задача 19), можно найти, определив предварительно температуру экрана  $T_{э}$  из уравнения теплового баланса:

$Q_{1-э} = Q_{э-2}$ , т.е.

$$C_{1-э} \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{э}}{100} \right)^4 \right] F_1 = C_{э-2} \left[ \left( \frac{T_{э}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{г}}{100} \right)^4 \right] F_2, \quad (18)$$

где  $C_{э-1} = \frac{C_0}{1/\varepsilon_0 + (F_1/F_2)(1/\varepsilon_э - 1)}$ ;

$$C_{э-2} = \varepsilon_2 C_0.$$

Для нахождения действительной температуры потока по показанию термометра (задача 20) следует использовать уравнение теплового баланса в виде

$$\alpha(t_э - t_m) = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (19)$$

Температура излучающей поверхности (задача 21) может быть найдена из уравнения (16).

Задачи 22, 23, 24 и 25, связанные с тепловым расчетом рекуперативных теплообменников, решают на основе использования уравнения теплового баланса

$$Q = G_1 C_1 (t_1' - t_1'') = G_2 C_2 (t_2' - t_2'') \quad (20)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = kF \Delta t_{cp}, \quad (21)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – расходы греющего нагреваемого теплоносителей, кг/с;

$C_1$  и  $C_2$  – средние массовые теплоемкости теплоносителей в интервалах температур соответственно  $t_1' - t_1''$  и  $t_2' - t_2''$ , кДж/(кг·К);

$t_1'$  и  $t_2'$  – температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в теплообменник;

$t_1''$  и  $t_2''$  – температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника;

$k$  – коэффициент теплопередачи, (кВт Δ/м<sup>2</sup>·К);

$F$  – площадь теплообменной поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор.

При прямотоке и противотоке

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

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_m$  – соответственно наибольшая и наименьшая разности температур теплоносителей в теплообменнике.

Если  $\Delta t_{\delta} / \Delta t_m < 1,7$ , то с достаточной для практических расчетов точностью

$$\Delta t_{cp} = 0,5(\Delta t_{\delta} + \Delta t_m).$$

При сложном теплообмене (конвекцией и излучением) в задачах 27 и 28 результирующая плотность теплового потока определяется как сумма конвективной и лучистой составляющих:

$$q = \alpha_k(t_{ст} - t_{в}) + \varepsilon C_0[(0,01t_{ст} + 2,73)^4 - (0,01t_{в} - 2,73)^4],$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – коэффициент излучения абсолютно черной поверхности.

## Расчет термодинамического цикла

### Условие задания

По заданным исходным параметрам рабочего тела в схеме цикла в P-v координатах требуется:

1. Определить параметры состояния (P; v; T; U; i; S) в крайних точках цикла. Энтальпию и внутреннюю энергию определить относительно состояния при  $t = 0^\circ\text{C}$ ; энтропию определить относительно состояния при нормальных условиях  $T = 273 \text{ К}$ ,  $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$

2. Построить цикл в P-v и T-S координатах.

3. Для каждого процесса определить работу, количество подведенной или отведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии.

4. Определить работу цикла, количество подведенного и отведенного тепла, термический КПД цикла, сравнив последний с КПД цикла Карно, имеющего одинаковые с последним циклом максимальную и минимальную температуры.

Рабочее тело - 1 кг воздуха

$$\left( R = 0,287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; C_p = 1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; C_v = 0,719 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right).$$

Для воздуха применимо уравнение состояния идеального газа.

Исходные данные выбрать по номеру задания из таблицы 5.

Таблица 5

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
01	$P_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,09 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
02	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,8 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
03	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
04	$t_1 = 200^\circ \text{ C}; P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^\circ \text{ C}$ $v_3 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
05	$t_1 = 250^\circ \text{ C}; P_1 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 400^\circ \text{ C}$ $v_3 = 0,7 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
06	$t_1 = 300^\circ \text{ C}; P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 400^\circ \text{ C};$ $v_3 = 0,35 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_5 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
07	$t_1 = 25^\circ \text{ C}; P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 550^\circ \text{ C};$	
08	$t_1 = 25^\circ \text{ C}; P_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 500^\circ \text{ C};$	
09	$t_1 = 30^\circ \text{ C}; P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_3 = 600^\circ \text{ C};$	
10	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^\circ \text{ C};$	
11	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 400^\circ \text{ C};$	
12	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,9 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 1200^\circ \text{ C};$	

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
13	$P_1 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,08 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 14 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 160^\circ \text{ C};$	
14	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,6 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 1000^\circ \text{ C};$	
15	$P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 350^\circ \text{ C};$	
16	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 90^\circ \text{ C};$ $P_2 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^\circ \text{ C};$	
17	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 100^\circ \text{ C};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 850^\circ \text{ C};$	
18	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 150^\circ \text{ C};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 850^\circ \text{ C};$	
19	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 300^\circ \text{ C}; q_1 = 1050 \text{ кДж} / \text{кг};$	
20	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 400^\circ \text{ C}; q_1 = 500 \text{ кДж} / \text{кг};$	
21	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $t_2 = 300^\circ \text{ C}; q_1 = 800 \text{ кДж} / \text{кг};$	
22	$P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 227^\circ \text{ C};$	
23	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 400^\circ \text{ C};$	
24	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^\circ \text{ C};$ $v_2 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^\circ \text{ C};$	

## Продолжение таблицы 5

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
25	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 85^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 15; q_1 = 920 \text{ кДж / кг};$	
26	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 12; q_1 = 500 \text{ кДж / кг};$	
27	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 40^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 8; q_1 = 300 \text{ кДж / кг};$	
28	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 80^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 14; q_{2-3} = 840 \text{ кДж / кг};$	
29	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 16; q_{2-3} = 900 \text{ кДж / кг};$	
30	$v_1 = 1,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 12; q_{2-3} = 700 \text{ кДж / кг};$	
31	$P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 225^0 \text{ C};$	
32	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
33	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
34	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 80^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 5; q_{2-3} = 840 \text{ кДж / кг};$	
35	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 120^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 6; q_{2-3} = 750 \text{ кДж / кг};$	
36	$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 9; q_{2-3} = 650 \text{ кДж / кг};$	
37	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 400^0 \text{ C};$ $P_2 = 14 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
38	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 450^0 \text{ C};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
39	$P_1 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 550^0 \text{ C};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
40	$P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = -35^\circ \text{ C};$	
41	$P_1 = 60 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = 20^\circ \text{ C};$	
42	$P_1 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_4 = 10^\circ \text{ C};$	
43	$P_1 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,25 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^\circ \text{ C};$	
44	$P_1 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 270^\circ \text{ C};$	
45	$P_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,3 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 450^\circ \text{ C};$	
46	$P_1 = 13 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^\circ \text{ C};$ $t_3 = 17^\circ \text{ C}; P_3 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
47	$P_1 = 17 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 350^\circ \text{ C};$ $t_3 = 30^\circ \text{ C}; P_3 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
48	$P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^\circ \text{ C};$ $t_3 = 20^\circ \text{ C}; P_3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
49	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,45 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
50	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,45 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,14 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
51	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,6 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_3 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_2 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
52	$P_1 = 35 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 210^\circ \text{ C};$ $t_2 = 250^\circ \text{ C}; P_3 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
53	$P_1 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 210^\circ \text{ C};$ $t_2 = 250^\circ \text{ C}; P_3 = 13 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
54	$P_1 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 250^\circ \text{ C};$ $t_2 = 350^\circ \text{ C}; P_3 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$	



## Продолжение таблицы 5

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
55	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = -50^0 \text{ C}; P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $n = 1,2; \rho = (v_3/v_2) = 2;$	
56	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 10^0 \text{ C}; P_2 = 7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $n = 1,2; \rho = (v_3/v_2) = 2;$	
57	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^0 \text{ C}; P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $n = 1,25; \rho = (v_3/v_2) = 1,8;$	
58	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 130^0 \text{ C}; P_3 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
59	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,7 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 150^0 \text{ C}; P_3 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
60	$P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,75 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $t_2 = 150^0 \text{ C}; P_3 = 45 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
61	$P_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
62	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 350^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 7 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
63	$P_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^0 \text{ C};$ $v_2 = 0,6 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_3 = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
64	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^0 \text{ C};$	
65	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $P_2 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
66	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^0 \text{ C};$	
67	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 300^0 \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1/v_2) = 16; \rho = (v_3/v_2) = 4;$	
68	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 320^0 \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1/v_2) = 14; \rho = (v_3/v_2) = 3;$	
69	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_1 = 300^0 \text{ K};$ $\varepsilon = (v_1/v_2) = 15; \rho = (v_3/v_2) = 2;$	

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
70	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 27^0 \text{ C};$ $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 620 \text{ кДж / кг};$	
71	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 600 \text{ кДж / кг};$	
72	$P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; q_{2-3} = 700 \text{ кДж / кг};$	
73	$P_1 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^0 \text{ C};$ $P_2 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^0 \text{ C};$	
74	$P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 100^0 \text{ C};$ $P_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 200^0 \text{ C};$	
75	$P_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 150^0 \text{ C};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 250^0 \text{ C};$	
76	$P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 18 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
77	$P_1 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 12,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
78	$P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 300^0 \text{ C};$ $P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_3 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$	
79	$P_1 = 24 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 28 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 150^0 \text{ C};$	
80	$P_1 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,08 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 19 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 300^0 \text{ C};$	
81	$P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$ $P_2 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_3 = 700^0 \text{ C};$	
82	$t_1 = 210^0 \text{ C}; P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^0 \text{ C};$ $v_3 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_4 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
83	$t_1 = 200^0 \text{ C}; P_1 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^0 \text{ C};$ $v_3 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_4 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
84	$t_1 = 200^0 \text{ C}; P_1 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_2 = 300^0 \text{ C};$ $v_3 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_4 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$	

## Окончание таблицы 5

№№ задания	Исходные данные	Схема цикла
85	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_1 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $P_2 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
86	$v_1 = 0,15 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_1 = 7 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $P_2 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
87	$v_1 = 0,8 \text{ м}^3 / \text{кг}; P_1 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $P_2 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}; P_3 = 25 \cdot 10^5 \text{ Па};$	
88	$t_1 = 27^0 \text{ C}; P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $(v_1 / v_4) = 3; q_1 = 220 \text{ кДж} / \text{кг};$	
89	$t_1 = 50^0 \text{ C}; P_1 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $(v_1 / v_4) = 4; q_1 = 300 \text{ кДж} / \text{кг};$	
90	$t_1 = 50^0 \text{ C}; P_1 = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па};$ $(v_1 / v_4) = 5; q_1 = 300 \text{ кДж} / \text{кг};$	
91	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 6; \lambda = (P_3 / P_2) = 2;$	
92	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 40^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 8; \lambda = (P_3 / P_2) = 1,5;$	
93	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 20^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 10; \lambda = (P_3 / P_2) = 1,8;$	
94	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 5; q_{2-3} = 500 \text{ кДж} / \text{кг};$	
95	$P_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 40^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 7; q_{2-3} = 300 \text{ кДж} / \text{кг};$	
96	$P_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 50^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 10; q_{2-3} = 600 \text{ кДж} / \text{кг};$	
97	$P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 15^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 16; q_{2-3} = 600 \text{ кДж} / \text{кг};$	
98	$P_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 15^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 14; q_{2-3} = 800 \text{ кДж} / \text{кг};$	
99	$P_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 25^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 18; q_{2-3} = 750 \text{ кДж} / \text{кг};$	
100	$P_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 30^0 \text{ C};$ $\varepsilon = (v_1 / v_2) = 18; q_{2-3} = 500 \text{ кДж} / \text{кг};$	

Примечание. Построение цикла в  $P-v$  и  $T-S$  координатах выполнить в масштабе на миллиметровой бумаге формата 203x288 мм. Кривые строить по промежуточным точкам. Расчет промежуточных точек привести в пояснительной записке.

Результаты расчета свести в таблицу вида:

а) параметры в точках:

Точки	Параметры						
	$P,$ $10^5 \text{ Па}$	$v,$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$T,$ $^\circ\text{К}$	$t,$ $^\circ\text{С}$	$u,$ $\text{кДж/кг}$	$I,$ $\text{кДж/кг}$	$S,$ $\text{кДж/кг}\cdot\text{град}$
1							
2							
3							
4							

б) изменение параметров в процессах

Процессы	Параметры				
	$\lambda$ $\text{кДж/кг}$	$\Delta u$ $\text{кДж/кг}$	$\Delta i$ $\text{кДж/кг}$	$q$ $\text{кДж/кг}$	$\Delta S$ $\text{кДж/кг}\cdot\text{град}$
1-2					
2-3					
3-4					
4-1					
Сумма					

При подготовке к сдаче задания обратить внимание на вопросы:

1. Первый закон термодинамики. Работа расширения. Внутренняя энергия. Энтальпия.
2. Термодинамические процессы.
3. Второй закон термодинамики. Энтропия. Прямой и обратный термодинамические циклы. Цикл Карно.
4. Циклы ДВС, ГТУ и реактивных двигателей.

### Пример расчета

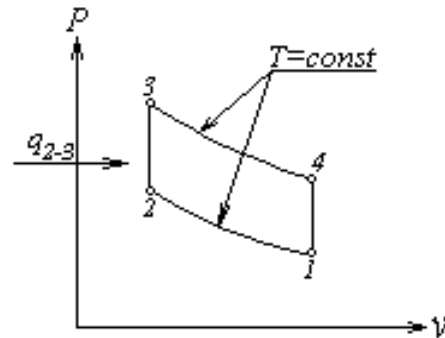
Дано:

$$v = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$t_1 = 80^\circ \text{C};$$

$$\varepsilon = \left( \frac{v_1}{v_2} \right) = 5;$$

$$q_{2-3} = 838 \text{ кДж} / \text{кг}.$$



Решение:

1. Определение параметров состояния в крайних точках цикла.

Точка 1.

$$v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad t = 80^\circ \text{C} = 353 \text{ K}; \quad p = \frac{R \cdot T_1}{v_1} = \frac{287 \cdot 353}{1,2} = 8,45 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$i_1 = C_p \cdot T_1 = 1,006 \cdot 353 = 354,7 \text{ кДж} / \text{кг}; \quad u_1 = C_v \cdot T_1 = 0,719 \cdot 353 = 251 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_1}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \lg \frac{353}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{1,01} = 0,81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 2.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{v_1}{5} = \frac{1,2}{5} = 0,24 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad P_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot P_1 = \frac{1,2}{0,24} \cdot 8,45 \cdot 10^4 = 4,22 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_2 = T_1 = 353 \text{ K}; \quad i_2 = C_p \cdot T_2 = 1,006 \cdot 353 = 354,7 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$u_2 = C_v \cdot T_2 = 0,719 \cdot 353 = 251 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$S_2 = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_2}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{353}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{422}{1,01} = -0,151 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 3.

$$v_3 = v_2 = 0,24 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad q_{2-3} = C_v \cdot (T_3 - T_2); \quad T_3 = T_2 + \frac{q_{2-3}}{C_v} = \frac{838}{0,719} + 353 = 1528 \text{ K};$$

$$P_3 = \frac{R \cdot T_3}{v_3} = \frac{287 \cdot 1528}{0,24} = 18 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad i_3 = C_p \cdot T_3 = 1,006 \cdot 1528 = 1535 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$S_3 = C_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_3}{P_0} = 1,006 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1528}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18}{1,01} = 0,904 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Точка 4.

$$T_4 = T_3 = 1528 \text{ K}; \quad v_4 = v_1 = 1,2 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad P_4 = \frac{R \cdot T_4}{v_4} = \frac{287 \cdot 1528}{1,2} = 36,5 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$i_4 = C_p \cdot T_4 = 1,006 \cdot 1528 = 1535 \text{ кДж} / \text{кг}; \quad u_4 = C_v \cdot T_4 = 0,719 \cdot 1528 = 1088 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$S_4 = C_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_4}{P_0} = 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1528}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{3,65}{1,01} = 1,361 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

2. Построение цикла в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах.

Процессы, изображаемые в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах кривыми линиями, необходимо проводить как минимум по трем точкам.

Для нахождения параметров промежуточных точек в начале произвольно задаются одним параметром, но так, чтобы значение этого параметра находилось между его значениями в крайних точках процесса. Вторым параметром определяется из уравнения, характеризующего данный процесс, составленного для одной из крайних точек процесса и для промежуточной точки.

Процесс 1-2: точка “а”. Принимаем  $P_a = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

По уравнениям изотермы для точек “а” и 1:

$$P_a \cdot v_a = P_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1;$$

$$v_a = \frac{R \cdot T_1}{P_a} = \frac{287 \cdot 353}{25 \cdot 10^4} = 0,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Процесс 3-4: точка “б”. Принимаем  $P_b = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$ :

$$v_b = \frac{R \cdot T_3}{P_b} = \frac{287 \cdot 1528}{10 \cdot 10^5} = 0,438 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Процесс 2-3: точка “в”. Принимаем  $T_g = 1000^0 \text{ К}$ :

$$\frac{P_g}{P_2} = \frac{T_g}{T_2}; \quad P_g = \frac{P_2 \cdot T_g}{T_2} = \frac{4,22 \cdot 1000}{358} \cdot 10^5 = 11,95 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$S_g = C_p \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{T_g}{T_2} - R \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{P_g}{P_2} =$$

$$= 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1000}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{11,95}{1,01} = 0,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 4-1: точка "Г". Принимаем  $T_2 = 1000^0 K$ :

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{0,845 \cdot 1000}{353} \cdot 10^5 = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$S_2 = C_p \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{T_2}{T_0} - R \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{P_2}{P_0} =$$

$$= 1,005 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1000}{273} - 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{2,4}{1,01} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Графики цикла представлены на рис. 1 и 2.

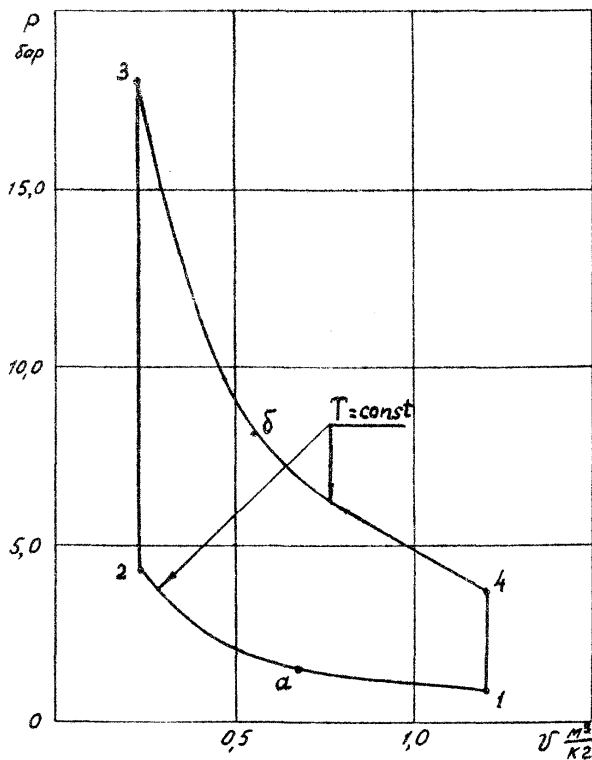


Рис. 1. Цикл в  $p-v$  координатах.

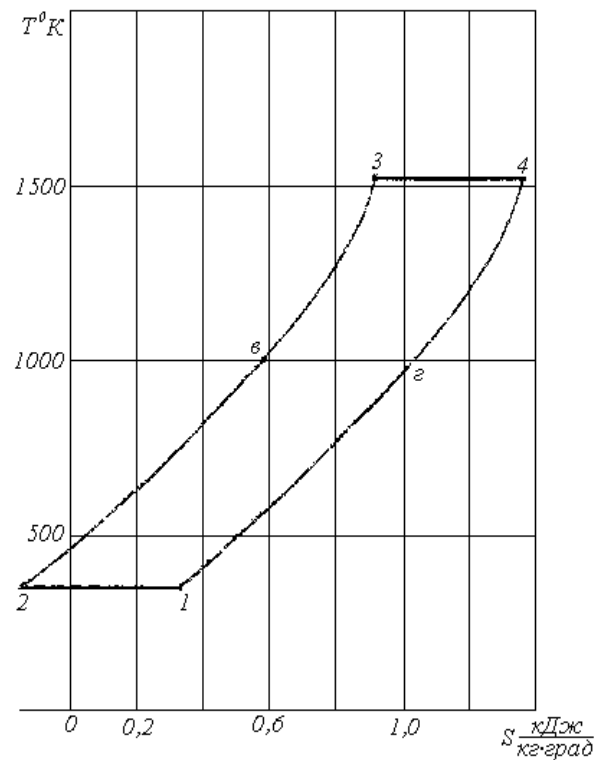


Рис. 2. Цикл в  $T-S$  координатах.

3. Определение работы, количества подведенной или отведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии для каждого процесса цикла.

Процесс 1-2 (изотермический).

$$q_{1-2} = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,287 \cdot 353 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{4,22} = -163 \text{ кДж/кг (теплота отводится)};$$

$$\ell_{1-2} = q_{1-2} = -163 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{1-2} = C_p \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta S_{1-2} = R \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{0,845}{4,22} = -0,461 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 2-3 (изохорический).

$$\lambda_{2-3} = 0; \quad q_{2-3} = C_v (T_3 - T_2) = 0,712 \cdot (1528 - 353) = 836 \text{ кДж/кг} \quad (\text{тепло подводится});$$

$$\Delta u_{2-3} = q_{2-3} = 836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{2-3} = C_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \cdot (1528 - 353) = 1181 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{2-3} = C_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,712 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{1528}{353} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 3-4 (изотермический).

$$q_{3-4} = R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{P_3}{P_4} = 0,287 \cdot 1528 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18,0}{3,65} = 696 \text{ кДж/кг} \quad (\text{тепло подводится});$$

$$\lambda_{3-4} = q_{3-4} = 696 \text{ кДж/кг}; \quad \Delta i_{3-4} = C_p (T_4 - T_3) = 0; \quad \Delta u_{3-4} = C_v (T_4 - T_3) = 0;$$

$$\Delta S_{3-4} = R \cdot \ln \frac{P_3}{P_4} = 0,287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{18,0}{3,65} = 0,456 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Процесс 4-1 (изохорический).

$$\lambda_{4-1} = 0; \quad q_{4-1} = C_v (T_1 - T_4) = 0,712 \cdot (353 - 1528) = -836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{4-1} = q_{4-1} = -836 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{4-1} = C_p \cdot (T_1 - T_4) = 1,005 \cdot (353 - 1528) = -1181 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta S_{4-1} = C_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,712 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{353}{1528} = -1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Данные вычислений сводятся в таблицы.

Точки	Параметры						
	P	v	T	t	u	i	S
	$10^5 \text{ Па}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	<b>К</b>	$^{\circ}\text{C}$	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг·град
1	0,845	1,2	353	80	251	354,7	0,31
2	4,22	0,24	353	80	354,7	354,7	-0,151
3	18,0	0,24	1528	1255	1088	1535	0,904
4	3,65	1,2	1528	1255	1088	1535	1,361



Процессы	Параметры				
	$\lambda$	$\Delta u$	$\Delta i$	$q$	$\Delta S$
	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг·град
1-2	-163,0	0	0	-163,0	-0,461
2-3	0	836,0	1181,0	836,0	1,05
3-4	696,0	0	0	696,0	0,456
4-1	0	-836,0	-1181,0	-836,0	-1,05
Сумма	533,0	0	0	533,0	-0,005

4. Работа цикла.

$$\lambda_{\text{ц}} = \lambda_{1-2} + \lambda_{2-3} + \lambda_{3-4} + \lambda_{4-1} = -163 + 0 + 696 + 0 = 533 \text{ кДж/кг.}$$

5. Количество подведенной теплоты в цикле:

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 836 + 696 = 1532 \text{ кДж/кг.}$$

Количество отведенной теплоты в цикле:

$$q_2 = q_{1-2} + q_{4-1} = 163 + 836 = 999 \text{ кДж/кг.}$$

Количество полезно использованной теплоты:

$$q_{\text{пол}} = q_1 - q_2 = 1532 - 999 = 533 \text{ кДж/кг.}$$

6. Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{q_{\text{пол.}}}{q_{\text{подвед.}}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{1532 - 999}{1532} = 0,347.$$

КПД цикла Карно, имеющего одинаковые с расчетным циклом максимальную и минимальную температуры:

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{353}{1528} = 0,769; \quad \eta_t^K > \eta_t.$$

### Расчет цикла паросиловой установки, расчет сопел

#### Условия задания

1. Дано. Паросиловая установка мощностью  $N$  работает по циклу Ренкина. Начальные параметры пара  $P_1$  и  $t_1$ , конечное давление отработанного пара (давление в конденсаторе)  $P_2$ . Внутренний относительный КПД  $\eta_{oi}$ .

Требуется определить:

- а) параметры пара в характерных точках цикла и изобразить цикл в координатах  $p - v$ ,  $T - S$  и  $i - S$ ;
- б) термический и внутренний абсолютный КПД;
- в) удельный и часовой расход пара;
- г) удельный и часовой расход теплоты;
- д) количество охлаждающей воды, необходимое для конденсации пара в течение часа, если вода при этом нагревается на  $10^\circ\text{C}$ .

Мощность паросиловой установки и начальные параметры пара принять по первой цифре номера задания из следующей таблицы.

Первая цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$N$ , кВт	750	1500	2500	5000	750	1500	2500	5000	750	1500
$P_1 \cdot 10^5$ Па	36	36	36	40	40	40	30	30	30	30
$t_1$ , $^\circ\text{C}$	350	400	450	350	400	450	450	500	350	400

Давление отработанного пара и внутренний относительный КПД принять по последней цифре номера задания из следующей таблицы.

а) Воздушное сопло

Первая цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1 \cdot 10^5$ Па	10	10	10	15	15	15	20	20	20	18
$t_1$ , $^\circ\text{C}$	600	700	800	600	700	800	600	700	800	850

б) Паровое сопло

Первая цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1 \cdot 10^5$ Па	20	20	20	15	15	15	25	25	25	30
$t_1$ , $^\circ\text{C}$	450	400	300	450	400	300	450	400	350	400

Конечное давление и расход пара и воздуха принять по последней цифре номера задания из следующей таблицы (для воздушного и парового сопел одинаковые).

Последняя цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G, кг/сек	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2	2,3	2,6
$P_2, \cdot 10^5$ Па	1	2	3	4	3,5	2,5	1,5	0,5	0,8	2,3

Примечание. Расчет цикла паросиловой установки и парового сопла выполнять с использованием  $i - S$  диаграммы водяного пара и таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара /1/.

Результаты расчета параметров промежуточных точек цикла и изменение параметров по длине сопла занести в таблицу вида:

Последняя цифра номера задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_2, \cdot 10^5$ Па	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	1,2	1,2	1,2	1,2
$\eta_{oi}$	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,85	0,8	0,82	0,85	0,8 1

2. Дано. Воздух и водяной пар с начальными параметрами  $P_1$  и  $t_1$  расширяются в соплах до давления  $P_2$ .

Для расчетного режима работы сопел требуется:

- а) выбрать типы сопел;
- б) определить параметры состояния ( $P$ ,  $v$  и  $t$ ) в характерных сечениях сопел; для парового сопла необходимо найти также энтальпию и степень сухости;
- в) определить скорость истечения и скорость в критическом сечении;
- г) определить площадь сечения и диаметр характерных сечений сопел, если расход воздуха и пара равен  $G$ , кг/час;
- д) определить длину сопел;
- е) изобразить сопла в масштабе и построить диаграммы изменения давления, удельного объема, температуры, местной скорости распространения звука и скорости течения по длине проточной части сопел.

Скорость пара и воздуха на входе в сопла  $W_1 = 10$  м/сек. Угол раствора сопел: сужающейся части –  $30^\circ\text{C}$ ; расширяющейся части –  $8^\circ\text{C}$ . Коэффициент скорости сопел  $\varphi = 0,95$ .

Начальные параметры воздуха и пара принять по первой цифре номера задания из следующих таблиц.

а) Параметры в характерных точках цикла

	$P, \cdot 10^5 \text{ Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{ К}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$i, \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$	$x$
1							
2							
и т.д.							

б) Параметры воздуха в крайних сечениях сопла

Сечение	$P, \cdot 10^5 \text{ Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$W, \text{ м/сек}$	$a, \text{ м/сек}$

в) Параметры пара в характерных сечениях сопла

Сечение	$P, \cdot 10^5 \text{ Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$i, \text{ кДж/кг}$	$W, \text{ м/сек}$	$a, \text{ м/сек}$	

Построение цикла паросиловой установки в  $p-v$ ,  $T-S$  и  $i-S$  координатах выполнить на фоне пограничных кривых. Пограничные кривые построить по таблицам /1/. Координаты точек, по которым будут построены пограничные кривые, привести в пояснительной записке.

Для удобства построения цикла в  $p-v$  координатах применить полулогарифмическую систему координат ( $p-\lg v$ ).

Сопло и график изменения параметров построить на одном чертеже при одинаковых линейных масштабах.

Все построения выполнить на миллиметровой бумаге форматом 203x288 мм.

При подготовке к сдаче задания обратить внимание на вопросы:

1. Процесс парообразования. Линии насыщения. Влажный насыщенный пар. Степень сухости пара. Сухой насыщенный пар. Перегретый пар.  $p-v$ ,  $T-S$  и  $i-S$  диаграммы водяного пара.

2. Определение параметров водяного пара по  $i - S$  диаграмме и таблицам теплофизических свойств водяного пара.
3. Цикл Карно для паросиловой установки.
4. Цикл Ренкина. Изображение цикла Ренкина в  $p - v$ ,  $T - S$  и  $i - S$  координатах.
5. Схема паросиловой установки.
6. Сопла и диффузоры. Процессы, протекающие в соплах и диффузорах. Зависимость формы сопла и диффузора от соотношения скорости течения и местной скорости звука.
7. Скорость истечения. Коэффициент скорости.
8. Расчет сопла Лавеля.

### *Пример расчета цикла*

Дано:

$$N = 1000 \text{ кВт}; P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}; t_1 = 500^\circ\text{C}; P_2 = 0,02 \cdot 10^5 \text{ Па}; \eta_{oi} = 0,85.$$

Решение:

а) Определение параметров пара в крайних точках цикла и изображение цикла в координатах  $p-v$ ,  $T-S$ ,  $i-S$ .

Параметры пара в крайних точках цикла паросиловой установки определяются по диаграмме  $i-S$  для водяного пара, а также по таблицам и сводятся затем в таблицу.

Удобнее сначала определить параметры пара перед тепловым двигателем. Так как известны значения давления и температуры пара перед турбиной, то положение точки 1 на диаграмме  $i-S$  находится на пересечении изобары  $P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и изотермы  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Определив местонахождение точки 1 на диаграмме  $i-S$ , находим значение энтальпии и удельного объема пара.

В идеальном цикле паросиловой установки (цикл Ренкина) расширение пара в турбине происходит без потерь энергии пара на трение и без теплообмена с внешней средой (т.е. адиабатически). Так как при адиабатическом процессе энтропия рабочего тела остается постоянной, то положение в  $i-S$  диаграмме точки 2, характеризующего состояние отработанного пара при идеальном его расширении в турбине, определится на пересечении изобары  $P_2 = 0,02 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и линии постоянной энтропии  $S_1 = 6,96 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Определив местонахождение точки 2 на диаграмме  $i$ - $S$ , находят значение энтальпии, удельного объема, степени сухости и температуры пара после его адиабатического расширения в турбине. Температура влажного насыщенного пара в  $i$ - $S$  диаграмме определяется следующим образом: из данной точки проводится изобара до пересечения с верхней пограничной кривой, и определяется температура сухого насыщенного пара, которая будет равна температуре влажного насыщенного пара и температуре насыщения воды при том же давлении, что и в искомой точке.

При реальном расширении пара в турбине часть располагаемого теплоперепада расходуется на преодоление различных аэродинамических сопротивлений при прохождении пара через проточную часть турбины. Эти потери оцениваются внутренним относительным КПД турбины:

$$\eta_{0i} = \frac{h_i}{h_g} = \frac{i_1 - i_{2g}}{i_1 - i_2},$$

где  $h_g = i_1 - i_2$  – располагаемый теплоперепад;

$h_i = i_1 + i_{2g}$  – действительно используемый теплоперепад;

$i_{2g}$  – энтальпия отработавшего пара при реальном расширении пара в турбине.

Из соотношения /1/ определяется энтальпия пара в точке  $2g$ :

$$i_{2g} = i_1 - (i_1 - i_2)\eta_{0i} = 3432 - (3432 - 2030) \cdot 0.85 = 2240.3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Местонахождение в диаграмме  $i$ - $S$  точки  $2g$ , характеризующей состояние отработанного пара при реальном его расширении в турбине (с учетом потерь на трение), определяется на пересечении изобары  $P_2$  и линии постоянной энтальпии  $i_{2g}$ . Найдя точку  $2g$  на диаграмме  $i$ - $S$ , определяем все параметры пара в этой точке.

Конденсация отработавшего пара в конденсаторе (процесс 2-3) осуществляется при постоянном давлении; параметры конденсатора в точке 3 определяются по таблицам по давлению в конденсаторе  $P_2 = 0,02 \cdot 10^5$  Па для воды в состоянии насыщения.

В результате повышения давления конденсата питательным насосом (процесс 3-4) давление конденсата становится равным котловому давлению.

$P_1 = 50 \cdot 10^5$  Па, остальные параметры в этом процессе остаются без изменения, в том числе и удельный объем в силу несжимаемости жидкости.

Процессы нагрева конденсата до температуры кипения (процесс 4-5), парообразование до получения сухого насыщенного пара (процесс 5-6) и перегрев пара в пароперегревателе (процесс 6-1) осуществляются при постоянном давлении  $P_1 = 50 \cdot 10^5$  Па.

Построение цикла в координатах  $p-v$ ,  $T-S$  и  $i-S$  производится по найденным значениям соответствующих параметров в крайних точках цикла. Процессы 1-2 и 1-2g в  $p-v$  диаграмме и процесс 6-1 в  $i-S$  и  $T-S$  диаграмме строятся по промежуточным точкам. Промежуточные точки выбираются произвольно, параметры в этих точках определяются по  $i-S$  диаграмме. Процесс 1-2g в  $i-S$  и  $T-S$  диаграмме условно представляем как прямолинейный. После построения цикла паросиловой установки в  $p-v$ ,  $T-S$  и  $i-S$  диаграмме необходимо провести на этих диаграммах верхнюю и нижнюю пограничные кривые. Данные для построения этих кривых берутся из таблиц. Пограничные кривые проводить по 7-8 промежуточным точкам.

Графики цикла в  $p-v$ ,  $T-S$  и  $i-S$  координатах представлены на рис. 3, 4 и 5.

Параметры крайних точек цикла паросиловой установки

№№ точек цикла	$P, \cdot 10^5$ Па	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$i, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/кг}\cdot\text{K}$	$x$	
1	50.0	500	773	0.069	3432	6.96	перегретый пар	
2	0,02	17,5	290,5	59	2030	6,96	0,794	
2	0,02	17,5	290,5	59	2240,8	7,72	0,882	
3	0,02	17,5	290,5	0,001	73,52	0,2609	0	
4	50	17,5	290,5	0,001	73,52	0,2609	0	
5	50	263,9	536,9	0,00128	1154,4	2,921	0	
6	50	263,9	536,9	0,0394	2794	5,973	1	
Процесс 1-2	а	10	265	538	0,24	2972	6,96	перегретый пар
	б	1,4	109	382	1,2	2588	6,96	0,92
	в	0,12	49,5	322,5	10	2240	6,96	0,851
	г	6	270	543	0,4	2996	7,25	перегретый пар
	д	0,45	79	352	3,5	2596	7,5	0,98
	е	0,05	33	306	25	2340	7,66	0,908
	ж	50	350	623	0,051	3064	6,46	перегретый пар

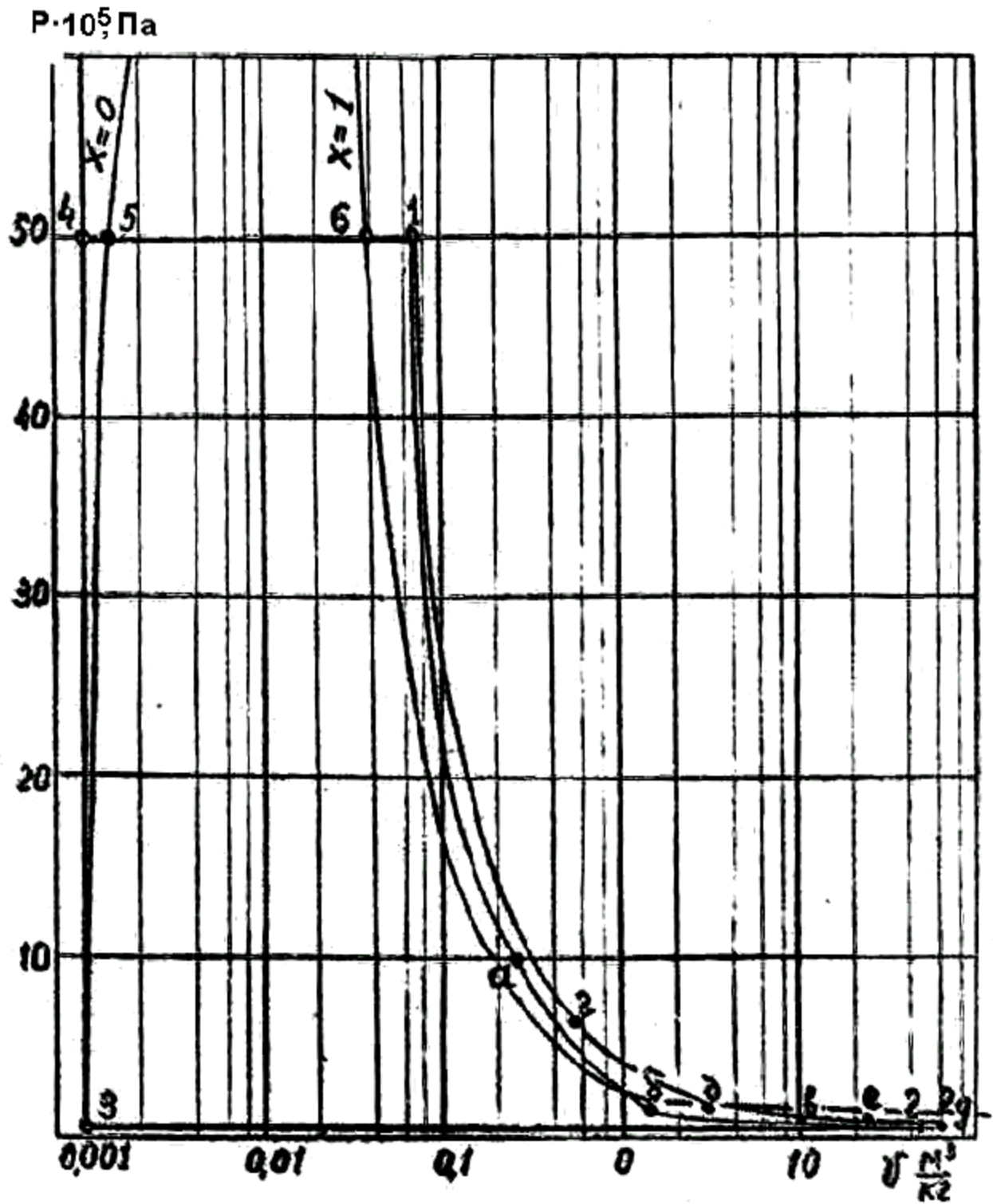


Рис. 3. Цикл паросиловой установки в  $p$ - $v$  координатах



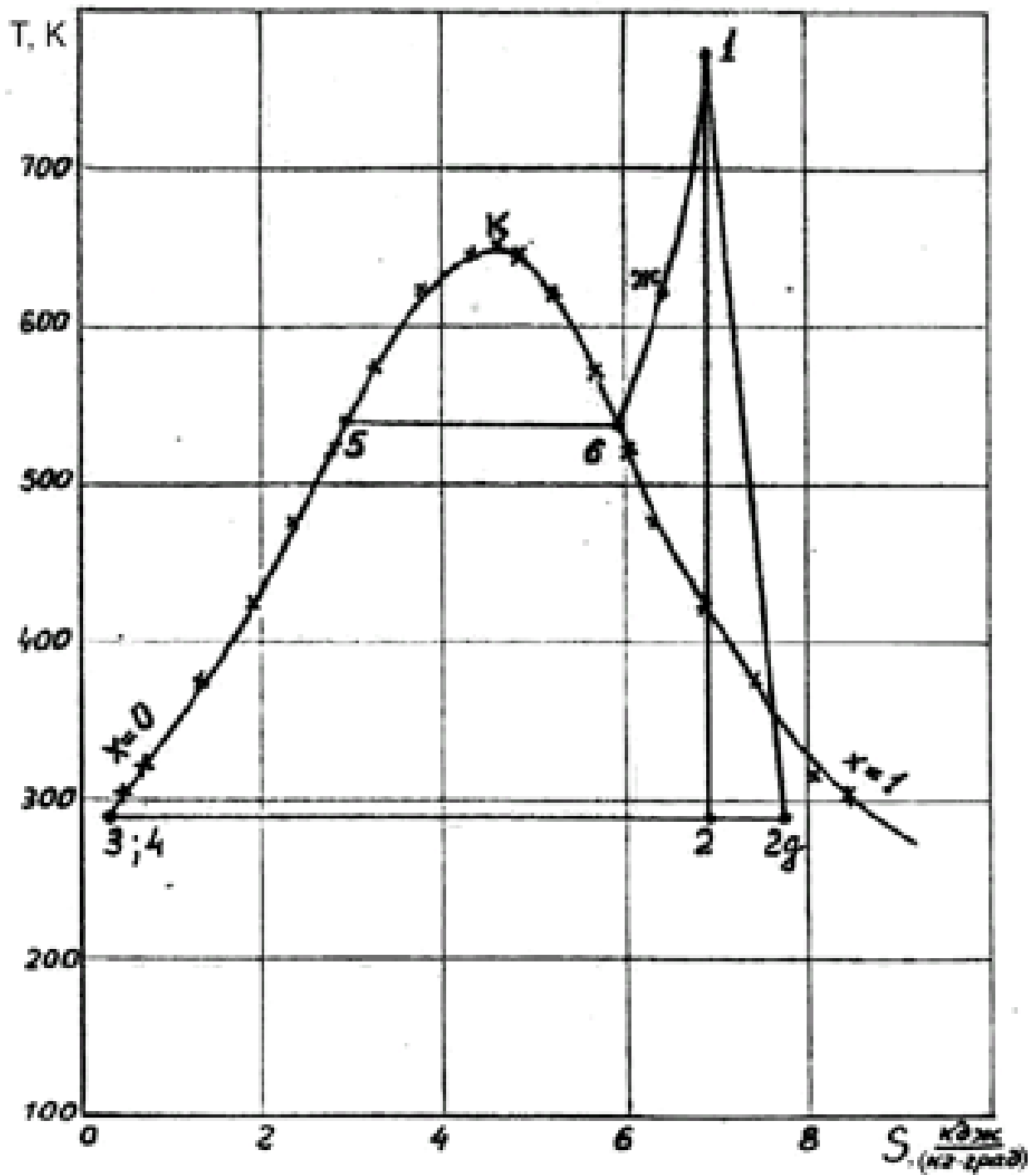


Рис. 4. Цикл паросиловой установки в T-S координатах

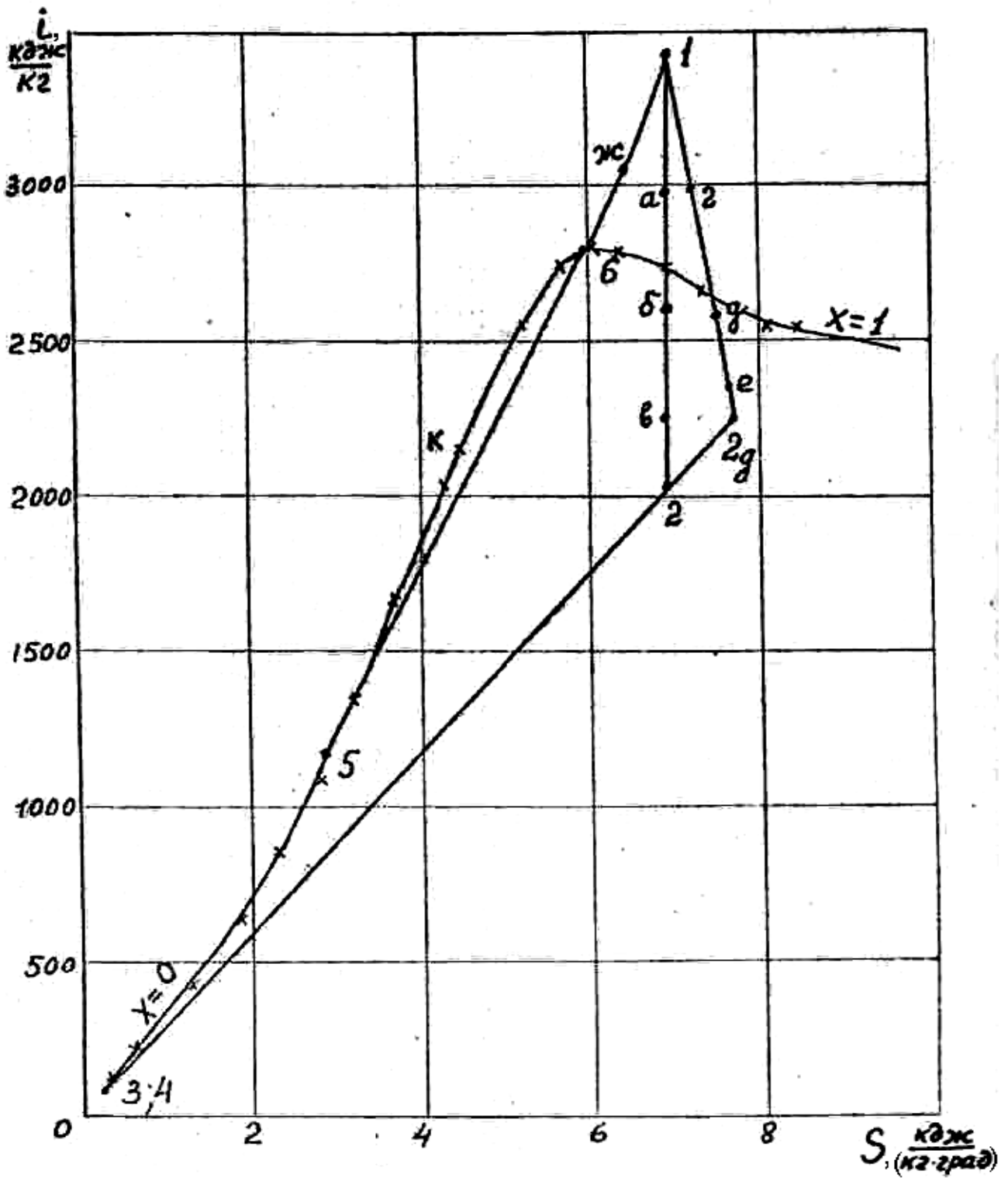


Рис. 5. Цикл паросиловой установки в  $i$ - $S$  координатах

б) Термический кпд цикла, определяемый как отношение теплоты, полезно использованной в цикле, ко всей теплоте, подведенной к рабочему телу, определяется из выражения:

$$\eta_i = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} = \frac{3432 - 2030}{3432 - 73.52} = 0.418.$$

Внутренний абсолютный кпд цикла, определяемый как отношение действительно использованного теплоперепада ко всему теплу, подведенного к рабочему телу, определяется из выражения:

$$\eta_i = \frac{i_1 - i_{2g}}{i_1 - i_4}; \quad \eta_i = \frac{3432 - 2240.3}{3432 - 73.52} = 0.355.$$

в) Удельный расход пара (расход пара, необходимый для выработки 1 квтч электроэнергии):

$$d = \frac{3600}{i_1 - i_{2g}} = \frac{3600}{3432 - 2240.3} = 3.02 \frac{\text{кг}}{\text{квтч}}.$$

Часовой расход тепла:

$$D = N \cdot d = 1000 \cdot 3.02 = 3020 \text{ кг/ч}.$$

г) Удельный расход теплоты:

$$q = d(i_1 + i_4) = 3.02 \cdot (3432 - 73.52) = 10120 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

д) Количество охлаждающей воды, необходимой для конденсации пара, определяется из уравнения теплового баланса конденсатора:

$$D(i_{2g} - i_3) = G_g \cdot C_g \cdot \Delta t_g,$$

где  $D(i_{2g} - i_3)$  – количество теплоты, отводимое от пара охлаждающей водой до его полной конденсации;

$G_g \cdot C_g \cdot \Delta t_d$  – количество теплоты, переданной паром охлаждающей воде.

$$G_g = \frac{D(i_{2g} - i_3)}{C_g \cdot \Delta t_g} = \frac{3020 \cdot (2240.3 - 73.52)}{4.187 \cdot 10} = 156 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}.$$

### Библиографический список

1. Сборник задач по технической термодинамике / Т. Н. Андропова, Б. В. Дзамнов, В. Н. Зубарев, С. А. Ремизов. – М.: Энергия, 1971. – 264 с.
2. Базаров И. . Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.
3. Болгарский А. В. и др. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче / А. В. Болгарский, В. И. Голдобеев, Д. Ф. Толкачев. – М.: Высшая школа, 1972. – 304 с.
4. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / А. Н. Василенко, Е. В. Дрыжаков, С. И. Исаев и др. – М.: Высшая школа, 1964. – 315 с.
5. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев и др. – М.: Энергия, 1983. – 448 с.
6. Лариков Н. Н. Теплотехника. – М.: Стройиздат, 1975. – 559 с.
7. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
8. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.

## Приложение 1

Средние изобарные молярные теплоемкости некоторых газов, кДж/(кмоль\*К) в интервале температур 0-t.

t, °C	Воздух	Кислород O <sub>2</sub>	Азот N <sub>2</sub>	Водород H <sub>2</sub>	Водяной пар H <sub>2</sub> O	Окись углерода CO	Углекислый газ CO <sub>2</sub>
0	29,07	29,27	29,11	28,62	33,30	29,12	35,86
100	26,15	29,54	29,14	28,93	33,74	29,18	38,11
200	29,3	29,93	29,22	29,07	34,19	29,30	40,07
300	29,52	30,40	29,38	29,12	34,57	29,52	41,75
400	29,74	30,87	29,6	29,18	35,09	29,79	43,25
500	30,09	31,33	29,86	29,25	35,63	30,10	44,57
600	30,40	31,76	30,15	29,32	36,19	30,43	45,75
700	30,72	32,15	30,45	29,41	36,79	30,75	46,81
800	31,02	32,50	30,75	29,52	37,39	31,07	47,76
900	31,32	32,82	31,04	29,62	38,00	31,38	48,61
1000	31,59	33,11	31,31	29,73	38,62	31,66	49,39
1200	32,11	33,63	31,82	30,11	39,82	32,19	50,74
1400	32,56	34,08	32,29	30,47	40,98	32,65	51,85
1600	32,97	34,47	32,79	30,83	42,06	33,05	52,80
1800	33,32	34,83	33,05	31,19	43,07	33,40	53,60
2000	33,64	35,17	33,37	31,54	43,99	33,71	54,29

## Приложение 2

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения  
(аргумент-давление)

р, МПа	t, °С	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	г, кДж/кг	S', кДж/ (кг*К)	S'', кДж/ (кг*К)
0,003	24,1	0,00100	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,004	28,98	0,00100	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,005	32,90	0,00101	28,196	137,77	2561,2	2432,4	0,4762	8,3952
0,10	99,63	0,00104	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
0,12	104,81	0,00105	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3609	7,2996
0,14	109,32	0,00105	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480
0,16	113,32	0,00105	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
0,18	116,93	0,00106	0,9778	490,7	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638
0,20	120,23	0,00106	0,8859	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
0,40	143,62	0,00108	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,60	158,84	0,00110	0,3156	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
0,80	170,42	0,00112	0,2403	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
1,0	179,88	0,00113	0,1943	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
1,2	187,96	0,00114	0,1632	798,4	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
1,4	195,04	0,00115	0,1407	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
1,6	201,37	0,00116	0,1237	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
1,8	207,10	0,00117	0,1103	884,6	2795,1	1910,5	2,3978	6,3759
2,0	212,37	0,00118	0,0995	908,6	2797,4	1888,8	2,4462	6,3373
2,2	217,24	0,00119	0,0906	930,9	2799,1	1868,2	2,4923	6,3018
2,4	221,78	0,00119	0,0832	951,9	2800,4	1848,5	2,5346	6,2691
2,6	226,03	0,00120	0,0769	971,7	2801,2	1829,5	2,5736	6,2386
2,8	230,04	0,00121	0,0714	990,5	2801,7	1811,2	2,6106	6,2101
3,0	233,84	0,00122	0,0666	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
3,5	242,54	0,00123	0,0570	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
4,0	250,33	0,00125	0,0494	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
4,5	257,41	0,00127	0,0440	1122,2	2796,5	1674,3	2,8614	2,8614
5,0	263,92	0,00129	0,0394	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712

## Приложение 3

Физические свойства сухого воздуха при давлении 760 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p,$ кДж/ (кг*К)	$\lambda*10^2,$ Вт/ (м*К)	$a*10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\mu*10^6,$ Н*с/м <sup>2</sup>	$\nu*10^6,$ м <sup>2</sup> /с	Pr
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680

## Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	i, кДж/ кг	$c_p$ , кДж/ (кг*К)	$\lambda$ , Вт/ (м*К)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Н*с/м <sup>2</sup>	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	2,58
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,203	0,676	16,5	314,9	0,326	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	1,75
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	1,47
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,4	0,217	1,26
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	1,10
180	10,3	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	1,03
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	0,932
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	0,898
240	33,48	813,6	1037,5	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	0,883
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	0,892
280	64,19	750,7	1236,7	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	0,917
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	0,986







Учебное издание

Николай Александрович Белоусов

## **Термодинамика и теплопередача**

(Основы теории, типовые задачи,  
задания и методические указания)

Учебное пособие

Редактор Пименова К. В.

Технический редактор Зуев М. Ю.

Лицензия серия ЛР № 020827 от 29 сентября 1998 г.

План 2002 г., позиция 25. Подписано в печать 06.12.2002 г.

Компьютерный набор. Гарнитура Times New Roman.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 4,2. Уч. изд. л. 4,3. Тираж 150 экз. Заказ № 141.

Ухтинский государственный технический университет.

169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

Издательско-полиграфическое управление УГТУ.

Лицензия ПД № 00578 от 25 мая 2000 г.

169300, г. Ухта, ул. Октябрьская, 13.

