

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА**

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ПИ  
Артамонов Д.В.  
« 9 » 2015 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.2.6 Теплотехника**

Направление подготовки 15.03.01 «Машиностроение»

Профиль подготовки «Оборудование и технология сварочного производства»

Квалификация (степень) выпускника – бакалавр

Форма обучения заочная

Пенза, 2015

## 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Теплотехника» является расширение и углубление общекультурных компетенций:

*ОПК-4: «умением применять основные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых машиностроительных технологий, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности людей и их защиту от возможных последствий, аварий, катастроф и стихийных бедствий; умением применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов в машиностроении»;*

*ПК-10: «умением применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности, проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению».*

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП бакалавриата

ОПОП 15.03.01 «Машиностроение» профиль «Машины и технология литейного производства». Учебная дисциплина относится к вариативной части дисциплин Б 1.2.7 и обеспечивает теоретическую подготовку выпускников в выполнении задач профессиональной, научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- **знать** основные методы расчета тепломассопереноса при движении газов в различных каналах, передачи теплоты (конвекцией, теплопроводностью, излучением) через непрозрачные стенки, в замкнутом объеме и т.п.;

- **уметь** использовать аппарат математического анализа законов термодинамики для расчета тепловых процессов, происходящих в ванне жидкого металла;

- **иметь** представление об основных законах термодинамики, законах переноса теплоты и массы, методах исследования теплофизических процессов;

Данная дисциплина находится в логической и взаимосвязи с дисциплинами (в том числе преподаваемых на других кафедрах), участвующих в формировании данных компетенций: Б1.1.9 Математика, Б1.1.10 Физика, Б1.1.11 Химия; Б1.1.12 Информатика и информационные технологии; Б1.1.2 Философия.

Теоретические дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: Механика жидкости и газа; Коррозия и защита металлов от коррозии; Научно-исследовательская работа.

## 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины Теплотехника

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению:

Коды компетенции	Наименование компетенции	Структурные элементы компетенции (в результате освоения дисциплины обучающийся должен знать, уметь, владеть)
1	2	3
ОПК-4	<i>умением применять основные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых машиностроительных технологий, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности людей и их защиту от возможных последствий, аварий, катастроф и стихийных бедствий; умением применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов в машиностроении</i>	<p>Знать: основные законы термодинамики, законы переноса теплоты и массы, методы разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых машиностроительных технологий теплофизических процессов.</p> <p>Уметь: использовать аппарат математического анализа основных законов термодинамики для расчета теплофизических процессов, умением</p>

		<p>применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов в машиностроении.</p> <p>Владеть: навыками по расчетам термодинамических процессов; техникой высокотемпературного металлургического эксперимента.</p>
ПК-10	<p><i>Умение применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности, проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению</i></p>	<p>Знать: методы контроля и исследования тепловых двигателей.</p> <p>Уметь: авизировать влияние термодинамических закономерностей на технологические процессы машиностроения.</p> <p>Владеть: навыком применения феноменологического и статистического методов термодинамики для улучшения технологических процессов машиностроения.</p>

#### 4. Структура и содержание дисциплины Теплотехника

##### 4.1. Структура дисциплины (заочная ф.о.)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 часов.

№ п/п	Наименование разделов и тем дисциплины (модуля)	Семестр	Недели семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)									Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)										
				Аудиторная работа				Самостоятельная работа					Собеседование	Коллоквиум	Проверка тестов	Проверка контролльн. работ	Проверка реферата	Проверка эссе и иных творческих работ	курсовая работа (проект)	Контрольная работа			
				Всего	Лекция	Практические занятия	Лабораторные занятия	Всего	Подготовка к аудиторным занятиям	Реферат, эссе и др.	Курсовая работа (проект)	Подготовка к экзамену											
1.	Раздел 1. Основные понятия и определения в термодинамике	6			1	1		7														+	
1.1.	Предмет «термодинамика». Формы энергии и способы ее взаимопревращения. Термодинамическая система и ее состояние.																						
1.2.	Термодинамические процессы и их основные координаты																						
2.	Раздел 2. Основные законы (начала) термодинамики.	6			1	1		7															+
2.1.	Основные положения первого закона термодинамики. Второй закон термодинамики.																						

	Третий закон термодинамики.																		
2.2.	Энтальпия. Теплоемкость																		
3.	Раздел 3. Работа тепловой машины	6		0,5	1		7												+
3.1.	Эффективность работы тепловой и холодильной машины.																		
3.2.	Термодинамические циклы. Цикл Карно.																		
4	Раздел. 4 Смеси и растворы	6		0,5	1		7				2								+
4.1	Идеальные газовые смеси и их параметры состояния.																		
4.2	Реальные газовые смеси.																		
4.3	Жидкие и твердые растворы. Термодинамическое их состояние.																		
5	Раздел 5. Основные понятия нелинейной термодинамики	6		0,5	1		7												+
5.1	Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика) Открытые системы																		
5.2	Термодинамические процессы и временный фактор.																		
6	Раздел 6. Теплообмен в термодинамических системах	6		0,5	0,5		7				1								+
6.1	Основные формы теплообмена. Стационарное и нестационарное температурное поле.																		
6.2	Теплопроводность в термодинамических системах			0,5	0,5		7												
6.3	Теплообмен конвекцией																		
6.4	Теплообмен излучением																		

7	Раздел 7. Массоперенос в термодинамических системах	6			0,5	1		9					3							+
7.1	Основные законы и положения массопереноса в системах.																			
7.2	Диффузия в сплошных и пористых телах																			
	<i>Подготовка к зачету</i>												40							
	Общая трудоемкость, в часах			108	4	6		58					40	Промежуточная аттестация						
														Форма	Семестр					
														Зачет	6					
														Экзамен						

## **4.2. Содержание дисциплины**

*Раздел № 1. Основные понятия и определения в термодинамике*

Предмет «термодинамика». Формы энергии и способы ее взаимопревращения.

Термодинамическая система и ее состояние.

Термодинамические процессы и их основные координаты.

*Раздел № 2. Основные законы (начала) термодинамики*

Основные положения первого закона термодинамики.

Второй закон термодинамики.

Третий закон термодинамики.

*Раздел № 3. Работа тепловой машины*

Эффективность работы машины. Цикл Карно

*Раздел № 4. Смеси и растворы.*

Идеальные газовые смеси и их параметры состояния.

Реальные газовые смеси.

Жидкие и твердые растворы. Термодинамическое их состояние.

*Раздел № 5. Основные понятия нелинейной термодинамики*

Термодинамические процессы и временный фактор.

*Раздел № 6. Теплообмен в термодинамических системах*

Основные формы теплообмена. Стационарное и нестационарное температурное поле.

Теплопроводность в термодинамических системах.

Теплообмен конвекцией.

Теплообмен излучением.

*Раздел № 7. Массоперенос в термодинамических системах.*

Основные законы и положения массопереноса в системах.

Диффузия в сплошных и пористых телах.

Практические занятия

1. Определение и расчет основных параметров состояния веществ в термодинамических системах
2. Определение и расчет тепловой энергии системы при различных термодинамических процессах.
3. Определение и расчет изменения энтропии системы при термодинамических процессах.
4. Определение и расчет основных параметров состояния газовых смесей и различных растворов.
5. Определение и расчет передачи тепловой энергии через многослойные сплошные стенки.

## **5. Образовательные технологии**

1. классическое лекционное обучение 2. обучение с помощью аудиовизуальных технических средств; 3. обучение с помощью учебной книги, 4. компьютерное обучение; 5. «программное обучение», для которого есть заранее составленная программа 6. по целям обучения;

*Занятия, проводимые в интерактивных формах, с использованием интерактивных технологий составляют 20% аудиторных занятий (не менее, чем определено требованиями ФГОС).*

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.**

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

### 6.1. План самостоятельной работы студентов

№ п/п	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов /з
1,2	Определение и расчет основных параметров состояния веществ в термодинамических системах	Работа с литературой	Изучение физической сущности параметров состояния, единиц измерения параметров состояния, их связь; приобретение навыков расчета основных параметров состояния веществ в термодинамических системах.	<a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a>	3
3,4	Химическая термодинамика	Подготовка к тесту	Тест	Михатулин Д.С., Чирков А.Ю. Конспект лекций по тепломассообмену PDF. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.	1,5
5,6	Основные законы (начала) термодинамики	Подготовка к контрольной работе	Вопросы	А.Н. Уханов, Ю.В. Гуськов, А.Н. Морунков, В.В. Сенькин, Техническая термодинамика и основы теплообмена. – Пенза: РИО ПСХА, 2004-212 с.	1,5
5,6	Работа тепловой машины	Работа с литературой	Вопросы	1. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a> 2. Конспект лекций	3
7	Идеальный газ	литературой	Изучить свойства идеальных газов и как устанавливаются условия идеальных газов	1. Воронин Г.Ф. Основы термодинамики. – М: Изд-во Моск. Ун-та, 1987. 2. Базаров И.П. Термодинамика. - высшая школа, 1991.	1,5



8	Смеси и растворы	Подготовка к контрольной работе	Вопросы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Жуховицкий А.А., Шварцман А.А. Физическая химия: Учебник для вузов – М.: Металлургия, 1976. – 543с. (раздел Термодинамика) (Б. – 30 экз.)</li> <li>2. Теплотехника: Учебник для вузов/ под общ.ред. В.И. Крутова – М.: Машиностроение, 1986. - 432с. (Б. – 15 экз.)</li> <li>3. БАХМАТ Г. В., КАБЕС Е. Н. ТЕПЛОТЕХНИКА: Учебно-методический комплекс/ под общ.ред. В.К. Бородина- Тюмень Издательство «Нефтегазовый университет», 2001.- 152с.</li> </ol>	1,5
10, 11	Основные понятия нелинейной термодинамики	Работа с литературой	Вопросы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a></li> <li>2. Конспект лекций</li> </ol>	3
12	Теплопроводность	Работа с литературой	Рассматривая теплопроводность элементарных тел уметь применить закон Фурье для каждого случая, т. е. вывести уравнения, определяющие закон распределения температур по толщине стенки и количество теплоты, передаваемой через стенку.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Теплотехника: Учебник для вузов/ под общ.ред. В.И. Крутова – М.: Машиностроение, 1986. - 432с. (Б. – 15 экз.) БАХМАТ Г. В., КАБЕС Е. Н. ТЕПЛОТЕХНИКА: Учебно-методический комплекс/ под общ.ред. В.К. Бородина- Тюмень Издательство «Нефтегазовый университет», 2001.- 152с.</li> <li>2. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a></li> <li>3. Конспект лекций</li> </ol>	1

13	Конвективный теплообмен	Работа с литературой	Изучить термодинамические основы конвективного теплообмена; факторы, влияющие на конвективный теплообмен; уравнения теплообмена.	1. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a> 2. Конспект лекций	1
14	Теплообмен излучением (Радиацией)	Подготовка к тесту	Тест	1. Теплотехника: Учебник для вузов/ под общ.ред. В.И. Крутова – М.: Машиностроение, 1986. - 432с. (Б. – 15 экз.) БАХМАТ Г. В., КАБЕС Е. Н. ТЕПЛОТЕХНИКА: Учебно-методический комплекс/ под общ.ред. В.К. Бородина- Тюмень Издательство «Нефтегазовый университет», 2001.- 152с. 3. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a> 4. Конспект лекций	1
15, 16	Массоперенос в термодинамических системах	Работа с литературой	Вопросы	4. <a href="http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm">http://alexandr4784.narod.ru/putilov.htm</a> 2. Конспект лекций	3

## 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

### 6.2.1. Основные понятия и определения в термодинамике

Предмет технической термодинамики и ее методы. Теплота и работа как формы передачи энергии. Рабочее тело. Термодинамическая система. Основные параметры состояния. Равновесное и неравновесное состояние. Уравнение состояния. Термическое уравнение состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы. Обратимые и необратимые процессы. Изображение обратимых процессов в термодинамических диаграммах. Круговой процесс (цикл).

Газовые смеси, способы задания газовых смесей, соотношение между массовыми и объемными долями, вычисления параметров состояния смеси, определение кажущейся

молекулярной массы и газовой постоянной смеси, определение парциальных давлений.

#### **Методические указания:**

материалы этой темы, по существу, представляют собой необходимый комплекс определений и понятий, на базе которых излагаются последующие темы. Поэтому студент должен четко усвоить эти понятия и определения.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Что понимается под термодинамической системой? 2. Каким числом независимых параметров характеризуется состояние рабочего тела? 3. Какое состояние называется равновесным и какое — неравновесным? 4. Что называется термодинамическим процессом? 5. Какие процессы называются равновесными и какие неравновесными? 6. Какие процессы называются обратимыми и какие необратимыми? 7. Каковы условия обратимости процессов?

### **6.2.2. Основные законы термодинамики**

#### **6.2.2.1. Первый закон термодинамики**

Сущность первого закона термодинамики. Формулировки первого закона термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики, принцип эквивалентности теплоты и работы. Выражение теплоты и работы через термодинамические параметры состояния. Внутренняя энергия. Энтальпия. Энтропия. Первый закон термодинамики для круговых (циклических) процессов. Теплоемкость. Массовая объемная и мольная теплоемкости. Теплоемкость при постоянных давлении и объеме. Зависимость теплоемкости от температуры. Средняя и истинная теплоемкости. Формулы и таблицы для определения теплоемкостей. Теплоемкость смеси идеальных газов.

#### **Методические указания.**

Изучая эту тему, студент должен обратить внимание на принципиальное различие между внутренней энергией как функцией состояния газа и теплотой и работой как функциями процесса. Надо твердо усвоить, что если внутренняя энергия вполне определена для каждого заданного состояния газа, то работа и теплота вообще не существуют для отдельного состояния, а появляются лишь при наличии процесса (изменения состояния) и, естественно, зависят от характера этого процесса.

**Вопросы для самопроверки:** 1. Дайте формулировку и аналитическое выражение первого закона термодинамики. 2. Что такое «функция состояния» и «функция процесса»? Приведите примеры этих функций. 3. Когда теплота, работа и изменение внутренней энергии считаются положительными и когда отрицательными? 4. Почему внутренняя энергия и энтальпия идеального газа зависят только от одного параметра — температуры? 5. В чем отличие понятий «истинная теплоемкость» и «средняя теплоемкость»?

#### **6.2.2.2. Второй закон термодинамики**

Сущность второго закона термодинамики. Основные формулировки второго закона термодинамики. Термодинамические циклы тепловых машин. Прямые и обратные циклы. Термодинамический к.п.д. и холодильный коэффициент. Цикл Карно и его свойства. Термодинамическая шкала температур. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии в необратимых процессах. Статистическое толкование второго закона термодинамики. Философское толкование второго закона термодинамики. Изменение энтропии изолированной термодинамической системы. Понятие об эксергии.

#### **Методические указания.**

При изучении этой темы студент должен твердо усвоить следующие вопросы.

1. Так как к.п.д. ( $\eta_t$ ) цикла Карно всегда меньше единицы, не зависит от рода

рабочего тела и имеет наибольшее значение по сравнению с  $\eta_t$  любых других циклов, ограниченных тем же интервалом температур, то: а) никакими новыми конструкциями тепловых двигателей или применением новых рабочих тел нельзя в цикле всю подведенную теплоту превратить в полезную работу; б) для увеличения  $\eta_t$  нужно стремиться к таким процессам, образующим цикл, чтобы средняя температура подвода теплоты была как можно больше, а средняя температура отвода теплоты как можно меньше.

2. Нельзя смешивать понятия «энтропия тела» и «энтропия системы». Между этими понятиями существует принципиальная разница. Энтропия как функция состояния определенного тела (например, газа или пара) обладает вполне определенным свойством — изменение ее при протекании какого-либо процесса не зависит от характера процесса, а зависит лишь от параметров тела в начальном и конечном состояниях его. Поэтому

изменение ее  $\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}$  может быть положительным, отрицательным или равным

нулю в зависимости от того, подводится или отводится теплота от тела или процесс происходит без теплообмена. Энтропия не является функцией состояния системы, состоящей из нескольких тел (рабочее тело, холодильники и источники теплоты), каждое из которых характеризуется своими параметрами. Поэтому на изменение энтропии системы влияет характер процесса теплообмена между рабочим телом и источниками теплоты. При протекании обратимых процессов энтропия системы остается постоянной; при необратимых процессах энтропия системы растет.

3. Теория Клаузиуса «тепловой смерти» Вселенной несостоятельна. Для этого можно привести следующие доводы: а) дифференциальные соотношения термодинамики несправедливы для микромира, в котором расстояния между частицами материи сравнимы с дифференциалом исследуемого объекта; б) решение дифференциальных уравнений в значительной мере зависит от конкретных условий на границе исследуемой области, но на границе бесконечной Вселенной эти условия неизвестны; в) в изложении Больцмана второй закон имеет статистическое толкование, т. е. не является абсолютным законом природы; г) экспериментальные данные (броуновского движения, новые данные астрономии, космических полетов и др.) также не согласуются с «теорией» Клаузиуса.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Какой цикл называется прямым и какой обратным? 2. Чем оценивается эффективность прямого и обратного циклов? 3. Для чего служат тепловые машины, работающие по прямому и обратному циклам? 4. Как связано изменение энтропии с теплотой и абсолютной температурой? 5. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите его основные формулировки. 6. Покажите с помощью  $Ts$ -диаграммы, что при заданных  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$   $\eta_t$  цикла Карно будет наибольшим по сравнению с  $\eta_t$  других циклов. 7. Покажите с помощью  $Ts$ -диаграммы, что  $\eta_t$  цикла Карно не может быть равным единице. 8. Как с помощью выражения  $ds = dq/T$  показать, что в круговом процессе не вся подведенная теплота превращается в полезную работу, а часть ее отдается холодильнику? 9. Покажите, в чем состоит общность различных формулировок второго закона термодинамики.

### 6.2.2.3. Термодинамические процессы

Классификация процессов изменения состояния. Общие методы исследования процессов изменения состояния любых рабочих тел.

Политропные процессы. Уравнение политропы. Определение показателя политропы. Анализ процессов на основе сравнения показателей политропы. Процессы в координатах  $pV$  и  $Ts$ . Основные термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный — частные случаи политропного процесса.

Термодинамические процессы в реальных газах и парах. Свойства реальных газов.

Фазовые равновесия и фазовые переходы. Теплота фазовых переходов. Фазовые диаграммы. Тройная и критическая точки. Уравнение состояния реальных газов. Коэффициент сжимаемости. Пары. Основные определения. Процессы парообразования в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Водяной пар. Термодинамические таблицы воды и водяного пара.  $p\nu$ ,  $Ts$ ,  $hs$ -диаграммы водяного пара. Расчет термодинамических процессов водяного пара с помощью таблиц и  $hs(is)$ -диаграммы.

#### Методические указания.

Приступая к изучению этой темы, студент должен четко уяснить себе, что расчетные формулы, применявшиеся при изучении идеального газа, здесь, как правило, недействительны. Например, для идеального газа в процессе  $T = const$  изменение внутренней энергии его равнялось нулю, а для пара при  $T = const$  не равно нулю. Линии, изображающие основные термодинамические процессы в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах, в общем случае различны для газа и пара. При расчете паров мы не имеем такого простого и точного уравнения состояния, как для идеального газа. Поэтому процессы и циклы с паром рассчитываются с помощью таблиц и  $hs$ -диаграммы.

При рассмотрении отдельных видов уравнения состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса, уравнение Вукаловича — Новикова и др.) необходимо ясно представлять, на каком физическом фундаменте строились эти уравнения и как из них получить уравнение состояния идеального газа.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Как называется процесс, в котором вся подведенная теплота идет на увеличение внутренней энергии? 2. Как называется процесс, в котором вся подведенная теплота идет на совершение работы? 3. Как называется процесс, в котором работа совершается лишь за счет уменьшения внутренней энергии? 4. Как называется процесс, в котором подведенная к рабочему телу теплота численно равна изменению энтальпии? Какая доля подведенной теплоты в этом случае идет на совершение работы? 5. Какой процесс называется политропным? 6. Покажите в  $p\nu$ -диаграмме работу газа в адиабатном процессе. 7. Можно ли уравнение  $n \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$  при

$n \neq const$  назвать дифференциальным уравнением политропы идеального газа? 8. При каких значениях показателя политропы  $n$  можно получить уравнения основных термодинамических процессов? В чем состоит обобщающее значение политропного процесса? 9. Изобразите схематично в  $Ts$ -диаграмме процесс сжатия  $p\nu_{1,2} = const$  и покажите, какими площадками будут изображаться  $q$ ,  $\Delta u$ ,  $l$ . 10. Почему в  $Ts$ -диаграмме изохора идет круче, чем изобара, а в  $p\nu$ -диаграмме адиабата идет круче изотермы? 11. Как в  $Ts$ -диаграмме по заданной кривой процесса определить знак  $q$  и  $\Delta u$ ? 12. Что такое испарение и кипение? 13. Какой пар называется сухим насыщенным? 14. Каков физический смысл пограничных кривых? Какой пар называется перегретым и что такое степень перегрева? 15. Какой пар называется влажным насыщенным и что такое степень сухости? 16. Как определить удельный объем, энтальпию, энтропию влажного пара? 17. Как изменяется теплота парообразования с увеличением давления? 18. Чем характерна критическая точка? 19. Какими параметрами можно охарактеризовать состояние влажного, сухого и перегретого пара? 20. Изобразите  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммы водяного пара и покажите в них характерные области и линии фазовых переходов. 21. Изобразите основные термодинамические процессы с паром в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Приведите формулы для определения работы, теплоты,  $\Delta u$ .

### 6.2.3. Работа тепловой машины

#### 6.2.3.1. Термодинамический анализ процессов в компрессорах

Поршневой компрессор. Принцип действия. Работа, затрачиваемая на привод компрессора. Индикаторная диаграмма. Изотермическое, адиабатное и политропное

сжатие. Термодинамическое обоснование многоступенчатого сжатия. Изображение в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах термодинамических процессов, протекающих в компрессорах. Необратимое сжатие. Относительный внутренний к.п.д. компрессора. Понятие о центробежном компрессоре.

#### **Методические указания.**

При изучении поршневых компрессоров студент должен уяснить два важных положения: а) причины применения многоступенчатых компрессоров и б) целесообразность применения промежуточного охлаждения, а также охлаждения самих цилиндров компрессоров.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Как зависит работа привода компрессора от показателя политропы сжатия? Какова связь между работой привода (технической) и работой процесса сжатия? 2. Можно ли в одноступенчатом поршневом компрессоре получить любое конечное давление, и если нельзя, то по каким причинам? 3. Как влияет вредное пространство на производительность компрессора? 4. Как влияет показатель политропы сжатия на конечную температуру газа в одноступенчатом компрессоре? 5. В каком из поршневых компрессоров (быстроходном или тихоходном) показатель политропы сжатия будет больше?

### **6.2.3.2 Циклы двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок**

Циклы двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных установок. Цикл газотурбинной установки с использованием теплоты реакций химических процессов. Анализ циклов. Изображение циклов в диаграммах  $pV$  и  $Ts$ . Термический к.п.д. цикла теплового двигателя. Внутренний относительный к.п.д. и внутренний абсолютный к.п.д. цикла. Методы повышения к.п.д. Эксергетический метод анализа циклов.

#### **Методические указания.**

При изучении идеальных циклов газовых двигателей нужно обратить внимание на следующее: 1. В связи с тем, что технические процессы, протекающие с большими скоростями, можно в первом приближении считать адиабатными, процессы расширения и сжатия в любых газовых двигателях (поршневых и газотурбинных) можно принимать адиабатными. 2. Принципиальное отличие циклов газотурбинных установок от циклов поршневых двигателей заключается лишь в процессе отвода теплоты. В газотурбинных установках осуществляется полное расширение газов до давления окружающей среды, поэтому процесс отвода теплоты принимается изобарным. В поршневых двигателях газы выбрасываются из цилиндра с давлением, в 2—4 раза большим атмосферного. Поэтому процесс отвода теплоты принимается изохорным. 3. Процесс подвода теплоты не характеризует принадлежность рассматриваемого теплового двигателя к той или иной группе (как для газотурбинного, так и для поршневого он может быть и изохорным и изобарным). 4. Термический к.п.д. любого цикла растет с увеличением степени сжатия.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Какой цикл называется идеальным? 2. Почему процессы сжатия или расширения во всех идеальных циклах тепловых двигателей принимаются адиабатными? 3. Можно ли по характеру процесса подвода теплоты узнать, какой цикл рассматривается (поршневой или газотурбинный двигатель)? 4. Циклы каких двигателей характеризует изохорный отвод теплоты и почему? 5. С ростом какого параметра увеличивается термический КПД любого цикла? 6. Чем ограничивается степень сжатия у различных типов поршневых двигателей? 7. Чем ограничивается и как выбирается степень повышения давления у газотурбинных двигателей?

### **6.2.3.3 Циклы паросиловых установок**

Принципиальная схема паросиловой установки. Цикл Ренкина и его исследование.

Влияние начальных и конечных параметров на термический к.п.д. цикла Ренкина. Изображение цикла в  $p\nu$ -,  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах. Пути повышения экономичности паросиловых установок, теплофикационный цикл. Бинарный и парогазовый циклы. Понятие о циклах атомных силовых установок.

#### **Методические указания.**

Рассматривая циклы паросиловых установок, следует обратить внимание на вопросы: а) почему для пара цикл Карно не применяется, хотя изотермические процессы с влажным паром осуществляются достаточно просто? б) каковы преимущества цикла Ренкина перед циклом Карно? в) каковы способы повышения экономичности паросиловой установки?

**Вопросы для самопроверки.** 1. Как изображается работа насоса в  $p\nu$ -диаграмме для цикла Ренкина и цикла Карно? 2. От каких параметров и как зависит  $\eta_t$  цикла Ренкина? 3. Как меняется степень сухости пара за турбиной при увеличении давления пара перед турбиной при постоянной начальной температуре? В чем вред работы турбины на паре с большой степенью влажности? 4. Как влияет начальная температура перегретого пара на степень сухости его при выходе из турбины? 5. Для чего применяется вторичный перегрев пара? 6. Что дает и как осуществляется регенеративный подогрев питательной воды? 7. Что дает применение парогазовых циклов? 8. Как влияет на к.п.д. цикла Ренкина и степень сухости пара за турбиной процесс дросселирования перед турбиной?

#### **6.2.3.4 Циклы холодильных машин, теплового насоса (обратные термодинамические циклы)**

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

При изучении циклов различных холодильных установок следует обратить внимание на то, что как для тепловых двигателей, так и для холодильных машин эталоном является цикл Карно. Термический к.п.д. цикла Карно определяется формулой  $\eta_t = 1 - T_{\text{мин}}/T_{\text{макс}}$ , где  $T_{\text{мин}}$  — температура холодильника (она же — минимальная температура термодинамической системы);  $T_{\text{макс}}$  — температура горячего источника (она же — максимальная температура системы). Термические к.п.д. любых циклов сравниваем с  $\eta_t$  цикла Карно в этих же пределах температур. Для холодильных установок холодильником является внешняя атмосфера или водопроводная вода, у которой температура ниже температуры хладагента, а источником теплоты — содержимое холодильной камеры, у которого температура выше температуры хладагента. Поэтому эквивалентным циклом Карно для холодильной установки будет цикл, осуществляемый не между  $T_{\text{мин}}$  и  $T_{\text{макс}}$  (в случае холодильных компрессорных установок  $T_{\text{мин}}$  — температура хладагента после детандера, а  $T_{\text{макс}}$  — температура хладагента после компрессора), а между температурами холодильника (воздух, вода) и источника (охлаждаемые предметы в холодильной камере).

Кроме того, необходимо уяснить, почему в воздушных компрессорных установках не применяется процесс дросселирования, почему паровые компрессорные установки имеют холодильный коэффициент значительно больший, чем воздушные.

**Вопросы для самопроверки.** 1. Какой параметр характеризует эффективность холодильной установки? 2. Каковы основные недостатки воздушной компрессорной холодильной установки? 3. Изобразите в  $Ts$ - диаграмме цикл воздушной компрессорной холодильной установки и эквивалентный ей обратный цикл Карно. 4. Почему в паровых холодильных установках целесообразно применять процесс дросселирования, а в воздушных — адиабатное расширение в турбине? 5. Какими свойствами должны обладать хладагенты?

#### 6.2.4. Смеси и растворы

1. Свойства реального газа.
2. Уравнение вычисления реальных газов. Коэффициент сжатости.
3. Зависимость фактора сжимаемости газов от давления.
4. Зависимость фактора сжимаемости от давления при разных температурах.
5. Смесь идеальных и реальных газов.
6. Критическая температура.

#### 6.2.5. Основные понятия теплообмена

**Температурное поле** - это совокупность значений температуры во всех точках данной расчетной области и во времени.

В зависимости от числа координат различают *трехмерное, двумерное, одномерное и нульмерное (однородное)* температурные поля.

Температурное поле, которое *изменяется во времени*, называют **нестационарным температурным полем**. И наоборот, температурное поле, которое *не изменяется во времени*, называют **стационарным температурным полем**.

Примеры записи температурных полей:  $T(x,y,z,\tau)$  – трехмерное нестационарное температурное поле ( $\tau$  – время);  $T(\tau)$  – нульмерное нестационарное температурное поле;  $T(x)$  – стационарное одномерное температурное поле;  $T = \text{const}$  – нульмерное стационарное температурное поле.

**Изотермическая поверхность** – это поверхность равных температур. Свойства изотермических поверхностей: а) изотермические поверхности не пересекаются; б) в нестационарных процессах изотермические поверхности перемещаются в пространстве.

В нашем курсе мы будем рассматривать тела, так называемой, простой или классической формы. Таких тел три: бесконечная или неограниченная пластина (это пластина, у которой толщина в несколько раз меньше длины и ширины); бесконечный цилиндр (это цилиндр, у которого диаметр в несколько раз меньше длины цилиндра) и шар.

Изотермические поверхности в бесконечной пластине – это параллельные плоскости; в бесконечном цилиндре – это вложенные друг в друга цилиндры меньшего диаметра; в шаре – это вложенные друг в друга сферы.

**Градиент температуры** (обозначается  $\text{grad } T$  или  $\nabla T$ ) – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности, в сторону увеличения температуры и численно равный изменению температуры на единице длины:

$$\text{grad}(T) = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}, \quad \frac{\text{К}}{\text{м}},$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – единичные векторы или орты в декартовой системе координат.

Для одномерных температурных полей градиент температуры равен:

$$\text{grad}(T) = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i}, \quad \frac{\text{К}}{\text{м}}.$$

**Количество теплоты** (обозначают  $Q_\tau$ ) – это количество тепловой энергии, полученное или отданное телом или проходящее через это тело за некоторое время  $\tau$  в результате теплообмена.  $Q_\tau$  измеряют в джоулях [Дж] или калориях [кал].

**Тепловой поток** (обозначают  $Q$ ) – это количество теплоты, проходящее через заданную и нормальную к направлению распространения теплоты поверхность *в единицу времени*.

$$\vec{Q} = \vec{n}_0 \frac{dQ_\tau}{d\tau}, \quad \text{Вт. (где } \vec{n}_0 \text{ - единичный вектор; } \tau \text{ - время, с)}$$

При стационарном режиме теплообмена тепловой поток не изменяется во времени и



его рассчитывают по формуле:

$$Q = Q_{\tau} / \tau, \text{ Вт.}$$

В расчетах теплообмена используют три удельных тепловых потока: поверхностную плотность теплового потока, линейную плотность теплового потока и объемную плотность теплового потока.

**Поверхностная плотность теплового потока** (обозначают:  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>) – это тепловой поток, отнесенный к площади поверхности тела.

$$\vec{q} = \frac{d\vec{Q}}{dF}, \text{ Вт/м}^2, \text{ где } F - \text{ площадь, м}^2.$$

В стационарном режиме теплообмена:

$$q = \frac{Q_{\tau}}{\tau \cdot F} = \frac{Q}{F} \text{ откуда следует } Q = q \cdot F \text{ и } Q_{\tau} = q \cdot F \cdot \tau.$$

**Линейная плотность теплового потока** (обозначают:  $q_{\ell}$ , Вт/м) – это тепловой поток, отнесенный к длине протяженного тела.

В стационарном режиме теплообмена:

$$q_{\ell} = \frac{Q_{\tau}}{\tau \cdot \ell} = \frac{Q}{\ell}, \text{ откуда следует, что } Q = q_{\ell} \cdot \ell \text{ и } Q_{\tau} = q_{\ell} \cdot \ell \cdot \tau,$$

где  $\tau$  – время, с;  $\ell$  – длина протяженного объекта, м.

**Объемная плотность теплового потока** (обозначают:  $q_v$ , Вт/м<sup>3</sup>) – это тепловой поток, отнесенный к объему тела.

В стационарном режиме теплообмена:  $q_v = \frac{Q_{\tau}}{\tau \cdot V} = \frac{Q}{V}$  откуда следует  $Q = q_v \cdot V$  и

$$Q_{\tau} = q_v \cdot V \cdot \tau.$$

$V$  – объем, м<sup>3</sup>.

Существуют три элементарных способа передачи теплоты: теплопроводность (кондукция); конвекция; тепловое излучение (радиационный теплообмен).

**Теплопроводность (кондукция)** – способ передачи теплоты за счет взаимодействия микрочастиц тела (атомов, молекул, ионов, электронов) в переменном поле температур. Теплопроводность имеет место в твердых, жидких и газообразных телах. В вакууме теплопроводность отсутствует.

**Конвекция** – способ передачи теплоты за счет перемещения макрообъемов текучей среды из области с одной температурой в область с другой температурой. В вакууме конвекция теплоты невозможна.

**Тепловое излучение (радиационный теплообмен)** – способ передачи теплоты за счет распространения электромагнитных волн в определенном диапазоне частот. Все тела с температурой выше 0 К обладают собственным тепловым излучением. Лучистая энергия может передаваться и в вакууме.

В природе и в технических устройствах, как правило, все три способа передачи теплоты происходят одновременно. Такой теплообмен называется **сложным теплообменом**.

Передачу теплоты совместно теплопроводностью и конвекцией называют **конвективным теплообменом**.

В природе и технике наиболее часто встречаются следующие два варианта сложного теплообмена: теплоотдача и теплопередача.

**Теплоотдача** – процесс теплообмена между непроницаемой твердой стенкой и окружающей текучей средой.

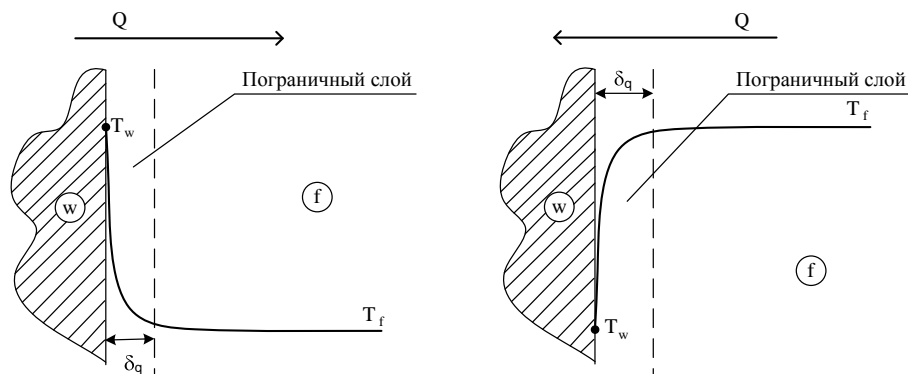


Рис. 1. Схема процесса теплоотдачи:  $T_w$  – температура стенки;  $T_f$  – температура текучей среды;  $\delta_q$  – толщина теплового пограничного слоя.

**Теплопередача** – передача теплоты от одной текучей среды к другой текучей среде через непроницаемую твёрдую стенку.

### 6.2.6. Теплопроводность

**Основной закон теплопроводности – закон Фурье:**

$$\vec{Q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \cdot F \quad \text{или} \quad \vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T),$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\text{grad}(T)$  – градиент температуры, К/м;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

**Физический смысл коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ).** Коэффициент теплопроводности характеризует способность данного вещества проводить теплоту. Коэффициент теплопроводности определяют экспериментально и приводят в справочной литературе.

В кратком курсе ТМО будем решать дифференциальное уравнение Фурье для тел простейшей формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр и шар или сфера) с постоянными физическими коэффициентами:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{k-1}{x_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{q_v}{c'}$$

где  $x_1$  – первая координата в ортогональной системе координат:  $x_1 = x$  в декартовой системе координат,  $x_1 = r$  в цилиндрической и сферической системах координат;  $k = 1, 2$  или  $3$  – коэффициент формы тела:  $k = 1$  – бесконечная пластина;  $k = 2$  – бесконечный цилиндр;  $k = 3$  – шар.

При отсутствии в системе внутренних источников\стоков теплоты ( $q_v = 0$ ) дифференциальные уравнения Фурье для тел простейшей формы записываются следующим образом:

$$k = 1 : \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad k = 2 : \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad k = 3 : \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right).$$

ДУ теплопроводности имеет бесчисленное множество решений. Для выделения единственного решения этого уравнения, соответствующего единственному явлению теплопроводности, должны быть заданы следующие параметры:

1. геометрические размеры и форма тела, а также время  $\tau$  для нестационарного процесса. Заметим, что время процесса может быть задано неявно по какому-либо дополнительному условию, например, нагрев или охлаждение тела до достижения теплового равновесия с окружающей средой;

2. физические свойства вещества (коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная объемная теплоемкость  $c'$  (или удельная массовая теплоемкость  $c$ ), плотность  $\rho$ , коэффициент температуропроводности  $a$ );

3. закон распределения внутренних источников теплоты  $q_v(x_i, \tau)$ . В частном случае  $q_v = 0$ ;

4. краевые условия (КУ) задают *начальное* распределение температуры в заданной расчетной области (НУ) и условия теплообмена на границе этой области (ГУ).

НУ имеют вид:

$$T(x, 0) = T_0 = \text{const.}$$

При граничных условиях **I** рода задают значение температуры на границе расчетной области.

При граничных условиях **II** рода задают значение плотности теплового потока на границе расчетной области.

При граничных условиях **III** рода задают температуру внешней среды, окружающей тело, и закон теплообмена между средой и поверхностью тела.

С учетом закона Фурье ГУ III рода можно записать следующим образом

$$\underbrace{\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w}_{\text{закон Фурье}} = \alpha \cdot (T_f - T_w),$$

где знак + или – в законе Фурье зависит от выбора начала системы координат.

В расчетах теплопроводности используют безразмерную форму записи граничных условий третьего рода

$$\pm \frac{\partial \Theta}{\partial X} \Big|_w = \text{Bi} \cdot \Theta_w, \quad \text{где} \quad \Theta = \frac{T_f - T}{T_f - T_0} \quad \text{– безразмерная температура;} \quad X = \frac{x}{R} \quad \text{–}$$

безразмерная координата, перпендикулярная поверхности теплообмена;  $R$  – характерный или определяющий размер тела;  $\text{Bi} = \alpha R / \lambda_w$  – критерий Био (Biot);  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности твердого тела.

Граничные условия **IV** рода задают условия теплообмена на границе идеального контакта двух тел, состоящих из разного вещества с разными физическими свойствами

### Стационарная теплопроводность в плоской стенке

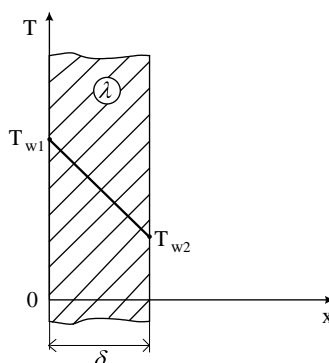


Рис.2. Стационарное температурное поле

Температурное поле в плоской стенке:

$$T(x) = T_{w1} - \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} \cdot x.$$

Для любого  $i$ -го слоя многослойной стенки можно записать:

$$q = \frac{\Delta T_i}{R_{t,i}} = \text{const},$$

где  $\Delta T_i$  – перепад температур на  $i$ -ом слое многослойной стенки;  $R_{t,i} = \delta_i / \lambda_i$  – термическое сопротивление теплопроводности  $i$ -го слоя многослойной стенки.

### 6.2.7. Конвективный теплообмен в однофазных средах

**Закон теплоотдачи – закон Ньютона** имеет вид:

$$Q = \alpha \cdot |T_f - T_w| \cdot F,$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_f$  и  $T_w$  – температуры текучей среды и стенки, °С (К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

В зависимости от причины, вызывающей движение текучей среды, различают конвекцию при вынужденном движении или *вынужденную конвекцию* и конвекцию при свободном движении или *свободную конвекцию*.

По интенсивности движения различают два основных режима течения: *ламинарный* и *турбулентный*. Для большинства флюидов существует и *переходный* от ламинарного к турбулентному режим течения.

Признаки *ламинарного режима* течения:

- частицы среды движутся по плавным взаимно непересекающимся траекториям;
- параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются гладкими функциями координат и времени;

— перенос субстанции (теплоты, импульса и массы) осуществляется за счет взаимодействия *микрочастиц* среды (атомов, молекул, ионов и т. п.). Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и коэффициент диффузии) являются физическими характеристиками вещества. Коэффициенты переноса субстанции для разных веществ определяют экспериментально и приводят в справочных таблицах в зависимости от температуры.

Признаки *турбулентного режима* течения:

- частицы среды движутся по сложным, ломаным, взаимно пересекающимся траекториям;

— параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются пульсирующими функциями координат и времени;

— перенос субстанции (теплоты, импульса и массы) осуществляется за счет взаимодействия макрообъемов среды (турбулентных молей). Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и коэффициент диффузии) зависят от самого режима движения и не являются физическими характеристиками вещества. Коэффициенты турбулентного переноса субстанции рассчитывают по, так называемым, *полуэмпирическим моделям турбулентности*.

Критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda_f},$$

где  $R_0$  – определяющий или характерный размер в системе теплообмена, м;  $\lambda_f$  –

коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К).

Критерий **Рейнольдса** или **Рейнольдс** (критерий динамического подобия) – характеризует отношение силы инерции к силе трения:

$$Re = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu}.$$

По значению критерия Re судя о режиме течения флюида при вынужденной конвекции.

Критерий **Грасгофа**:

$$Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – модуль разности температур между стенкой и флюидом, °С (К);  $\beta$  – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К.

Критерий **Прандтля**:  $Pr = \frac{\nu}{a},$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Критерий **Рэлея**:  $Ra = Gr \cdot Pr.$

Критерий теплового подобия – критерий **Пеклэ**:

$$Pe = \frac{w_0 \cdot R_0}{a}.$$

Критерий **Фруда** или **Фруд** – характеризует отношение силы тяжести (гравитационной силы) к силе инерции:

$$Fr = \frac{g \cdot R_0}{w_0^2}.$$

Критерий **Эйлера** или **Эйлер** – характеризует отношение силы давления к силе инерции:

$$Eu = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot w_0^2}.$$

Критерий **Галилея**, который характеризует отношение силы тяжести к силе вязкого трения:

$$Ga = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2}.$$

Критерий **Архимеда** характеризует отношение подъемной силы из-за разности плотностей к силе вязкого трения:

$$Ar = Ga \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho},$$

где  $\Delta \rho$  – изменение плотности флюида, а  $\rho = f(T_0)$  – значение плотности флюида при определяющей температуре  $T_0$ .

### 6.2.8. Конвективный теплообмен при конденсации паров и кипении жидкостей

**Конденсация** – процесс перехода пара (газа) в жидкое или твердое состояние (десублимация).

**Кипение** – процесс интенсивного образования пара внутри объема жидкости при температуре насыщения или выше этой температуры.

Процесс теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества (при конденсации и кипении) относят к конвективному теплообмену и рассчитывают по закону

теплоотдачи Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot F,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при конденсации или кипении, Вт/(м<sup>2</sup>·К); F – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  – разность температур (температурный перепад) между флюидом и стенкой, °С.

При конденсации перепад температур равен:  $\Delta T = T_n - T_w$ .

При кипении, температура стенки должна быть больше температуры насыщения при данном давлении и, в этом случае:  $\Delta T = T_w - T_n$ .

**Основное уравнение расчета теплообмена при фазовых превращениях вещества** – уравнение теплового баланса:

$$Q = G \cdot r = \alpha \cdot \Delta T \cdot F,$$

где Q – тепловой поток от пара к стенке при конденсации или от стенки к кипящей жидкости при кипении, Вт; G – расход конденсата или паровой фазы, кг/с; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при конденсации или кипении, Вт/(м<sup>2</sup>·К); F – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

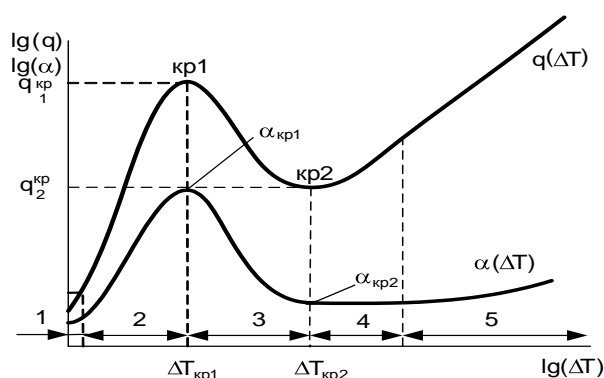


Рис. 3. Изменение плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от перегрева жидкости в пограничном слое

1 – конвективная область без кипения; 2 – область пузырькового кипения; 3 – переходная область; 4 – область пленочного кипения; 5 – участок пленочного кипения со значительной долей передачи тепла излучением; кр1, кр2 – соответственно точки первого и второго кризисов кипения

## 6.2.9 Теплообмен излучением

*Спектром излучения* называют распределение лучистой энергии по дине волны  $E_\lambda = f(\lambda)$ , где  $E_\lambda$ , Вт/м<sup>3</sup> спектральная лучеиспускательная способность тела.

$A = Q_{\text{погл}} / Q_{\text{пад}}$  – *поглощательная способность* тела, равная доле падающего излучения поглощенного телом;

$R = Q_{\text{отр}} / Q_{\text{пад}}$  – *отражательная способность* тела, равная доле падающего излучения отраженного телом;

$D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$  – *пропускательная способность* тела, равная доле падающего излучения проходящего через тело.

*Плотность потока собственного излучения* или *лучеиспускательная способность* тела:

$$E_{\text{соб}} = \frac{dQ_{\text{соб}}}{dF} \quad \text{или} \quad E = \frac{dQ}{dF}.$$

Эффективный тепловой поток равен:  $Q_{эф} = Q_{соб} + Q_{отр}$ .

Результирующий тепловой поток:  $Q_w = Q_{погл} - Q_{соб} = A \cdot Q_{пад} - Q_{соб} = Q_{пад} - Q_{эф}$ .

**Основной закон излучения – закон Стефана–Больцмана:**

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4,$$

где  $E_0$  – лучеиспускательная способность абсолютно черного тела (АЧТ), Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана;  $T$  – температура поверхности абсолютно черного тела, К.

Тело, поглощающее всю падающую на него лучистую энергию, называю **абсолютно черным телом (АЧТ)**. Абсолютно черных тел в природе не существует. Все реальные тела считают серыми телами. **Серое тело** – это тело, у которого спектр излучения подобен спектру излучения абсолютно черного тела.

**Плотность потока собственного излучения** (лучеиспускательная способность) **серого тела:**

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты тела;  $c = \varepsilon \cdot c_0$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T$  – температура тела, К.

**Степень черноты** ( $\varepsilon$ ) – экспериментально определяемая величина, приведена в справочниках в зависимости от физических свойств тела, его температуры и шероховатости поверхности.

Степень черноты газа зависит от его состава, температуры и объема, который занимает газ. Для продуктов сгорания энергетических топлив степень черноты газа рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^* + \varepsilon_{SO_2},$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  – степень черноты углекислого газа;  $\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^*$  – степень черноты водяного пара;  $\varepsilon_{H_2O}^*$  – условная степень черноты водяного пара;  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий особенности излучения водяного пара;  $\varepsilon_{SO_2}$  – степень черноты сернистого газа. Степени черноты перечисленных газов определены экспериментально и приведены в справочной литературе.

В инженерных расчетах лучистый тепловой поток от газа к стенке иногда удобно представить в виде закона теплоотдачи Ньютона:

$$Q_l = \alpha_l \cdot (T_r - T_w) \cdot F_w,$$

где  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплоотдачи излучением рассчитывают по формуле:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 \cdot (T_r^4 - T_w^4)}{T_r - T_w},$$

где  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты.

## 6.2.10 Теплопередача через непроницаемые стенки

**График температурного поля при теплопередаче через плоскую стенку** показан на рис. 4. *Теплопередача* включает в себя следующие процессы: 1) *теплоотдачу* от горячей текучей среды (горячего теплоносителя) к стенке; 2) *теплопроводность* внутри стенки; 3) *теплоотдачу* от стенки к холодной текучей среде (холодному теплоносителю).

**Формула для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку имеет вид:**

$$q = k \cdot (T_{f1} - T_{f2}),$$

где  $T_{f1}$  и  $T_{f2}$  – температуры горячего и холодного флюидов, °С;  $k$  – коэффициент теплопередачи через плоскую стенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$k = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2};$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к холодному флюиду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  – толщина стенки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К);  $R_t$  – термическое сопротивление теплопередачи через плоскую стенку, (м<sup>2</sup>·К)/Вт:

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

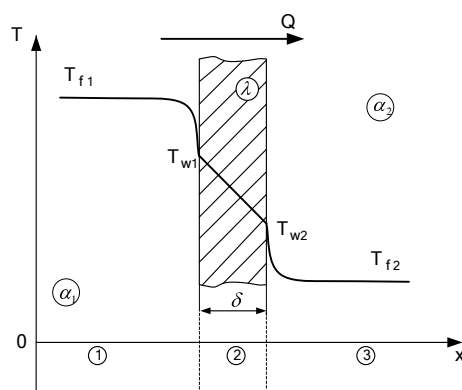


Рис. 4. Теплопередача через плоскую стенку

Термическое сопротивление теплопередачи через плоскую стенку равно сумме термического сопротивления теплоотдачи от горячего флюида к стенке ( $R_{t,1} = 1/\alpha_1$ ), термического сопротивления теплопроводности плоской стенки ( $R_{t,2} = \delta/\lambda$ ) и термического сопротивления теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю ( $R_{t,3} = 1/\alpha_2$ ).

### 6.3. Материалы для проведения текущего и промежуточного контроля знаний студентов

#### Контроль освоения компетенций

№ п\п	Вид контроля	Контролируемые темы (разделы)	Компетенции, компоненты которых контролируются
1	Собеседование, к.р.	Раздел №1	ОПК-1
2	Собеседование	Раздел №2	ОПК-1
3	Собеседование	Раздел №3	ОПК-1
4	Собеседование	Раздел №4	ПК-10
5	Собеседование	Раздел №5	ОПК-1
6	Собеседование, к.р.	Раздел №6	ПК-10
7	Собеседование	Раздел №7	ПК-10



## Демонстрационный вариант контрольной работы №1

### Техническая термодинамика

Задача 1. Считая теплоемкость идеального газа зависящей от температуры, определить: параметры газа в начальном и конечном состояниях, изменение внутренней энергии, теплоту, участвующую в процессе, и работу расширения. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл.6.3.1.1., зависимость величины теплоемкости от температуры приведена в приложении 1.

Таблица 6.3.1.1

Последняя цифра шифра	Процесс	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	Газ	$P_1, \text{МПа}$	$m, \text{кг}$
0	Изохорный	2400	400	0	$\text{O}_2$	1	2
1	Изобарный	2200	300	1	$\text{N}_2$	4	5
2	Адиабатный	2000	300	2	$\text{H}_2$	2	10
3	Изохорный	1800	500	3	$\text{N}_2$	3	4
4	Изобарный	1600	400	4	$\text{CO}$	5	6
5	Адиабатный	1700	100	5	$\text{CO}_2$	6	8
6	Изохорный	1900	200	6	$\text{N}_2$	8	3
7	Изобарный	2100	500	7	$\text{H}_2$	10	12
8	Адиабатный	2300	300	8	$\text{O}_2$	12	7
9	Изобарный	1500	100	9	$\text{CO}$	7	9

1. Что изучает наука-термодинамика.
2. Три основных постулата термодинамики.
3. Термодинамическое равновесие.
4. Уравнение состояния термодинамической системы.
5. Три основных закона термодинамики.
6. Виды термодинамических процессов.
7. Термодинамические свойства вещества.
8. Энтальпия. Теплоемкость.
9. Термодинамический процесс.

## Демонстрационный вариант контрольной работы №2

Задача 1. Определить конечное состояние газа, расширяющегося политропно от начального состояния с параметрами  $P_1, t_1$ , изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты, полученную работу, если задан показатель политропы ( $n$ ), конечное давление  $P_2$ . Показать процесс в  $p$ - и  $T$ -координатах. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 6.3.2.1

Таблица 6.3.2.1

Последняя цифра шифра	$P_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$P_2$ , МПа	$n$	Предпоследняя цифра шифра	Газ	$m$ , кг
0	0,5	100	0,1	1,2	0	O <sub>2</sub>	1
1	1	70	0,5	1,5	1	N <sub>2</sub>	2
2	1,5	110	1,0	1,4	2	CO	3
3	2	120	1,5	1,1	3	N <sub>2</sub>	4
4	2,5	80	0,5	1,3	4	H <sub>2</sub>	5
5	3	90	1,2	1,2	5	O <sub>2</sub>	6
6	3,5	130	1,5	1,4	6	CO <sub>2</sub>	8
7	4	150	0,2	1,6	7	O <sub>2</sub>	2
8	5	200	2	1,2	8	CO	5
9	6	250	3,5	1,5	9	N <sub>2</sub>	3

1. Зависимость фактора сжимаемости газов от давления.
2. Зависимость фактора сжимаемости от давления при разных температурах.
3. Изотермы реального газа.
4. Критическая температура.
5. Термодинамика растворов
6. Свойства идеальных газов
7. Газовые смеси
8. Линейная неравновесная термодинамика.
9. Нелинейная термодинамика.
10. Открытые системы
11. Динамическое время. Внутреннее время.

### *Демонстрационный вариант теста №1*

I. Термодинамическими параметрами являются:

II. 1. объём  $V$ ;

III. 2. энтропия  $S$ ;

IV. 3. давление  $P$ ;

V. 4. теплота  $Q$ .

II. Изменение энтальпии определяет:

1. теплоту реакции при  $V = \text{const}$ ;

2. скорость реакции;

3. теплоту реакции при  $P = \text{const}$ ;

4. направление процесса в обратимой реакции.

III. Определите знак  $\Delta H$  для процесса перехода жидкости в пар: 1.  $\Delta H < 0$ ;

2.  $\Delta H > 0$ ;

3.  $\Delta H = 0$ .

IV. Для каких веществ стандартная теплота образования равна нулю: 1. C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 2. Fe;

3. HF;

4. F<sub>2</sub>.

V. Стандартная теплота реакции  $3\text{H}_2(\text{г}) + \text{N}_2(\text{г}) = 2\text{NH}_3(\text{г})$  равна - 92,4 кДж.

Стандартная теплота образования NH<sub>3</sub> равна (в кДж /моль):

1. - 92,4;

2. - 46,2;

3. + 92,4;

4. - 184,8.

VI. Стандартная теплота реакции  $4\text{HCl}(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) = 2\text{H}_2\text{O}(\text{г}) + 2\text{Cl}_2(\text{г})$  рассчитывается

по формуле:

1.  $\Delta H^0_{298} = 2\Delta H^0_{298}(\text{H}_2\text{O}) - 4\Delta H^0_{298}(\text{HCl})$ ;
2.  $\Delta H^0_{298} = \Delta H^0_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H^0_{298}(\text{HCl})$ ;
3.  $\Delta H^0_{298} = 4\Delta H^0_{298}(\text{HCl}) - 2\Delta H^0_{298}(\text{H}_2\text{O})$ ;
4.  $\Delta H^0_{298} = \Delta H^0_{298}(\text{H}_2\text{O}) + \Delta H^0_{298}(\text{Cl}_2) - \Delta H^0_{298}(\text{HCl}) - \Delta H^0_{298}(\text{O}_2)$ .

VII. Термодинамическим условием равновесия является: 1.  $\Delta H = 0$ ;

2.  $\Delta S < 0$ ;

3.  $\Delta G = 0$ ;

4.  $\Delta G < 0$ .

VIII. В уравнении  $X = \Delta H - T\Delta S$  величина X означает:

1. константу равновесия;

2. энергию Гиббса реакции; 3. теплоту реакции;

4. Изменение внутренней энергии.

IX. Константа равновесия Kp для реакции  $2\text{CO}(\text{г}) + \text{O}_2(\text{г}) \rightleftharpoons 2\text{CO}_2(\text{г})$  имеет вид:

1.  $K_p = P_{\text{CO}_2} / (P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{O}_2})$ ;

2.  $K_p = P^2_{\text{CO}_2} / P_{\text{O}_2}$ ;

3.  $K_p = P^2_{\text{CO}_2} / (P^2_{\text{CO}} \cdot P_{\text{O}_2})$ ;

4.  $K_p = [\text{CO}_2]^2 / [\text{CO}]^2 [\text{O}_2]$ .

X. Для реакции (п. IX) оцените знак изменения энтропии: 1.  $\Delta S > 0$ ; 2.  $\Delta S < 0$ ; 3.  $\Delta S = 0$

### Демонстрационный вариант теста №2

#### Теплообмен излучением

1. Какая форма теплообмена является преобладающей при высоких температурах?

1. Теплопроводность.

2. Свободная конвекция.

3. Тепловое излучение.

4. Излучение, конвекция и теплопроводность однозначны.

2. Что представляет собой тепловое излучение?

1. Излучение, определяемое только температурой и оптическими свойствами излучающего тела.

2. Процесс распространения энергии путем электромагнитных волн.

3. Процесс распространения свободных электронов.

4. Инфракрасное излучение.

3. Укажите закон Планка:

$$1. E_{0\lambda} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4} \cdot$$

$$2. E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \cdot$$

$$3. \lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$4. E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{l^{c_2 / \lambda T} - 1} \cdot$$

4. Что называется абсолютно черным телом?

1. Тело, полностью поглощающее всю падающую на него лучистую энергию.

2. Тело, полностью пропускающее всю падающую на него лучистую энергию.

3. Все ответы верны.

4. Тело, полностью отражающее всю падающую на него лучистую энергию.

5. Каким законом устанавливается связь между T и  $\lambda_{\text{max}}$ ?

1. Законом Стефана — Больцмана.

2. Законом смещения (Вина).

3. Законом Кирхгофа.

4. Все ответы неверны.

6. Что такое поток эффективного излучения тела?

1. Энергия собственного излучения.
2. Сумма потоков собственного и отраженного излучения.
3. Энергия отраженного излучения.
4. Все ответы неверны.

7. Укажите закон смещения (Вина):

$$1. E_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \left( e^{c_2 / \lambda T} - 1 \right)^{-1}$$

$$2. \lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3}$$

$$3. E_{\lambda} = \frac{c_1 \cdot T}{c_2 \lambda^4}$$

$$4. E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

8. Что такое монохроматическое излучение?

1. Ультрафиолетовое излучение.
2. Тепловое излучение.
3. Инфракрасное излучение.
4. Излучение, соответствующее достаточно узкому интервалу частот (длин волн).

9. Укажите размерность коэффициента излучения:

$$1. \frac{Вт}{м^2 \cdot К^2}$$

$$2. \frac{Вт}{м \cdot К}$$

$$3. \frac{Дж}{м^2 \cdot К}$$

$$4. \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$

10. Какое тело называется диатермичным?

1. Тело, полностью пропускающее все падающее на него излучение.
2. Тело, полностью поглощающее все падающие на него лучи.
3. Тело, только пропускающее и поглощающее тепловые лучи.
4. Тело, полностью поглощающее и отражающее тепловые лучи.

11. Что такое поток результирующего излучения?

1. Сумма энергии собственного и отраженного излучения.
2. Излучение, представляющее собой разность между потоками поглощенного и собственного излучения тела.
3. Интегральный поток излучения с единицы поверхности.
4. Все ответы верны.

12. Укажите закон Стефана — Больцмана:

$$1. E_{\lambda} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}$$

$$2. E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$3. E_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \left( e^{c_2 / \lambda T} - 1 \right)^{-1}$$

$$4. \lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3}$$

13. Что называется абсолютно белым телом?

1. Тело, полностью пропускающее все падающие на него лучи.
2. Тело, полностью отражающее все падающие на него лучи.
3. Тело, полностью отражающее лучи (диффузно).
4. Тело, правильно отражающее падающие на него лучи.

14. От чего зависит излучение твердых тел?

1. Только от температуры.
2. Только от состояния поверхности.
3. От состояния поверхности, температуры и природы тела.
4. Все ответы верны.

15. Что такое селективное (избирательное) излучение?

1. Излучение, которое имеет линейчатый характер в определенных интервалах длин волн.
  2. Излучение с определенной длиной волны.
  3. Излучение суммарное с поверхности тела.
  4. Интегральный лучистый поток с единицы поверхности тела.
16. Что такое интегральное излучение?
1. Излучение, соответствующее всему спектру частот длин волн в пределах от нуля до бесконечности.
  2. Излучение определенной длины волны.
  3. Инфракрасное излучение.
  4. Ультрафиолетовое и инфракрасное излучение.
17. Укажите закон Кирхгофа:

$$1. E_0 = \sigma_0 T^4 \qquad 2. \frac{E}{A} = E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$3. \frac{E}{A} = c_0 \qquad 4. \frac{E}{A} = cE_0$$

18. Что такое степень черноты?
1. Отношение потока собственного излучения тела (среды) к потоку черного излучения при той же температуре.
  2. Относительная поглощательная способность тела.
  3. Все ответы верны.
  4. Характеристика относительной поглощательной и излучательной способности тела.
19. Укажите пределы длин волн инфракрасного излучения:
1. От 0,02 до 0,4 мкм.
  2. От 0,8 до 800 мкм.
  3. От 0,4 до 0,8 мкм.
  4. Более 800 мкм.
20. Чему равно отношение излучательной способности к поглощательной способности?

$$1. \frac{E}{A} = \varepsilon \qquad 2. \frac{E}{A} = c_0$$

$$3. \frac{E}{A} = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \qquad 4. \frac{E}{A} = cE_0$$

21. Чему равна степень черноты?

$$1. \varepsilon = \frac{E}{A} \qquad 2. \varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0}$$

$$3. \varepsilon = \frac{A}{E} \qquad 4. \varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

22. Какие тела излучают тепло?
1. Температура которых выше абсолютного нуля.
  2. Все реально существующие тела.
  3. Тела, испускающие электромагнитные волны.
  4. Все ответы правильные.
23. Укажите пределы длин волн видимых лучей:
1. От 0,02 до 0,4 мкм.
  2. От 0,8 до 800 мкм.
  3. От 0,4 до 0,8 мкм
  4. Более 800 мкм.
24. От чего зависит степень черноты тел?

1. От температуры тела и его размеров.
2. От температуры тела, его формы и материала.
3. От температуры тела, материала и способа обработки его поверхности.
4. От температуры, материала, способа обработки, размеров и формы тела.

#### ***Вопросы для собеседования №1***

1. Уравнение состояния термодинамической системы.
2. Назовите основные единицы измерения температуры.
3. Запишите простейшее уравнение состояния идеального газа.
4. Какой термодинамический процесс называется изохорным. Изобразите его на графике состояния.
5. Назовите основные параметры состояния вещества.

#### ***Вопросы для собеседования №2***

1. Виды концентрации растворов.
2. Массовая, объемная и мольная теплоемкости смеси.
3. Газовые смеси.
4. Параметры состояния.

#### ***Вопросы для собеседования №3***

1. Термодинамический процесс.
2. Коэффициент полезного действия.
3. Эффективность работы тепловой машины.
4. Цикл Карно.

#### ***Вопросы для собеседования №4***

1. Растворы. Состав и параметры состояния.
2. Газовые смеси (состав и параметры, законы термодинамики для газовых смесей).
3. Уравнение Клапейрона – Менделеева
4. Теплоемкость газов.

#### ***Вопросы для собеседования №5***

1. Свойства реального газа.
2. Уравнение вычисления реальных газов. Коэффициент сжатости.
3. Зависимость фактора сжимаемости газов от давления.
4. Зависимость фактора сжимаемости от давления при разных температурах.
5. Смесь идеальных и реальных газов.
6. Изотермы реального газа.
7. Критическая температура.

#### ***Вопросы для собеседования №6***

1. Линейная неравновесная термодинамика.
2. Нелинейная термодинамика.
3. Открытые системы
4. Неравновесная термодинамика при нагреве тел. Основные критерии.

5. Динамическое время. Внутреннее время.

#### **Вопросы для собеседования №7**

1. Физическая сущность процесса теплопроводности.
2. Содержание основного закона теплопроводности и его приложение к телам простой геометрической формы.
3. Коэффициент теплопроводности и факторы, влияющие на его величину.
4. Расчетные зависимости, положенные в основу опытного определения коэффициента теплопроводности.

#### **Вопросы для собеседования №8**

1. Какова природа теплового излучения? От каких факторов зависит излучение тел?
2. Что такое селективный спектр и монохроматическое излучение?
3. Дайте определение абсолютно черного и серого тел, поглощательной способности степени черноты. Докажите, что коэффициент поглощения серого тела равен степени его черноты.

#### **Вопросы и задания к экзамену**

1. Введение. Предмет термодинамики.
2. Термодинамические процессы и циклы.
3. Что изучает наука-термодинамика.
4. Три основных постулата термодинамики.
5. Термодинамическое равновесие.
6. Уравнение состояния термодинамической системы.
7. Энтальпия. Теплоемкость.
8. Три основных закона термодинамики.
9. Виды термодинамических процессов.
10. Термодинамические свойства вещества.
11. Термодинамические процессы.
12. Оценка эффективности работы тепловой машины.
13. Цикл Карно.
14. Коэффициент полезного действия.
15. Открытые системы. Термодинамические координаты. Их число.
16. Связь потенциала Гиббса и химического потенциала. Независимость химического потенциала от числа частиц.
17. Открытые термодинамические величины.
18. Изобарно-изотермический потенциал Гиббса.
19. Зависимость термодинамических величин от температуры.
20. Зависимость давления насыщенного пара от температуры.
21. Растворы. Состав и параметры состояния.
22. Газовые смеси (состав и параметры, законы термодинамики для газовых смесей).
23. Теплоемкость газов.
24. Реальный газ. Свойства реального газа.
25. Уравнение вычисления реальных газов. Коэффициент сжатости.
26. Зависимость фактора сжимаемости газов от давления.
27. Зависимость фактора сжимаемости от давления при разных температурах.
28. Изотермы реального газа.
29. Критическая температура.
30. Термодинамика систем вдали от равновесия (нелинейная термодинамика)
31. Открытые системы
32. Термодинамические процессы и временный фактор.
33. Линейная неравновесная термодинамика.

34. Нелинейная термодинамика.
35. Неравновесная термодинамика при нагреве тел. Основные критерии.
36. Динамическое время. Внутреннее время.
37. Основные понятия и определения теплообмена. Виды переноса теплоты.
38. Теория теплообмена.
39. Способы переноса теплоты.
40. Процесс передачи теплоты теплопроводностью.
41. Конвекция. Радиация.
42. Сложный теплообмен.
43. Температурное поле.
44. Свойства изотермических поверхностей.
45. Температурный градиент.
46. Основные положения учения о теплопроводности. Закон Фурье.
47. Коэффициент теплопроводности. Температуропроводность.
48. Теплопроводность однослойной и многослойной плоской и цилиндрической стенки при граничных условиях I рода.

### **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины Теплотехника**

а) основная литература:

1. Сапожников С.З. Китанин Э.Л. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебник для вузов. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. - 319 с. Теплотехника: Учебник для вузов/ под общ.ред. В.И. Крутова – М.: Машиностроение, 1986. - 432с. (Б. – 15 экз.) <http://window.edu.ru/resource/461/73461>.
2. **Техническая термодинамика и основы теплообмена: Упражнения и задачи [Текст] :** учеб.пособие / ПГСХА. - Пенза : РИО ПГСХА, 2004. - 206 с. : ил. - 621.036(075) аб-48, чз2-2. - 188-00 р. УДК [621.036\(075\)](#)
3. Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники: Учебное пособие. - Москва. Издательство "Машиностроение", 2005. - 260 с. <http://window.edu.ru/resource/092/38092>
4. Михатулин Д.С., Чирков А.Ю. Конспект лекций по тепломассообмену PDF. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
5. 1. Дурина Т.А., Моргунов В.Н. Термодинамика. Лабораторный практикум. Методическое пособие. – Пенза, каф. «СЛПиМ» Пенз.гос.ун-та, 2011- 21с. <http://window.edu.ru/resource/320/76320>.

б) дополнительная литература:

1. БАХМАТ Г. В., КАБЕС Е. Н. ТЕПЛОТЕХНИКА: Учебно-методический комплекс/ под общ.ред. В.К. Бородина- Тюмень Издательство «Нефтегазовый университет», 2001.- 152с. [http://www.twirpx.com/file/903032/;](http://www.twirpx.com/file/903032/)
2. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена: курс лекций. - СПб.: СПбГПУ, 2010. - 338 с. <http://window.edu.ru/resource/463/73463>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- [Библиотека Пензенской области](#)
- [Издательство "Лань"](#)



- [Научная электронная библиотека](#)
- [Единое окно доступа к образовательным ресурсам](#)
- [Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов](#)
- [Коллекция цифровых образовательных ресурсов](#)
- [Электронный каталог библиотеки ПГУ](#)

#### **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- справочная литература по термодинамическим и физико-химическим величинам;
- лабораторное оборудование в «Литейной лаборатории».
- Теплотехника. Лабораторный практикум. Методическое пособие.
- Перечень адресов для работы в глобальных сетях.
- Кинофильмы

Рабочая программа дисциплины «Теплотехника» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО (№957 от 03.09.2015г.) по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение (уровень бакалавриата).

Программу составил(а):

Дурина Т.А. , ст. преподаватель каф. «СЛПиМ» \_\_\_\_\_

**Настоящая программа, не может быть воспроизведена ни в какой форме, без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**

Программа одобрена на заседании кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение

Протокол № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_

Зав. кафедрой «СЛПиМ» \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор А.Е. Розен

Программа одобрена методической комиссией факультета машиностроения и транспорта

Протокол № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_

Председатель методической комиссии факультета машиностроения и транспорта

\_\_\_\_\_ к.т.н., доцент О.Н. Логинов

**Сведения о переутверждении программы на очередной учебный год и регистрации изменений**

Учебный год	Решение кафедры (№ протокола, дата, подпись зав. кафедрой)	Внесенные изменения	Номера листов (страниц)		
			замененных	новых	аннулированных