

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**М.В. Хомякова**

## **ТЕПЛОФИЗИКА**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,  
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
15.03.01 Машиностроение

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2022

УДК 664

Рецензент

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инжиниринга  
технологического оборудования ФГБОУ ВО «Калининградский  
государственный технический университет»

Ю. А. Фатыхов

Хомякова, М. В.

Теплофизика: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ.  
бакалавриата по напр. подгот. 15.03.01 Машиностроение / М. В. Хомякова. –  
Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 42 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Теплофизика» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекций по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля, материалы по подготовке к практическим занятиям, отражены рекомендации для выполнения контрольной работы студентами заочной формы обучения.

Табл. 16, рис. 3, список лит. – 13 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 23 апреля 2022 г., протокол № 3

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 15 июня 2022 г., протокол № 7

УДК 664

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Хомякова М. В., 2022 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	19
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	36
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	37

## ВВЕДЕНИЕ

Теплофизика представляет собой совокупность дисциплин, представляющих теоретические основы энергетики. Включает термодинамику, тепломассообмен, методы экспериментального и теоретического исследования равновесных и неравновесных свойств веществ и тепловых процессов.

Теплофизика является дисциплиной, формирующей у обучающихся способность использования полученных знаний и навыков при участии в разработке технических процессов на основе теплофизических законов и свойств конструкционных материалов.

Целью освоения дисциплины «Теплофизика» является формирование знаний и навыков по расчету тепловых процессов в оборудовании машиностроительных производств с учетом свойств материалов.

Задачи изучения дисциплины:

- освоение знаний основных теплофизических характеристик материалов, законов их изменений в процессах их обработки, а также основных методов их расчетного и экспериментального определения;
- формирование навыков расчета тепловых процессов;
- формирование знаний, умений и навыков для успешного (в т.ч. самостоятельного) освоения тепловых процессов в машиностроении.

В результате освоения дисциплины студенты должны:

Знать: теплофизические характеристики материалов и веществ;

- фундаментальные законы термодинамики и теплообмена;
- основные средства и методы определения теплофизических характеристик материалов и веществ;

Уметь: осуществлять постановку задач, их решения и получение выводов;

Владеть: навыками анализа полученных результатов для совершенствования процесса.

При реализации дисциплины «Теплофизика» организуется практическая подготовка путем проведения практических занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Знания, умения и навыки, полученные при освоении данной дисциплины, используются в дальнейшей профессиональной деятельности.

Для успешного освоения дисциплины «Теплофизика», студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены практические задания. Решение практических задач, обучающимися проводится на практических занятиях после изучения соответствующих тем.

Промежуточная аттестация проводится в виде зачета, к которому допускаются студенты, освоившие темы курса, выполнившие практические работы и получившие положительную оценку при выполнении контрольной работы (для заочной формы обучения).

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения;
- оценочные средства для промежуточной (заключительной) аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины относятся:

- задания и контрольные вопросы к практическим работам;
- задания к контрольной работе;

К оценочным средствам для промежуточной аттестации по дисциплине, проводимой в форме зачета, соответственно относятся:

- вопросы к зачету.

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (таблица 1).

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0–40%	41–60%	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно- корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
<b>2. Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи

Система оценок  Критерий	2	3	4	5
	0–40%	41–60%	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	поставленной задачи			
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом его индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Теплофизика» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов. Материал пособия содержит рекомендации по написанию контрольной работы для студентов заочной формы обучения.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Теплофизика», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции и практические занятия.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены основным процессам и аппаратам пищевой промышленности. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности студентов.

Практические занятия проводятся для закрепления основных теоретических положений курса и реализации их в практических расчетах, формирования и развития у студентов мышления в рамках будущей профессии.

На практических занятиях следует добиваться точного и адекватного владения теоретическим материалом и его применения для решения задач.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов, как в отсутствии преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- опросы по теоретическому материалу;
- контроль на практических занятиях;
- выполнение и защита контрольной работы (заочная форма обучения);

Промежуточный контроль осуществляется в форме сдачи зачета в 3-м семестре и имеет целью определить степень достижения учебных целей по дисциплине.

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ЛЗ

Номер темы	Содержание лекционного занятия	Кол-во часов ЛЗ	
		очная форма	заочная форма
1	Теплофизика и процессы пищевых производств	1	2
2	Основные термодинамические параметры и их связь	1	1
3	Первый закон термодинамики	2	-
4	Теплоемкость	1	-
5	Второй закон термодинамики	1	-
6	Основные термодинамические процессы и их анализ	2	-
7	Термодинамические процессы в парах	1	-
8	Конвективный теплообмен	2	1
9	Теплопроводность	1	-
10	Основы теории подобия и теплопередачи	2	2
11	Методы и средства определения теплофизических характеристик материалов и веществ	2	-
Итого		16	6



Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

## **Тема 1. Теплофизика и процессы пищевых производств**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Цель и задачи дисциплины, связь с другими дисциплинами, ее место и значение.

2. Основные понятия и определения

*Ключевые понятия:* термодинамика, теплопередача, методы и средства измерения температур

*Литература:* [4, с. 18–40]

*Методические рекомендации*

Теоретическими основами теплофизики являются техническая термодинамика и теория тепло- и массообмена.

Теплофизическая подготовка студентов технических специальностей имеет ряд особенностей, которые обусловлены характером их будущей практической деятельности. Большинство технологических процессов, протекает с выделением или поглощением теплоты, а также с широким использованием электрической и механической энергии, которые вырабатываются в различных теплосиловых установках и тепловых двигателях.

В этой теме раскрывается необходимый комплекс определений и понятий, на основе которых строится все дальнейшее изложение дисциплины «Теплофизика».

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Что изучает теплофизика?

2. Какие существуют направления использования теплоты?

## **Тема 2. Основные термодинамические параметры и их связь**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Удельный объем, давление, температура.

2. Уравнение Клапейрона-Менделеева.

3. Газовая постоянная.

4. Уравнение состояния реальных газов.

*Ключевые понятия:* идеальный газ, реальный газ, объем, температура, давление

*Литература:* [2, с. 5–20, 22–26, 28–32, 54–56]

#### *Методические рекомендации*

В данной теме необходимо изучить интенсивные и экстенсивные свойства вещества. Особое внимание уделить основным параметрам состояния термодинамической системы: абсолютной температуре, абсолютному давлению и удельному объему (или плотности) тела.

Рассмотреть уравнение Менделеева-Клапейрона для идеальных газов, ввести понятие универсальной газовой постоянной, а также изучить уравнение Ван-дер-Ваальса – одного из широко известных приближённых уравнений состояния, описывающее свойства реального газа, имеющее компактную форму и учитывающее основные характеристики газа с межмолекулярным взаимодействием.

#### *Вопросы для самоконтроля:*

1. Приведите определение термодинамической системы.
2. Что такое рабочее тело?
3. Какое число независимых параметров определяет состояние рабочего тела? Почему?
4. Какой процесс называют термодинамическим? 8. Какой газ называют идеальным?
5. Какие известны уравнения состояния идеального газа?
6. Каково соотношение между удельной газовой постоянной и универсальной газовой постоянной и в каких единицах их выражают?

### **Тема 3. Первый закон термодинамики**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Первый закон термодинамики. Уравнения первого закона термодинамики.
2. Внешняя и внутренняя энергия.
3. Энтальпия.
4. Диаграмма  $p-v$  и ее свойство.

*Ключевые понятия:* первый закон термодинамики, энтальпия

*Литература:* [2, с. 45–78; 4, с. 40–57]

#### *Методические рекомендации*

Студент должен понять особенности применения в термодинамике общего закона сохранения и превращения энергии. Энергетические изменения, происходящие в термодинамической системе, определяют по изменению параметров рабочего тела, которое является объектом анализа.

Следует четко разобраться в разнице понятий «работа расширения» и «располагаемая работа» и уметь дать (геометрическую интерпретацию их в  $pV$  – диаграмме).

Уясните принципиальную разницу между внутренней энергией, однозначно определяемой данным состоянием рабочего тела, а также работой и теплотой, которые появляются лишь при наличии процесса перехода рабочего тела из одного состояния в другое и, следовательно, зависят от характера этого процесса. Следует понять разницу между функцией состояния и функцией процесса.

При изучении темы вводится еще одна функция (параметр) состояния, которая называется энтальпией.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое внутренняя энергия рабочего тела?
2. Что такое теплота и работа процесса?
3. В чем сущность первого закона термодинамики?
4. Что такое энтальпия?
5. Как графически изобразить работу и теплоту процесса?

#### **Тема 4. Теплоемкость**

##### *Ключевые вопросы темы*

1. Теплоемкость массовая, объемная, молярная, при постоянном давлении и постоянном объеме.
2. Коэффициент Пуассона.
3. Закон Майера.
4. Средняя теплоемкость в процессе.

*Ключевые понятия:* удельная теплоемкость, молярная теплоемкость, закон Майера, коэффициент Пуассона

*Литература:* [6]

##### *Методические рекомендации*

Из экспериментальных опытов известно, что сообщение разным телам одинакового количества теплоты приводит к нагреванию их до различной разности температур. Поэтому необходимо ввести и изучить характеристику, называемую теплоёмкостью.

Изучить понятие удельной теплоемкости, молярной теплоёмкости веществ и соотношение их взаимосвязи.

Теплоёмкость зависит от условий нагревания тела. Для газов наибольший интерес представляют теплоёмкости для случаев нагревания при постоянном давлении и постоянном объеме. Необходимо ознакомиться с теплоёмкостью при

постоянном давлении и с теплоёмкостью при постоянном объёме. Рассмотреть их соотношение (закон Майера).

Изучить отношение молярной теплоёмкости при постоянном давлении к молярной теплоёмкости при постоянном – коэффициентом Пуассона.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое теплоемкость? Какие существуют теплоемкости?
2. В чем разница между средней и истинной теплоемкостями?
3. Как вычислить теплоемкость смеси идеальных газов?
4. Каков физический смысл удельной газовой постоянной? В чем физический смысл уравнения Майера?

### **Тема 5. Второй закон термодинамики**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Энтропия.
2. Второй закон термодинамики.
3. Процессы равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые.
4. Диаграмма T-s и ее свойства.

*Ключевые понятия:* второй закон термодинамики, энтропия, цикл Карно

*Литература:* [2, с. 96–123; 4, с. 57–62, 138–144]

#### *Методические рекомендации*

Изучить понятие энтропии. Рассмотреть равновесные, неравновесные, обратимые и необратимые процессы. Особое внимание уделить второму закону термодинамики.

Непрерывное получение работы за счет подведения теплоты возможно только в цикле и невозможно в разомкнутом процессе. Поэтому тщательно изучите все вопросы, относящиеся к циклам, особенно к циклу Карно, который имеет большое значение в термодинамике. С его помощью выводят все аналитические зависимости. Формула для КПД цикла Карно, по существу, также является техническим выражением существования второго закона термодинамики в применении к тепловым машинам.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое термодинамический цикл?
2. В чем состоит термическая и механическая необратимости процессов?
3. Что такое прямой и обратный (обратимые) циклы Карно?
4. Что называют термическим к.п.д. и холодильным коэффициентом произвольного цикла, чему они равны для цикла Карно?

5. Почему обратимый цикл Карно является самым эффективным среди других циклов, осуществляемых в заданном интервале температур?

6. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона.

## **Тема 6. Основные термодинамические процессы и их анализ**

### *Ключевые вопросы темы*

1. Процессы изобарные, изохорные, изотермические, адиабатные, политропные.

2. Работа, теплота, изменения внутренней энергии и энтропии в процессах.

*Ключевые понятия:* изопроцессы

*Литература:* [2 с. 33–35, 80–92, 162–178; 4 с. 63–75, 89–95]

### *Методические рекомендации*

В термодинамике переход рабочего тела из одного равновесного состояния в другое совершается в обратимом термодинамическом процессе. Задание начального и конечного состояний рабочего тела означает полное знание всех термодинамических параметров состояния начальной и конечной точек процесса. Основная задача исследования термодинамического процесса – определение теплоты, участвующей в процессе, и работы изменения объема рабочего тела. Такие величины, как изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии являются вспомогательными, служащими для решения основной задачи.

Для успешного решения различных задач, связанных с водяным паром, научитесь схематично изображать основные процессы (изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный) и диаграммы –  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  и  $h$ - $s$

Уясните понятие политропного процесса, под которым понимается любой термодинамический процесс идеального газа с постоянной теплоемкостью (или показателем политропы  $n$ ) в этом процессе, общность политропного процесса, выраженное уравнением  $p v^n = \text{const}$ , получая из него уравнение известных основных процессов (изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного). Разберитесь в определении показателя политропы и теплоемкости политропного процесса идеального газа, как обобщающих величин, из которых получают частные значения для основных процессов.

Научитесь изображать графически в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах как основные, так и общие политропные процессы.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Какие термодинамические процессы рабочего тела называют основными?
2. Изобразите в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах основные процессы идеального газа и приведите характеристику каждому из них.
3. Чему равен показатель политропы в основных процессах идеального газа?
4. Чему равна теплоемкость политропного процесса?
5. Какие группы политропных процессов вы знаете? Покажите их на  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах.
6. Как определяют теплоту и работу изменения объема для основных термодинамических процессов идеального газа?

## **Тема 7. Термодинамические процессы в парах**

### *Ключевые вопросы темы*

1. Насыщенная жидкость, насыщенный и перегретый пар.
2. Пограничная кривая, тройная и критическая точки.
3. Влажный пар и его параметры.

*Ключевые понятия:* насыщенная жидкость, насыщенный пар, влажный пар, перегретый пар

*Литература:* [2, с. 210–217; 4, с. 75–84]

### *Методические рекомендации*

Усвойте основные определения и понятия насыщенной жидкости, насыщенного и перегретого пара. Научитесь определять газовую постоянную влажного воздуха и его энтальпию. Обязательно приобретите навыки в пользовании  $ih$ -диаграммой влажного воздуха.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Какой пар называется влажным?
2. Какой пар можно считать насыщенным?
3. Чем отличается перегретый пар от насыщенного?
4. Чему равно давление насыщенного пара?

## **Тема 8. Конвективный теплообмен**

### *Ключевые вопросы темы*

1. Режимы течения жидкости и газов.
2. Гидромеханический и термический пограничные слои.
3. Уравнение конвективной теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи.

*Ключевые понятия:* режимы течения жидкости, пограничный слой,

коэффициент теплоотдачи

*Литература:* [2, с. 348–385, 388–391, 394–401; 4, с. 278–284, 297–340, 481–507]

#### *Методические рекомендации*

В данной теме необходимо изучить основные режимы течения жидкости.

Основная задача теории конвективного теплообмена – разработка зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Опыт преподавания показывает, что этот раздел теории тепло- и массообмена является наиболее трудным.

Для того чтобы уяснить, как вычислить  $\alpha$ , нужно внимательно изучить лекционный материал, в котором разбирается физическая сущность конвективного теплообмена на основе теории Прандтля. Совместное действие конвекции и теплопроводности называют конвективным теплообменом. Нужно понять, что система четырех дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных, описывающих конвективный теплообмен, совместно с условиями однозначности в принципе позволяет в результате строгого решения получить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Однако практически при решении этой системы уравнений встречаются математические трудности

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое свободная и вынужденная конвекция?
2. Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией.
3. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи? В каких единицах его выражают?
4. Какие основные формулы применяют для различных случаев конвективного теплообмена?

### **Тема 9. Теплопроводность**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Температурное поле, стационарное, нестационарное.
2. Градиент температур. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Коэффициент температуропроводности

*Ключевые понятия:* температурное поле, градиент температур, закон Фурье, теплопроводность, температуропроводность

*Литература:* [2, с. 309–322, 326–332, 339; 4, с. 272–278, 340–357]

#### *Методические рекомендации*

Нужно понять значение закона Фурье для решения задач стационарной теплопроводности. Усвоить, что физически теплопроводность представляет собой процесс распространения теплоты путем теплового движения микрочастиц вещества без визуально наблюдаемого перемещения самих частиц. Теплопроводность наблюдается в твердых телах, неподвижных жидких и газообразных веществах. Если происходит движение жидкости или газа, то теплопроводность в чистом виде имеет место в весьма тонком неподвижном слое, прилегающем к поверхности твердого тела.

Уяснить назначение и состав условий однозначности при решении задач теплообмена. Поймите влияние рода граничных условий на решение уравнения теплопроводности при стационарном режиме.

Уяснить разницу между линейной и поверхностной плотностями теплового потока, а также между коэффициентом теплопередачи и линейным коэффициентом теплопередачи. Разобраться в способах интенсификации теплопередачи, а также в том, как надо правильно подбирать материалы теплоизоляции цилиндрического теплопровода. Уяснить, почему критерии  $Bi$  и  $Fo$  определяют нестационарную теплопроводность при нагревании и охлаждении тела.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что понимают под явлением теплопроводности?
2. Напишите уравнение теплопроводности Фурье. Объясните физический смысл входящих в него величин.
3. Каковы границы изменения теплопроводности для металлов, изоляционных и строительных материалов, жидкостей и газов.
4. От чего зависит теплопроводность?
5. Чем отличаются условия однозначности для стационарного и нестационарного режимов теплопроводности?
6. Напишите выражение теплового потока для теплопроводности через плоскую одно- и многослойную стенки.
7. Напишите выражение теплового потока для теплопроводности через цилиндрическую одно- и многослойную стенки.

### **Тема 10. Основы теории подобия и теплопередачи**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Основы теории подобия.
2. Критерии подобия и критериальные уравнения.
3. Теплопередача.

*Ключевые понятия:* критерии подобия, теплопередача



*Литература:* [2, с. 348–385, 388–391, 394–401; 4, с. 278–284, 297–340, 481–507]

### *Методические рекомендации*

Теория подобия допускает проведение опытов не на натуральном объекте, а на его модели, в результате опыта позволяет распространять не все подобные явления. Кроме того, базируясь на системе дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, теория подобия четко определяет условия подобия физических явлений и процессов. Теория подобия – теория эксперимента. Нужно хорошо разобраться в лекционном материале, посвященном основам теории подобия, и принять суть трех теорем подобия. Усвоить принцип получения критериев подобия конвективного теплообмена из дифференциальных уравнений, описывающих этот процесс. Запомнить, что определяющие критерии стационарного конвективного теплообмена ( $Re$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ ) составлены из параметров, входящих в условия однозначности, а определяемый критерий ( $Nu$ ) наряду с параметрами, входящими в условия однозначности, включает в себя численное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Уяснить значение второй теоремы подобия, позволяющей для подобных явлений записать общее решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена (не решая ее) в виде функции критериев подобия вида  $f(Nu, Re, Pr, Gr) = 0$ .

Понять необходимость введения в критериальное уравнение множителя  $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$ , который учитывает влияние на критерий  $Nu$ , а следовательно, и на  $\alpha$  направления теплового потока при теплоотдаче (нагревание или охлаждение жидкости). Уяснить физический смысл основных критериев ( $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ ) и при расчетах применять те критериальные зависимости, которые соответствуют конкретному виду задачи.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. В чем суть теории подобия?
2. В чем физический смысл критериев подобия?
3. Чем характеризуется критерий  $Nu$ ?
4. Что называется критериальным уравнением (уравнением подобия)?
5. Что обозначают индексы у критериев, входящих в уравнение подобия?

## **Тема 11. Методы и средства определения теплофизических характеристик материалов и веществ**

### *Ключевые вопросы темы*

1. Средства измерения температур и тепловых потоков.
2. Определение теплоемкости, коэффициентов тепло- и

температуропроводности.

*Ключевые понятия:* методы измерения температур, термометры, термопара, пирометры

*Литература:* [11]

*Методические рекомендации*

Изучить методы и средства измерения температуры. Рассмотреть принципы работы термометров сопротивления, термоэлектрических измерителей температур.

Рассмотреть измерение теплоемкости веществ и коэффициента теплопроводности.

Усвоить метод дополнительной стенки.

*Вопросы для самоконтроля*

1. Какие методы и средства измерения температуры вы знаете?
2. Принцип работы термометров сопротивления
3. Принцип работы термопары.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков в области теплофизики.

Практические занятия по дисциплине «Теплофизика» являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ПЗ

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия	Кол-во часов ПЗ	
		очная форма	заочная форма
1	Определение термодинамических параметров газов и их смесей	2	-
2	Определение теплоемкости материалов и веществ в термодинамических процессах	2	-
3	Расчет характеристик термодинамических процессов	2	-
4	Определение характеристик динамических процессов с использованием диаграмм	2	-
5	Расчет процессов теплопроводности	2	-
6	Расчет процесса конвективного теплообмена	2	-
7	Расчет процесса теплопередачи	2	-
<b>Итого</b>		14	-

### Практическое занятие № 1: Определение термодинамических параметров газов и их смесей

*Цель:* получение практических умений и навыков в области определения термодинамических параметров газов и их смесей.

*Задание по практической работе:*

**Задача 1.1.** Произвести расчет термодинамических параметров газовой смеси, совершающей изобарное расширение до объема  $V_2$ , если известны начальная температура  $t_1=50^\circ\text{C}$ , начальное давление  $p_1=3$  МПа и масса  $M_{\text{см}}=4$  кг.

Определить газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу, начальный объем  $V_1$ , основные параметры в конечном состоянии, изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии, теплоту и работу расширения в процессе 1–2. При определении молярной массы и газовой постоянной обратить внимание на способ задания смеси. Теплоемкость компонентов смеси рассчитать с использованием закона Майера. Для расчета параметров состояния использовать уравнения состояния идеальных газов. Правильность вычисления энергетических параметров контролировать по выполнению 1-го закона термодинамики. Состав газовой смеси по объему:  $\text{CH}_4=96,06\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=2,0\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=0,3\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,01\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,1\%$ ;  $\text{N}_2=1,0\%$ ;  $\text{CO}_2=0,1\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 0,43\%$ ;  $\rho=V_2/V_1=3,5$ .

**Задача 1.2.** Произвести расчет термодинамических параметров газовой смеси, совершающей изобарное расширение до объема  $V_2$ , если известны начальная температура  $t_1=70^\circ\text{C}$ , начальное давление  $p_1=5\text{ МПа}$  и масса  $M_{\text{см}}=2\text{ кг}$ . Определить газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу, начальный объем  $V_1$ , основные параметры в конечном состоянии, изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии, теплоту и работу расширения в процессе 1–2. При определении молярной массы и газовой постоянной обратить внимание на способ задания смеси. Теплоемкость компонентов смеси рассчитать с использованием закона Майера. Для расчета параметров состояния использовать уравнения состояния идеальных газов. Правильность вычисления энергетических параметров контролировать по выполнению 1-го закона термодинамики. Состав газовой смеси по объему:  $\text{CH}_4=94,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6=3,0\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8=0,9\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,17\%$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,22\%$ ;  $\text{N}_2=0,9\%$ ;  $\text{CO}_2=0,3\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 0,31\%$ ;  $\rho=V_2/V_1=3,5$ .

### Методические рекомендации

1. Определить объемные доли компонентов смеси.
2. По справочным данным определить молекулярные массы компонентов и их молярные теплоемкости [5].
3. Вычислить газовые постоянные газов, используя значения универсальной газовой постоянной.
4. Определить средние массовые теплоемкости компонентов при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$ , используя уравнение Майера.
5. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси.
6. Определить массовый состав смеси.
7. Определить газовую постоянную смеси.
8. Определить средние массовые теплоемкости смеси при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$ .
9. Определить абсолютную температуру смеси до расширения.
10. Определить объем смеси газов до расширения.
11. Определить объем смеси газов после расширения.

12. Определить давление смеси после расширения по изобаре.
13. Определить абсолютную температуру смеси после расширения.
14. Вычислить изменение внутренней энергии в процессе 1–2.
15. Вычислить изменение энтальпии в процессе 1–2.
16. Вычислить изменение энтропии в процессе 1–2.
17. Определить работу процесса расширения.
18. Проверить точность определения энергетических параметров по выполнению 1-го закона термодинамики.

**Задача 1.3.** Для смеси газов, имеющей массовый состав: водорода ( $H_2$ ) – 4 %, метана ( $CH_4$ ) – 40 %, ацетилен ( $C_2H_2$ ) – 2 %, диоксида углерода ( $CO_2$ ) – 21 %, азота ( $N_2$ ) – 33 % определить газовую постоянную смеси, молекулярную массу смеси, удельный объем смеси, плотность смеси и парциальные давления компонентов. Давление смеси  $p_{см} = 2,9$  бар, температура смеси  $t_{см} = 37$  °С.

### Методические рекомендации

1. По справочным данным определить молекулярные массы компонентов.
2. Вычислить газовые постоянные газов, используя значение универсальной газовой постоянной.
3. Записать массовый состав смеси.
4. Определить газовую постоянную смеси.
5. Определить удельный объем смеси.
6. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси.
7. Определить объемные доли компонентов.
8. Определить плотность смеси.
9. Определить парциальные давления компонентов смеси.

**Задача 1.4.** Определить массу газа, находящегося в резервуаре объемом  $V = 500$  м<sup>3</sup>. Известно, что давление газа в резервуаре, определенное по манометру, составляет  $p_{изб} = 20$  кг/см<sup>2</sup>, а температура газа  $t = 10$  °С. Барометрическое давление  $p_{атм} = 760$  мм Нг.

1. Найти атмосферное давление воздуха.
2. Найти газовую постоянную.
3. Массу газа найти из уравнения состояния идеального газа.

**Задача 1.5.** Для заданного состава сухих продуктов сгорания топлива, не содержащих водяные пары, (состав по массе:  $CO_2 = 15,1$  %;  $O_2 = 15,4$  %;  $N_2 = 69,5$  %) найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, парциальные давления каждого газа, а также удельный объем и плотность смеси при давлении  $p_{атм} = 98$  кПа и температуре  $t = 700$  °С.

1. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси газов.

2. Найти газовую постоянную.
3. Определить парциальное давление компонентов смеси.
4. Найти удельный объём смеси при заданном давлении из уравнения состояния реального газа.
5. Найти плотность смеси.

## **Тема 2. Определение теплоемкости материалов и веществ в термодинамических процессах**

*Цель:* получение практических умений и навыков в области определения теплоемкости материалов и веществ в термодинамических процессах.

*Задание по практической работе:*

**Задача 2.1.** В камеру сгорания закачана смесь из двух молей водорода и одного моля кислорода при давлении  $p=1\text{МПа}$  и температуре  $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить массовые доли содержания компонентов смеси, молярную массу смеси, газовую постоянную смеси, средние массовые теплоемкости смеси при постоянном объеме и постоянном давлении, общий объем смеси, плотность смеси, парциальные давления газов в смеси в смеси при заданных условиях.

### **Методические рекомендации**

1. По справочным данным определяются молекулярные массы компонентов.
2. Вычислить газовые постоянные газов, используя значение универсальной газовой постоянной.
3. Определить массы компонентов и смеси.
4. Определить массовые доли компонентов.
5. Определить газовую постоянную смеси.
6. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси.
7. Определить объемные доли компонентов.
8. По справочным данным определить теплоемкости заданных газов при заданной температуре, при постоянном давлении и постоянном объеме, экстраполируя по таблицам, приведенным в справочной литературе [5].
9. Определить теплоемкость смеси при постоянном давлении и постоянном объеме.
10. Определить абсолютную температуру смеси.
11. Определить объем смеси газов.
12. Определить плотность смеси.
13. Определить парциальные давления компонентов смеси.

**Задача 2.2.** Газовая смесь имеет состав:  $\text{CO} - 25\%$ ,  $\text{N}_2 - 65\%$ ,  $\text{SO}_2 - 10\%$ .

Смесь задана в массовых долях. Известно давление смеси  $p=0,95$  бар, объем смеси  $V=6$  м<sup>3</sup>, средняя температура смеси в интервале температур от  $t_1=100$  °С до  $t_2=700$  °С. Определить массу смеси и компонентов, объемный состав смеси, среднюю молекулярную массу смеси, газовые постоянные смеси и компонентов, плотности компонентов и смеси при заданных условиях, средние массовые и объемные теплоемкости смеси в заданном интервале температур, расход тепла на нагревание или охлаждение смеси и компонентов при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  для заданного интервала температур.

### Методические рекомендации

1. По справочным данным определить молекулярные массы компонентов.
2. Вычислить газовые постоянные газов, используя значение универсальной газовой постоянной.
3. Определить массовый состав смеси.
4. Определить среднюю температуру смеси.
5. Определить газовую постоянную смеси.
6. Определить массу смеси при заданных условиях из уравнения состояния.
7. Определить массы компонентов.
8. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси.
9. Определить объемные доли компонентов.
10. Определить плотности компонентов.
11. Определить плотность смеси при заданных условиях.
12. Определить средние массовые теплоемкости компонентов по интерполяционным формулам при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  для заданного интервала температур.
13. Определить средние объемные теплоемкости компонентов по интерполяционным формулам при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  для заданного интервала температур.
14. Определить средние массовую и объемную теплоемкости смеси при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  для заданного интервала температур.
15. Определить расход теплоты на нагревание компонентов смеси при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$ .

**Задача 2.3.** По заданному составу газовой смеси рассчитать: кажущуюся (среднюю) молекулярную массу смеси, газовую постоянную, плотность, среднюю массовую теплоемкость смеси при постоянном давлении в пределах температур от  $t_1=100$  °С до  $t_2=835$  °С, количество тепла, полученное газовой смесью при её нагревании от  $t_1=100$  °С до  $t_2=835$  °С. Массовая доля азота – 0,6; воды – 0,2; углекислого газа – 0,2. Объем смеси  $V=300$  м<sup>3</sup>, давление –  $p_1=3$  бар.

## Методические рекомендации

1. По справочным данным определить молекулярные массы компонентов и их молярные теплоемкости при  $t_1=100\text{ }^\circ\text{C}$  [5].
2. По справочным данным определить молярные теплоемкости компонентов при  $t_2=835\text{ }^\circ\text{C}$ , экстраполируя по таблицам.
3. Вычислить газовые постоянные газов, используя значение универсальной газовой постоянной.
4. Определить средние массовые теплоемкости компонентов при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  при температурах  $t_1=100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2=835\text{ }^\circ\text{C}$ , используя уравнение Майера.
5. Определить кажущуюся молекулярную массу смеси.
6. Определить массовый состав смеси.
7. Определить газовую постоянную смеси.
8. Определить средние массовые теплоемкости смеси при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$ , температурах  $t_1=100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2=835\text{ }^\circ\text{C}$ .
9. Определить средние массовые теплоемкости смеси при  $p=\text{const}$  и  $v=\text{const}$  в процессе нагрева от  $t_1$  до  $t_2$ .
10. Определить абсолютные температуры смеси до и после нагревания.
11. Определить масс смеси газов.
12. Определить плотность смеси.
13. Определить давление смеси после нагрева до температуры  $t_2=835\text{ }^\circ\text{C}$  при сохранении объема.
14. Определить количество теплоты, полученное смесью при нагревании.

### Тема 3. Расчет характеристик термодинамических процессов

*Цель:* получение практических умений и навыков при расчетах термодинамических процессов.

*Задание по практической работе:*

**Задача 3.1.** При нагреве некоторого количества газа при определенных условиях температура газа повышается от  $t_1 = 500\text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить количество теплоты, переданное газу в этом процессе, учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Природа газа – водород; условия нагрева  $p=\text{const}$ ; количество газа – 2 кмоль.

**Задача 3.2.** 5 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур  $t_1 = 250\text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 30\text{ }^\circ\text{C}$ , причем наивысшее давление составляет  $p_{\text{max}} = 1\text{ МПа}$ , а наинизшее –  $p_{\text{min}} = 0,12\text{ МПа}$ .

Определить параметры воздуха в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты и термический КПД цикла. Изобразить цикл в координатах  $p$ - $v$ .



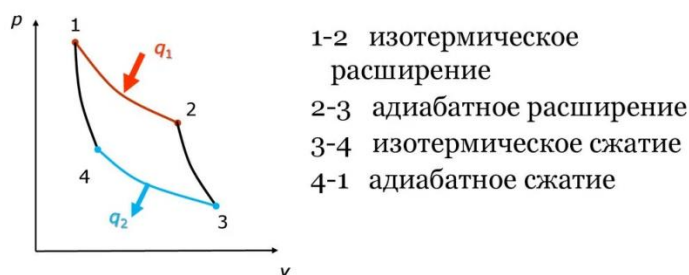


Рисунок 1

1. Согласно рисунку 1 определить параметры воздуха в характерных точках цикла.
2. Определить термический КПД цикла.
3. Найти подведенное количество теплоты.
4. Найти отведённое количество теплоты.
5. Определить работу цикла.

**Задача 3.3.** Построить зависимость термического КПД от степени сжатия для цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ , для значений степени сжатия от 2 до 10 при  $k = 1,37$

#### Тема 4. Определение характеристик динамических процессов с использованием диаграмм

*Цель:* получение практических умений и навыков в области определения характеристик динамических процессов с использованием диаграмм.

*Задание по практической работе:*

**Задача 4.1.** Известны параметры рабочего тела  $p_1 = 0,500$  МПа и  $v_1 = 0,200$  м<sup>3</sup>/кг. С помощью таблиц термодинамических свойств установить его состояние (перегретый, сухой насыщенный или влажный пар).

Определить температуру, энтальпию, энтропию, внутреннюю энергию и степень сухости пара (если пар влажный). Определить, какое количество теплоты необходимо подвести к пару в состоянии 1, чтобы его температуру повысить до  $t_2 = t_1 + 20$  °С при давлении  $p_1 = \text{const}$ . Изобразить процесс в координатах  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  (без масштаба).

#### Методические рекомендации

Термодинамические процессы для реальных газов рассчитывают с помощью таблиц рабочих веществ. Более наглядны и компактно содержат

информацию о свойствах вещества в любом фазовом состоянии диаграммы. На диаграммах нанесены нижняя ( $x = 0$ ) и верхняя ( $x = 1$ ) пограничные кривые. Показаны основные термодинамические процессы: изобарный, изохорный, изотермический, адиабатный ( $s = \text{const}$ ), а также изоэнтальпийный ( $h = \text{const}$ ) и процессы при  $x = \text{const}$ .

Диаграммы T-s, lg p-h, h-s показаны на рисунках П.А.1–П.А.3 (приложение А). Ряд процессов на диаграммах не указан, поскольку они очевидны. Действительно, изотермы в диаграмме T-s – горизонтальные линии, адиабаты ( $s = \text{const}$ ) – вертикали. В диаграмме h-s адиабаты идут вертикально, а по горизонтали располагаются изоэнтальпы ( $h = \text{const}$ ). В диаграмме lg p-h вертикальными линиями изображаются изоэнтальпы ( $h = \text{const}$ ), а изобары – горизонтальными линиями.

1. По таблице термодинамических свойств водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) определить удельные объемы сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости [7].

2. Определить степень сухости.

3. Рассчитываем параметры  $h_x$ ,  $s_x$ ,  $u_x$ , по формулам, взятым из таблицы П.Б.1 (приложение Б).

4. Значения параметров  $r, h', s'$  водяного пара выбираются из термодинамической таблицы П.Б.2 (приложение Б).

5. Энтальпия перегретого пара определяется по таблицам термодинамических свойств воды и перегретого водяного пара (таблица П.Б.2, приложение Б).

6. Определив энтальпию, рассчитывается количество теплоты.

7. Изобразить изобарный процесс подвода теплоты в диаграммах p-v и T-s.

## Тема 5. Расчет процессов теплопроводности

*Цель:* получение практических умений и навыков при расчетах процессов теплопроводности.

*Задание по практической работе:*

**Задача 5.1.** Тепловыделяющий элемент нагревательного устройства представляет собой фарфоровую трубку с внутренним радиусом  $R_{01} = 10$  мм и толщиной стенки  $d = 2$  мм, нагреваемую внутренним токонесущим стержнем с удельным сопротивлением материала  $r = 4 \times 10^{-6}$  Ом·м.

Найти перепад температур на стенках трубки, если по стержню идет ток  $I = 100$  А. Теплопроводность фарфора  $\lambda = 1$  Вт/м·К.

**Задача 5.2.** Вычислить плотность теплового потока через оконное стекло толщиной  $\delta = 3$  мм, если температуры его поверхностей  $T_1 = 10$  °С и  $T_2 = -2$  °С. Известно, что плотность, теплоемкость и коэффициент

температуропроводности стекла при этих параметрах составляют соответственно  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_p = 0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  и  $a = 4,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Задача 5.3.** Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной 300 мм составляет  $100 \text{ Вт/м}^2$ , а разность температур ее поверхностей  $150 \text{ }^\circ\text{С}$ . Определить коэффициент температуропроводности стенки, если  $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_p = 0,88 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

**Задача 5.4.** Пространство между двумя параллельными пластинами заполнено гелием. Расстояние между пластинами  $L = 50 \text{ мм}$ . Одна пластина поддерживается при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{С}$ , другая – при температуре  $40 \text{ }^\circ\text{С}$ . Вычислить плотность потока тепла в ваттах на кв.м. при давлении  $P = 105 \text{ Па}$ .

**Задача 5.5.** Определить плотность потока тепла через плоскую стенку толщиной 37.5 см, выложенной из кирпича, если перепад температур составляет  $50 \text{ К}$ ?

**Задача 5.6.** Паропровод наружным диаметром  $d_1 = 350 \text{ мм}$  покрыт двумя слоями тепловой изоляции, имеющими одинаковую толщину  $\delta = 70 \text{ мм}$ .

Внутренний слой изоляции наружным диаметром  $d_2$  выполнен из магнезии с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2 = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Верхний слой диаметром  $d_3$  выполнен из глино-асбестовой массы с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3 = 0,31 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Температура наружной поверхности трубы  $t_1 = 500 \text{ }^\circ\text{С}$ , а внешней поверхности глино-асбестовой массы  $t_3 = 55 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Определить теплотери теплоизолированной трубы длиной 1 м и температуру  $t_2$  между слоями магнезии и глино-асбеста. Как изменятся теплотери если слои теплоизоляции поменять местами?

### Методические рекомендации

1. Определить линейную плотность теплового потока для цилиндрической стенки.
2. Определить температуру слоев.
3. Найти теплотери при перестановке слоев теплозащиты.

### Тема 6. Расчет процесса конвективного теплообмена

*Цель:* получение практических умений и навыков при расчетах процесса конвективного теплообмена.

*Задание по практической работе:*

**Задача 6.1.** Определить средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и полную теплоотдачу для плоской пластины шириной  $b = 0,5 \text{ м}$  и длиной  $l = 0,72 \text{ м}$ , обдуваемой воздухом со скоростью  $W = 30 \text{ м/с}$ , если температура пластины  $t_w = 100 \text{ }^\circ\text{С}$  и температура воздуха  $t_f = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Параметры воздуха при температуре  $20^\circ\text{С}$ : коэффициент температуропроводности  $\alpha_f = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda_f = 0,0261 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ; коэффициент кинематической вязкости  $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Задача 6.2.** Тонкая пластина длиной  $\ell_0 = 2$  м и шириной  $b = 1,5$  м обтекается продольным потоком со скоростью  $W_0 = 0,1$  м/с и температурой  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Температура поверхности пластины  $t_w = 160^\circ\text{C}$ .

Определить средний по длине коэффициент теплоотдачи и количество тепла, отдаваемое пластиной воздуху.

Определить коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней стенке трубы диаметром  $d = 17$  мм, если температура стенки  $t_c = 30^\circ\text{C}$ , а температура воды в трубе  $t_{ж} = 60^\circ\text{C}$ . Скорость воды в трубе  $w = 0,5$  м/с.

## Тема 7. Расчет процесса теплопередачи

*Цель:* получение практических умений и навыков при расчетах процесса теплопередачи.

*Задание по практической работе:*

**Задача 7.1.** В рекуперативном прямоточном теплообменнике температура греющего теплоносителя падает от  $t'_1 = 100^\circ\text{C}$  до  $t''_1 = 60^\circ\text{C}$ , а температура нагреваемой среды повышается от  $t'_2 = 20^\circ\text{C}$  до  $t''_2 = 50^\circ\text{C}$ . Расход греющего теплоносителя  $M_1 = 1,4$  кг/с, его теплоемкость  $c = 4,2$  кДж/(кг·К). Площадь поверхности теплообменника  $F = 15$  м<sup>2</sup>. Определить коэффициент теплопередачи теплообменника.

1. Записать уравнение теплового баланса теплообменного аппарата.
2. Определить разность температур.
3. Определить коэффициент теплопередачи.

**Задача 7.2.** Рассчитать процесс теплопередачи через трехслойную цилиндрическую стенку. Внутренний диаметр стенки  $d_{\text{вн}} = 20$  мм. Толщины слоев (от внутреннего к наружному)  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ . Коэффициенты теплопроводности слоев (от внутреннего к наружному):  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ . Внутренняя поверхность цилиндрической стенки омывается горячим теплоносителем с температурой  $T_{f1}$ , а наружная – холодным теплоносителем с температурой  $T_{f2}$ . Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке равен  $\alpha_1$ , а от стенки холодному теплоносителю –  $\alpha_2$ .

Определить линейную плотность теплового потока, тепловой поток (если он не задан) для стенки длиной  $l$ , коэффициент теплопередачи, температуры, указанные в таблице 5.

Изобразить график изменения температуры по толщине слоев цилиндрической стенки и в пограничных слоях (график выполнить в масштабе). Выполнить проверку расчёта. Исходные данные для расчета приведены в таблице 4. Результаты занести в таблицу 5.

Таблица 4 – Исходные данные

Толщины слоев, мм			Коэффициент теплопроводности слоев, Вт/(м·К)			Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)		Температуры, °С						Тепловой поток, Вт	Длина, м
$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$T_{\text{п}}$	$T_{\text{w1}}$	$T_{1-2}$	$T_{2-3}$	$T_{\text{w2}}$	$T_{\text{г}}$	Q	l
25	3	5	30	5	2,3	100	50				40		5		3

Таблица 5 – Результаты расчета

Линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К)	Тепловой поток, Вт	Линейная плотность теплового потока, Вт/м	Температуры, °С												
			$k_l$	Q	$q_l$	$T_{\text{п}}$	$T_{\text{w1}}$	$T_{1-2}$	$T_{2-3}$	$T_{\text{w2}}$	$T_{\text{г}}$				

### Методические указания

1. Для уменьшения вычислительной погрешности расчет термических сопротивлений выполнять с 4–6 значащими цифрами после запятой.
2. Рассчитанные значения температур округлять до десятых долей градуса.
3. Рассчитанное значение теплового потока (поверхностной плотности теплового потока, линейной плотности теплового потока) округлять до целых значений.

## 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Согласно учебному плану дисциплины «Теплофизика» направления подготовки 15.03.01 Машиностроение, студенты заочной формы обучения закрепляют изучаемый материал, самостоятельно в виде выполнения контрольной работы.

Задания охватывают основные разделы дисциплины: основы термодинамики и теплообмен, и предусматривают решение трех задач.

Вариант задания выбирается из таблиц по двум последним цифрам номера зачетной книжки.

Для облегчения решения задач приведены методические указания. Необходимые справочные данные приведены в приложениях, в справочной и учебной литературе. При выполнении контрольной работы необходимо:

- последовательно и подробно изложить решение задачи вначале в буквенных выражениях, затем в цифрах;
- привести ответы решенных задач в системе единиц измерения СИ.

### Контрольная работа

#### Задача 1

Определить массовые доли, плотности и парциальные давления газов, входящих в смесь, а также молекулярную массу, газовую постоянную и плотность смеси, состав которой задан объемными долями.

Таблица 6

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Объемные доли газов в смеси, $g_i$										
O <sub>2</sub>	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,5
H <sub>2</sub>	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,5	0,2	0,1
N <sub>2</sub>	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	0,3
CO <sub>2</sub>	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1

Таблица 7

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление смеси $p_{см}$ , Мпа	0,10	0,9	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,12	0,9
Температура смеси $T_{см}$ , К	293	303	313	273	293	323	333	253	323	343

#### Методические указания

Для решения задачи необходимо использовать справочные данные по физическим постоянным газов, составляющих смесь, которые приведены в учебной литературе и приложении Б (таблица П.Б.3). К ним относятся масса одного кмоль  $\mu$  и газовая постоянная  $R$ .

Для смесей газов с достаточной точностью применимы законы для идеальных газов, что позволяет определить требуемые по заданию физические величины по формулам, которые нетрудно получить из уравнений состояний, записанных для смеси газов и исходя из определений парциальных давлений и парциальных объемов компонентов

$$p_{см}V_{см} = m_{см}R_{см}T_{см}, \quad (1)$$

$$p_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}}, \quad (2)$$

$$p_{\text{см}} V_i = m_i R_i T_{\text{см}}, \quad (3)$$

где  $p$  – давление, Па;  $V$  – объем, м<sup>3</sup>;  $m$  – масса, кг;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К.

Индексы «см» и «i» относятся к смеси и каждому газу, входящему в смеси.

Решение задачи следует начать с нахождения газовой постоянной смеси  $R_{\text{см}}$ , расчетную формулу получения которой можно получить следующим образом.

Из уравнений (1) и (3) следует, что плотность смеси и отдельного газа, входящего в смесь, определяются выражениями:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{V_{\text{см}}} = \frac{P_{\text{см}}}{R_{\text{см}} T_{\text{см}}}. \quad (4)$$

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} = \frac{P_i}{R_i T_{\text{см}}}. \quad (5)$$

Следовательно, отношение плотности отдельного газа к плотности смеси будет равно:

$$\frac{\rho_i}{\rho_{\text{см}}} = \frac{R_{\text{см}}}{R_i}. \quad (6)$$

Тогда с учетом выражения (6) формулу для определения массовой доли отдельного газа можно представить в виде:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} = \frac{\rho_i V_i}{\rho_{\text{см}} V_{\text{см}}} = r_i \frac{\rho_i}{\rho_{\text{см}}} = r_i \frac{R_{\text{см}}}{R_i}, \quad (7)$$

где  $r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}$  – объемная доля отдельного газа, входящего в смесь.

Так как сумма массовых долей газов, входящих в смесь, равна единице

$$\sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n r_i \frac{R_{\text{см}}}{R_i} = 1, \quad (8)$$

то отсюда следует, что выражение для определения газовой постоянной смеси будет иметь вид

$$R_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}. \quad (9)$$

Определив величину  $R_{\text{см}}$  по выражению (9), можно рассчитать массовые доли компонентов газовой смеси по формуле (7).

Молекулярную массу смеси находят по величине универсальной газовой постоянной

$$\mu_{\text{см}} R_{\text{см}} = 8314,2 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Выражение для определения парциальных давлений газов, входящих в смесь, нетрудно получить, если разделить уравнение (2) на (3):

$$p_i = p_{\text{см}} \cdot r_i. \quad (10)$$

Для определения плотности смеси и ее компонентов можно воспользоваться формулами (4) и (5).

Точность решения задачи следует проверить по суммам массовых долей компонентов и давлению смеси, которые должны быть равны

$$\sum g_i = 1 \text{ и } \sum p_i = p_{\text{см}}.$$

## Задача 2

Воздух массой  $m$  при начальном абсолютном давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$  расширяется в политропном процессе до давления  $p_2$ . Показатель политропы расширения  $n$ .

Определить конечные объемы  $V_2$  и температуру  $T_2$  воздуха после расширения, количество отведенной теплоты, изменение энтропии и внутренней энергии, а также долю теплоты, идущей на совершение внешней работы. Показатель адиабаты принять  $k = 1,4$ .

Это же задание выполнить для адиабатного процесса.

Вариант задания выбрать из таблиц 8 и 9.

Таблица 8

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Масса $m$ , кг	5	8	10	13	16	20	18	12	9	7
Давление $p_1 \cdot 10^{-6}$ , Па	1,0	2,0	1,5	1,1	0,9	1,0	2,0	1,5	1,2	1,4
Давление $p_2 \cdot 10^{-6}$ , Па	0,1	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	1,0	0,5	0,3	0,2

Таблица 9

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура смеси $T_1$ , К	400	600	700	500	300	400	200	300	600	500
Показатель политропы $n$	1,20	1,30	1,15	1,40	1,00	1,50	1,25	1,35	1,45	1,25

### Методические указания

Решение задачи следует начать с определения начального объема воздуха из уравнения состояния

$$V_1 = mRT_1/p_1, \quad (11)$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха, кДЖ/(кг·К).

Конечные объем  $V_2$  и температуру воздуха после расширения  $T_2$  определяют из соотношения параметров для политропного процесса



$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (12)$$

Внешнюю работу расширения (изменения объема) определяют по выражению

$$L = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right), \quad (13)$$

а изменение внутренней энергии газа по формуле

$$\Delta u = \overline{c_V} (T_2 - T_1), \quad (14)$$

где  $\overline{C_V}$  – средняя массовая теплоемкость газа в изохорном процессе в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ , которую находят по формуле

$$\overline{c_V} = \frac{c_{VM}|_0^{t_2} t_2 - c_{VM}|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

где  $c_{VM}|_0^{t_2}$  и  $c_{VM}|_0^{t_1}$  – средние массовые теплоемкости газа в изохорном процессе в интервале температур от 0 до  $t_2$  °С и от 0 до  $t_1$  °С, которые принимают из таблиц (приложение Б, таблица П.Б.4).

Изменение энтропии рассчитывают по формуле

$$s_1 - s_2 = \overline{c_V} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (16)$$

а количество тепла и долю тепла, пошедшего на совершение внешней работы по выражениям

$$Q = m \overline{c_V} \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1), \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{Q}{L}. \quad (18)$$

Так как основные термодинамические процессы являются частными случаями политропного процесса, то все зависимости для политропного процесса применимы для других процессов с соответствующим числовым значением  $n$ . Так в адиабатном процессе  $n = k$ , что следует учесть при решении второй части задания.

### Задача 3

Определить коэффициент теплоотдачи, плотность теплового потока и тепловой поток от воды к стенке трубы диаметром  $d$  и длиной  $L$ . Скорость воды  $w$ , ее температура  $t_{ж}$ , а температура стенки  $t_{ст}$ .

Варианты задания выбрать из таблиц 10 и 11.

Таблица 10

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

<b>d, мм</b>	30	20	15	40	50	60	45	25	35	55
<b>L, м</b>	7	5	3	8	10	15	13	8	10	12
<b>w, м/с</b>	1,5	2,0	2,5	1,0	1,3	1,6	1,8	2,2	1,7	1,9

Таблица 11

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<b>t<sub>ж</sub>, °С</b>	90	100	70	60	80	50	90	60	40	70
<b>t<sub>ст</sub>, °С</b>	40	60	30	20	50	10	20	30	0	10

### Методические указания

При решении задач, связанных с определением коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при конвективном теплообмене, необходимо знать конструкцию теплообменника, температуру, теплофизические свойства, схему движения, а также режим течения среды с целью выбора расчетной формулы для вычисления критерия Нуссельта  $Nu$ , в который входит коэффициент теплоотдачи. Поэтому расчет начинают с определения режима течения среды по критерию Рейнольдса

$$Re = \frac{wl}{\nu},$$

где  $l$  – характерный линейный размер, м. Для цилиндра  $l = d$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды, зависящий от температуры и принимаемый по справочным данным (приложение Б, таблица П.Б.5), м<sup>2</sup>/с.

Так при вынужденном турбулентном режиме движения жидкости в каналах при  $Re > 10000$  коэффициент теплоотдачи определяют после вычисления критерия Нуссельта по выражению

$$Nu_{ж} = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr / Pr_{ст})^{0,25} \cdot E_L, \quad (20)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля воды при температуре воды  $t_{ж}$  (приложение Б, таблица П.А.5);  $Pr_{ст}$  – критерий Прандтля воды при температуре воды, равной температуре стенки  $t_{ст}$  (приложение Б, таблица П.А.5);  $E_L$  – коэффициент, учитывающий начальный неизотермический участок трубы,  $E_L = 1$ , при отношении длины трубы к ее диаметру  $L/d > 50$ .

Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы рассчитывается

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d}, \quad (21)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воды при температуре воды  $t_{ж}$  (приложение Б, таблица П.А.5).

Плотность теплового потока рассчитывается по выражению

$$q = \alpha(t_{ж} - t_{ст}). \quad (22)$$

Площадь поверхности трубы

$$F = \pi dL, \quad (23)$$

где  $L$  – длина трубы.

Тепловой поток от воды к стенке трубы

$$Q = q \cdot F. \quad (24)$$

Работа должна быть выполнена на листах формата А4 с одной стороны листа, в печатном варианте. Шрифт текстовой части размер – 12 (для заголовков – 14), вид шрифта - Times New Roman, интервал 1,5. Поля страницы: левое 3 см, правое 1,5 см, верхнее и нижнее 2 см. Нумерация страниц внизу справа.

*Структура контрольной работы:*

- титульный лист (приложение В)
- содержание
- решение задач

Контрольная работа должна быть оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам:

- текст должен быть отпечатан на компьютере;
- основной текст подразделяется на озаглавленные части в соответствии с содержанием работы. Заглавия не подчеркиваются, в конце заголовка точка не ставится, переносы допускаются;
- страницы текста пронумерованы арабскими цифрами в правом верхнем углу без точек. Титульный лист считается первым и не нумеруется;
- на каждой странице оставлены поля для замечаний рецензента;

Стиль и язык изложения материала контрольной работы должны быть четкими, ясными и грамотными. Грамматические и синтаксические ошибки недопустимы. Выполненная контрольная работа представляется для регистрации на кафедру, затем поступает на рецензирование преподавателю.

Положительная оценка («зачтено») выставляется в зависимости от полноты и правильности решения задач, объема предоставленного материала в контрольной работе, а также степени его усвоения, которая выявляется при ее защите (умение использовать при ответе на вопросы научную терминологию, лингвистически и логически правильно отвечать на вопросы). Студент, получивший контрольную работу с оценкой «зачтено», знакомится с рецензией и с учетом замечаний преподавателя дорабатывает отдельные вопросы с целью углубления своих знаний.

Контрольная работа с оценкой «не зачтено» возвращается студенту с рецензией, выполняется студентом вновь и сдается вместе с не зачтенной работой на проверку преподавателю. Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, возвращается без проверки и зачета.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко, В. П. Теплопередача: учеб. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1981. – 417 с.
2. Кузовлев, В. А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи / В. А. Кузовлев. – Москва: Высшая школа, 1983.
3. Курс физики: в 2-х т.: учеб. / под ред. В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург: Лань, 2008. – Т. 1. – 572 с.
4. Луканин, В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер. – Москва: Высшая школа, 1999.
5. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва: Высшая школа, 1969. – 560 с.
6. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика / В. В. Нащокин. – Москва: Высшая школа, 1980.
7. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – 3-е изд. – Санкт-Петербург: Химия, 1991.
8. Савельев, И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург: Лань, 2008. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 10-е изд., стер. – 432 с.
9. Селин, В. В. Теплотехника / В. В. Селин. – Калининград: Кн. изд-во, 2001. – 383 с.
10. Телеснин, Р. В. Молекулярная физика: учеб. пособие / Р. В. Телеснин. – изд. 3-е, стер. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2009. – 360 с.
11. Теплофизические измерения: учеб. пособие / Е. С. Платунов [и др.]. – Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.
12. Швыдкий, В. С. Математические методы теплофизики: учеб. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев, В. С. Шаврин. – Москва: Теплотехник, 2005. – 230 с.
13. Шпильрайн, Э. Э. Основы теории теплофизических свойств веществ: учеб. пособие / Э. Э. Шпильрайн, П. М. Кессельман. – Москва: Энергия, 1977. – 247 с.

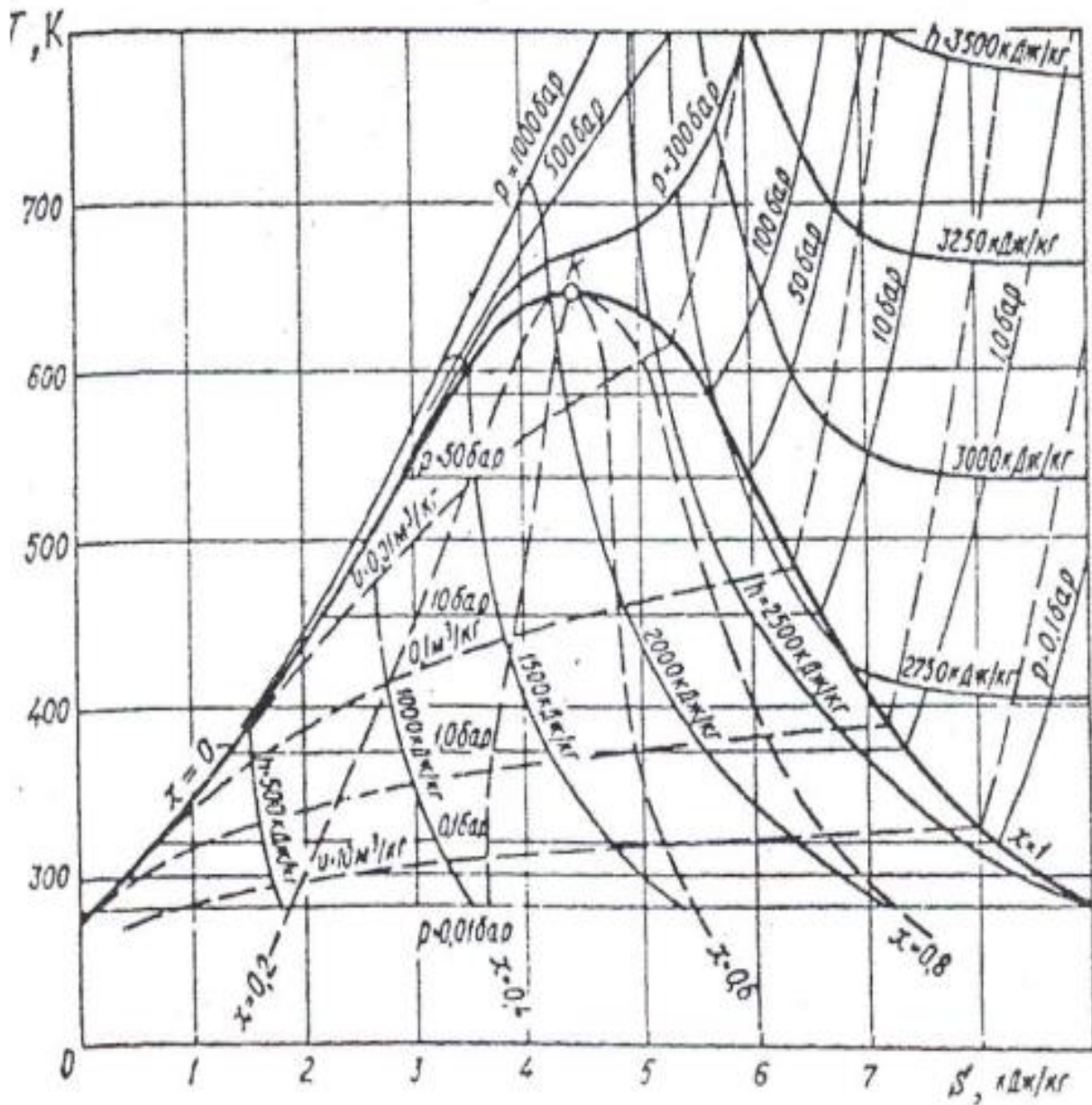


Рисунок П.А.1 – Термодинамическая диаграмма T-s водяного пара

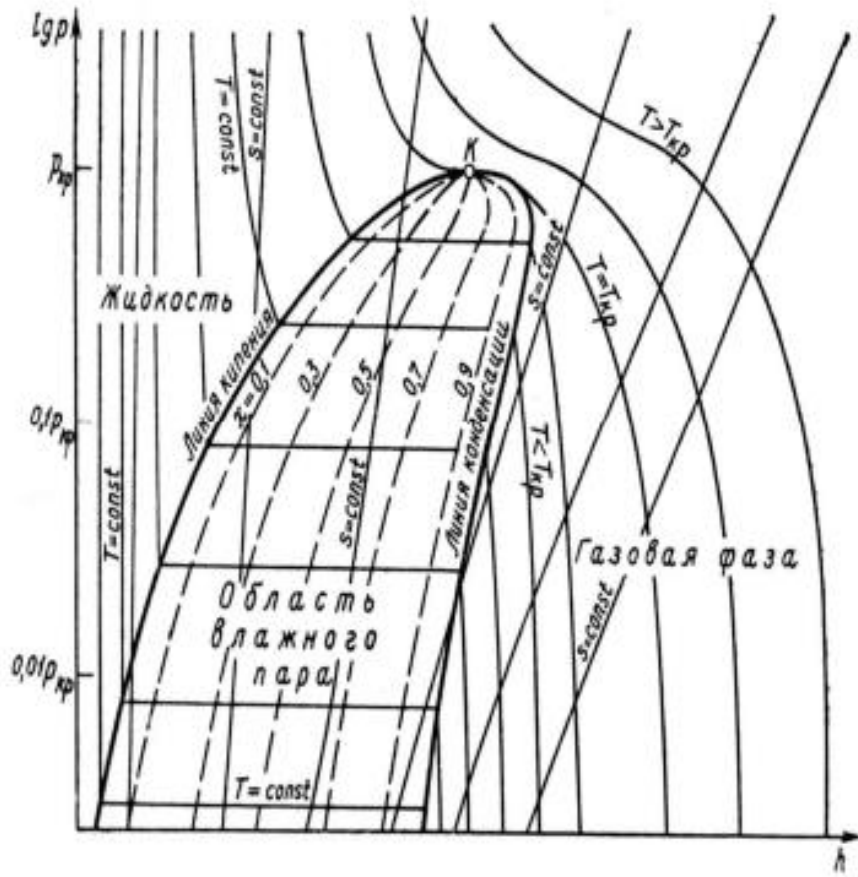


Рисунок П.А.2 – Диаграмма  $\lg p$ - $h$  реального газа

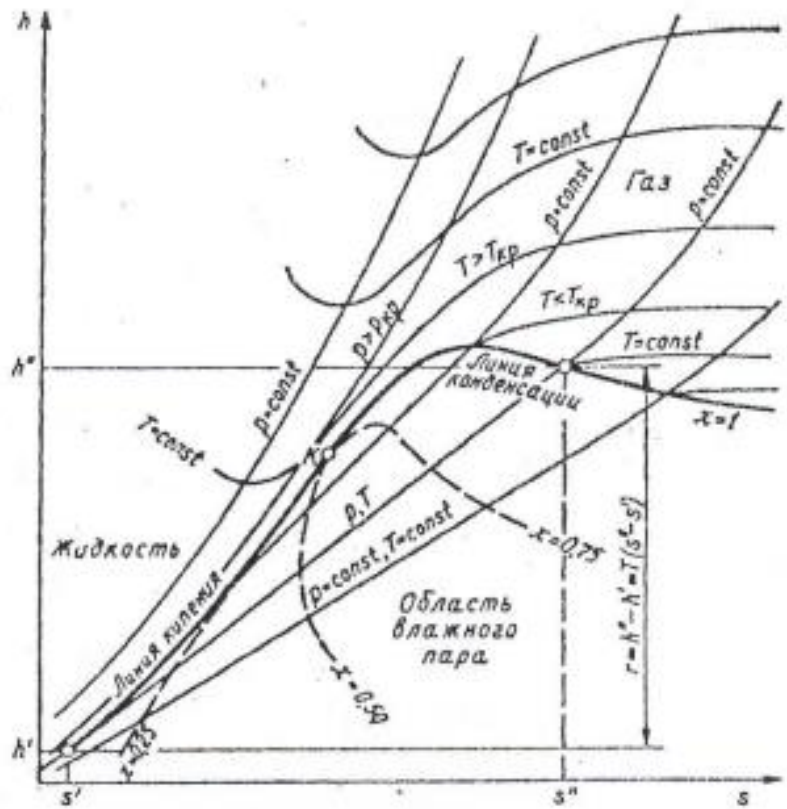


Рисунок П.А.3 – Диаграмма  $h$ - $s$  реального газа

Таблица П.Б.1 – Реальные газы

Параметры	Ненасыщенная жидкость	Насыщенная жидкость	Влажный насыщенный пар	Сухой насыщенный пар	Перегретый пар
Температура	$t < t_n$	$t_n$	$t_n$	$t_n$	$t > t_n$
Давление	$p$	$p_n$	$p_n$	$p_n$	$p$
Удельный объем	$v$	$v'$	$v_x = v' + x(v'' - v')$	$v''$	$v$
Удельная энтальпия	$h$	$h'$	$h_x = h' + x(h'' - h')$	$h'' = h' + r$	$h = h'' + c_p(t - t_n)$
Удельная энтропия	$s$	$s'$	$s_x = s' + (x r) / T_n$	$s'' = s' + r / T_n$	$s = s'' + c_p \ln(T / T_n)$
Степень сухости	–	0	$0 < x < 1$	1	–
Расположение в диаграммах	Слева от нижней пограничной кривой	Нижняя пограничная кривая	Область между пограничными кривыми	Верхняя пограничная кривая	Справа от верхней пограничной кривой

Таблица П.Б.2 – Термодинамические процессы реальных газов

Характеристика процесса	Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ )	Изохорный процесс ( $v = \text{const}$ )	Адиабатный процесс ( $q = 0, dq = 0$ )	Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ )
Удельная теплота	$q = h_2 - h_1$	$q = \Delta u + l$	$q = 0$	$q = T(s_2 - s_1)$
Изменение удельной внутренней энергии	$\Delta u = (h_2 - p v_2) - (h_1 - p v_1) = u_2 - u_1$	$\Delta u = (h_2 - p_2 v) - (h_1 - p_1 v) = u_2 - u_1$	$\Delta u = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = u_2 - u_1$	$\Delta u = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = u_2 - u_1$
Удельная работа	$l = q - \Delta u = p(v_2 - v_1)$	$l = \int_1^2 p dv = 0$	$l = q - \Delta u = -\Delta u = u_1 - u_2$	$l = q - \Delta u$

Таблица П.Б.3 – Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Масса одного кмоль, $\mu$ , кг/моль	Газовая постоянная R, Дж/(кг·К)	Плотность при нормальных физических условиях, кг/м <sup>3</sup>
Кислород	O <sub>2</sub>	32	289,82	1,429
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	4124,68	0,090
Азот	N <sub>2</sub>	28,02	296,75	1,250
Оксид углерода	CO	28	297,04	1,250
Воздух	-	28,96	287,04	1,293
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44	198,07	1,977
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	461,60	0,0804
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,031	488,37	0,771

Таблица П.Б.4 – Средняя массовая теплоемкость воздуха при постоянном объеме

t, °C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$c_{vm}$ , Дж/(кг·К)	0,7164	0,7193	0,7243	0,7319	0,7415	0,7519	0,7624	0,7733	0,7842	0,7942	0,8039

Таблица П.Б.5 – Теплофизические характеристики воды на линии насыщения

T, К	Абсолютное давление $p \cdot 10^{-2}$ , Па	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(мК)	Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Критерий Pr
273	6,1	0,551	1,789	13,67
283	12,3	0,575	1,306	9,52
293	23,4	0,599	1,006	7,02
303	42,4	0,618	0,805	5,42
313	73,8	0,634	0,659	4,31
323	123,4	0,648	0,556	3,54
333	199,2	0,659	0,478	2,98
343	311,7	0,668	0,415	2,55
353	473,6	0,675	0,365	2,21
363	701,1	0,680	0,326	1,95
373	1013,2	0,683	0,295	1,75



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт агроинженерии и пищевых систем  
Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Контрольная работа  
допущена к защите:  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Контрольная работа  
защищена  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Контрольная работа № \_\_\_\_\_

по дисциплине  
«ТЕПЛОФИЗИКА»

Шифр студента \_\_\_\_\_  
Вариант № \_\_\_\_\_

Работу выполнил:  
студент гр. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Калининград - 20\_\_

Локальный электронный методический материал

Мария Вячеславовна Хохлова

## ТЕПЛОФИЗИКА

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 3,1. Печ. л. 2,6

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1