

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой энергетики  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Мясоедов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

для специальностей

140101.65 – «Тепловые электрические станции»

140106.65 – «Энергообеспечение предприятий»

Составитель: М.В. Гриценко, И.Г. Подгурская, Л.А. Мясоедова

Благовещенск  
2012 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	2
1.КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ.....	52
2.ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	88
3.ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	96
4.САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ.....	99
5.МАТЕРИАЛЫ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ.....	150

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

140101.65 – «Тепловые электрические станции»

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Государственный образовательный стандарт подготовки инженера по специальности: 140101 «Тепловые электрические станции» включает изучение дисциплины «Теоретические основы теплотехники в разделе ОПД.Ф. 9.

### 1.1. Цель преподавания дисциплины

Предметом изучения дисциплины «Теоретические основы теплотехники. Термодинамика» являются закономерности взаимного превращения теплоты и работы, взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, а также процессы, происходящие в газах и парах и свойства этих тел при различных физических условиях. В теоретической части термодинамика является общим разделом науки об энергии, а в прикладной части представляет собой теоретический фундамент всей теплотехники, изучающей процессы, протекающие в тепловых двигателях.

Предметом изучения дисциплины «Теоретические основы теплотехники. Теплообмен» являются закономерности процессов распространения теплоты в твердых, жидких, и газообразных телах, которые по своей физико-механической природе многообразны, отличаются большой сложностью и развиваются в виде целого комплекса разнородных явлений.

Целью дисциплины «Теоретические основы теплотехники. Термодинамика» является изучение законов термодинамики, ознакомление с основными термодинамическими свойствами рабочих тел и теплоносителей теплотехнических установок, методами расчета и анализа рабочих процессов и циклов теплотехнических установок с целью достижения их наивысшей энергетической эффективности.

Целью дисциплины «Теоретические основы теплотехники. Теплообмен» является изучение закономерностей основных процессов переноса тепла и массы, освоение методов решения различных задач теплообмена, приобретение навыков экспериментального исследования процессов теплообмена посредством физического и математического моделирования.

## 1.2. Задачи изучения дисциплины

Задачей изучения дисциплины *«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»* является обеспечение знаний студентов в области термодинамики, создание фундамента для усвоения профилирующих дисциплин специальности, развитие навыков и умения творческого использования элементов термодинамического анализа при решении конкретных задач в области теплоэнергетики.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- первый и второй законы термодинамики;
- термодинамические свойства веществ;
- основные термодинамические процессы;
- процессы течения газов и жидкостей;
- теплосиловые газовые и паровые циклы;
- методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок;
- холодильные циклы;
- основы химической термодинамики.

Уметь:

- применять уравнения и справочную литературу для определения термодинамических свойств различных веществ;
- рассчитывать величины, характеризующие преобразование энергии в термодинамических процессах и циклах теплотехнических установок;
- вычислять показатели энергетической эффективности прямых и обратных термодинамических циклов;
- анализировать влияние изменения термодинамических параметров рабочего тела на энергетическую эффективность различных теплотехнических установок.

Знания и умения, полученные в курсе, являются необходимыми для изучения специальных дисциплин *«Котельные установки и парогенераторы»*, *«Турбины тепловых и атомных электрических станций»*, *«Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций»*, *«Тепловые и атомные электрические станции»*, *«Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий»* и используются при выполнении расчетных и лабораторных работ по указанным дисциплинам, а также при выполнении дипломных проектов и работ.

Задачей изучения дисциплины *«Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен»* является обеспечение знаний студентов в области передачи теплоты и их закономерностей, создание фундамента для усвоения профилирующих дисциплин специальности. Развитие навыков и умения творческого использования. Элементов теории тепломассообмена при решении конкретных задач.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- Способы теплообмена
- Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения
- Систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, применение методов подобия и его размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена
- Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы или пучка труб
- Расчет коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции
- Теплообмен при фазовых превращениях
- Теплообмен излучением, сложный теплообмен
- Массообмен
- Массоотдача, математическое описание и аналогия процессов массо и теплообмена
- Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов
- Основы химической термодинамики
- Влажный воздух

Уметь:

- Применять уравнения и справочную литературу для расчета различных задач теплообмена;
- Рассчитывать температурное поле и тепловые потоки в твердых телах, а также в потоках жидкости и газа;
- Рассчитывать величины, характеризующие интенсивность процессов тепломассообмена, анализировать различные факторы, влияющие на процессы тепломассообмена;
- Математически сформулировать конкретную задачу тепломассообмена и выполнять ее решение путем физического или математического моделирования;
- Выполнять тепловой расчет теплообменных аппаратов.

### **1.3. Перечень дисциплин, освоение которых необходимо при изучении данной дисциплины**

Математика: дифференциальное и интегральное исчисления; дифференциальные уравнения; основы вычислительного эксперимента; уравнения математической физики.

Физика: молекулярная физика и термодинамика.

Химия: химическая термодинамика и кинетика: энергетика химических процессов, химическое и фазовое равновесие, скорость реакции и методы ее регулирования.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.1. Федеральный компонент

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

Первый закон термодинамики, второй закон термодинамики; реальные газы, водяной пар, термодинамические свойства реальных газов,  $PV$ -диаграмма, таблицы термодинамических свойств веществ, истечения из сопел, дросселирование, циклы паротурбинных установок, тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки, газовые циклы, схемы, циклы и термический КПД двигателей и холодильных установок, основы химической термодинамики, основы термодинамики необратимых процессов.

*«Теоретические основы теплотехники. Теплообмен»*

Способы теплообмена; дифференциальное уравнение теплопроводности и его решение; система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерности к изучению процессов конвективного теплообмена; теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекании трубы и пучков труб; расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции; теплообмен при фазовых превращениях, теплообмен излучением, сложный теплообмен; массообмен: поток массы компонента; вектор плотности потока массы; молекулярная диффузия: концентрационная диффузия, закон Фика; термо- и бародиффузия; массоотдача, математическое описание и аналогия процессов массо- и теплообмена; теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.

### 2.2. Наименование тем, их содержание

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

3 семестр

*Тема 1*

Основные понятия и исходные положения термодинамики.

Предмет и метод термодинамики. Термодинамическая система и окружающая среда. Параметры состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные состояния и процессы. Термодинамическое равновесие. Идеальный газ. Основные законы идеального газа. Термическое уравнение состояния идеального газа. Универсальное уравнение состояния идеального газа.

*Тема 2*

Первый закон термодинамики.

Теплота и работа как способы передачи энергии. Уравнение работы газа при расширении. Внутренняя энергия. Обратимые и необратимые процессы. Аналитические выражения первого закона термодинамики. Уравнение первого закона для стационарного потока массы.

### *Тема 3*

Смеси идеальных газов.

Способы задания состава смеси. Расчет термодинамических свойств смеси идеальных газов по свойствам компонентов.

### *Тема 4*

Энтальпия. Теплоемкость газов.

Свойства энтальпии, ее физический смысл. Теплоемкость газов. Изохорная и изобарная теплоемкости. Молекулярно-кинетическая и квантовая теории теплоемкости газов. Истинная и средняя теплоемкости.

### *Тема 5*

Основные процессы идеальных газов.

Порядок исследования термодинамических процессов. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Адиабатный процесс. Политропные процессы.

### *Тема 6*

Второй закон термодинамики.

Основные положения второго закона. Круговые термодинамические процессы, или циклы. Термический коэффициент полезного действия. Прямой обратимый цикл Карно. Теорема Карно. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно.

Ts-диаграмма и ее свойства. Термодинамические циклы в Ts-диаграмме. Свойства обратимых и необратимых циклов. Изменение энтропии в них. Принцип возрастания энтропии и физический смысл второго закона термодинамики. Максимальная работа. Эксергия. Потеря эксергии в необратимых процессах.

Энтропия и термодинамическая вероятность.

Характеристические функции. Химический потенциал. Общие условия термодинамического равновесия. Основные дифференциальные уравнения термодинамики.

### *Тема 7*

Третий закон термодинамики.

Формулировки и аналитическое выражение третьего закона термодинамики. Гипотеза Планка. Абсолютная энтропия. Следствия третьего закона термодинамики.

### *Тема 8*

Процессы течения газов.

Основные уравнения процессов течения. Скорость звука. Истечение из суживающихся сопел. Максимальный расход и критическая скорость. Переход через скорость звука. Сопло Лавала. Истечение с учетом необратимости. Коэффициенты скорости и расхода. Параметры полного адиабатного торможения.

Уравнение процесса дросселирования. Дросселирование идеального газа.

### *Тема 9*

Процессы сжатия в компрессоре.

Работа одноступенчатого компрессора. Теоретическая индикаторная диаграмма. Действительная индикаторная диаграмма. Процессы сжатия в реальном компрессоре. Многоступенчатый компрессор.

### *Тема 10*

Газовые циклы.

Индикаторная диаграмма и цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания. Циклы с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении и смешанным подводом тепла. КПД циклов и их термодинамический анализ.

Принципиальная схема газотурбинной установки. Цикл газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном давлении. Термический КПД идеального цикла. Действительный цикл и его КПД. Влияние необратимости процессов сжатия и расширения. Регенерация, многоступенчатое сжатие и ступенчатый подвод тепла в газотурбинной установке.

4 семестр

### *Тема 11*

Реальные газы.

Термодинамические свойства реальных газов.  $PV$ -диаграмма. Фактор сжимаемости и  $zP$ -диаграмма. Фазовая  $pT$ -диаграмма. Условия фазового равновесия. Правило фаз Гиббса. Уравнение Менделеева-Клаузиуса.

Вириальное уравнение для умеренно сжатых газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ.

Принцип соответственных состояний и подобие термодинамических свойств веществ.

### *Тема 12*

Водяной пар.

Удельный объем, энтальпия и энтропия воды, влажного, сухого насыщенного и перегретого пара. Сверхкритическая область состояния пара. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, других веществ.  $Ts$ -диаграмма и  $hs$ -диаграмма для водяного пара. Изопроецессы водяного пара.

Истечение водяного пара. Дросселирование водяного пара.

### *Тема 13*

Циклы паротурбинных установок.

Цикл Карно на влажном паре. Принципиальная схема паротурбинной установки. Цикл Ренкина. Изображение цикла Ренкина в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Термический КПД цикла. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла. Необратимое расширение пара в турбине. Тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки.

Цикл и схема паротурбинной установки со вторичным перегревом пара. Изображение цикла в  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах. КПД цикла. Регенеративный подог-



рев питательной воды. Термический КПД регенеративного цикла. Комбинированная выработка электроэнергии и тепла. Теплофикационные циклы.

Циклы атомных станций с водяным теплоносителем. Цикл насыщенного пара с промежуточной сепарацией и перегревом пара.

#### *Тема 14*

Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.

О методах анализа эффективности циклов. Методы сравнения термических КПД обратимых циклов. Метод коэффициентов полезного действия в анализе необратимых циклов. Энтропийный метод расчета потерь работоспособности в необратимых циклах. Эксергетический метод расчета потерь работоспособности.

#### *Тема 15*

Комбинированные циклы.

Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела паротурбинных установок. Принципиальная схема, цикл и КПД паро-паровой бинарной установки. Схемы и циклы парогазовых установок.

Прямое преобразование тепла в электроэнергию. Цикл МГД установки.

#### *Тема 16*

Циклы холодильных установок.

Обратные циклы. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Принципиальная схема и цикл воздушной холодильной установки. Принципиальная схема и цикл парокомпрессионной холодильной установки.

Цикл термотрансформатора (теплового насоса). Отопительный коэффициент.

#### *Тема 17*

Влажный воздух.

Абсолютная и относительная влажность влажного воздуха. Влажосодержание. Температура и точка росы. Расчет термодинамических свойств влажного воздуха.  $h$ -диаграмма влажного воздуха. Термодинамические процессы с влажным воздухом.

#### *Тема 18*

Основы химической термодинамики.

Тепловой эффект химической реакции. Закон Гесса. Константа химического равновесия и изменение термодинамического потенциала. Зависимость константы равновесия от температуры.

### *«Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен»*

4 семестр

#### *Тема 1*

Основные понятия и исходные положения тепломассообмена.

Способы тепло- и массопереноса: теплопроводность, конвекция,

излучение, диффузия. Феноменологический метод изучения явлений тепло- и массообмена. Определение основных понятий: температурное поле, градиент температуры, тепловой поток, плотность теплового потока. Вектор плотности теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел.

### *Тема 2*

Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Коэффициент теплопроводности, Закон Ньютона-Рихмана. Перенос тепла в плоской стенке при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности. Теплопередача через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки. Критический диаметр тепловой изоляции. Передача тепла через шаровую стенку. Оребрение поверхности нагрева, как способ интенсификации процесса теплопередачи. Перенос тепла по стержню (ребру). Тепловой поток с поверхности стержня (ребра). Теплопередача через оребренную стенку. Коэффициент эффективности ребра. Численные методы решения задач стационарной теплопроводности. Температурное поле в процессе охлаждения (нагрева) пластины. Метод Фурье. Безразмерная форма решения задачи о нестационарной теплопроводности пластины. Число Био. Безразмерное время (число Фурье). Температурное поле в процессе охлаждения (нагрева) бесконечно длинного цилиндра, шара и некоторых тел конечных размеров. Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров и произвольной формы. Регулярный режим охлаждения. Определение теплофизических свойств материалов методом регулярного режима.

### *Тема 3*

Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена.

Математическое описание процесса конвективного теплообмена: дифференциальные уравнения энергии, движения, неразрывности. Физические свойства жидкостей и газов, существенные для процесса конвективного теплообмена. Классификация теплоносителей по числу Прандтля. Безразмерный вид математического описания конвективного теплообмена. Безразмерные комплексы: число Рейнольдса, число Грасгофа, число Рэлея, число Ниссельта, число Фурье, число Эйлера, число Прандтля, число БИО, число Фруда, число Пекле. Теория подобия и размерности. Пи – теорема. Пограничный слой. Турбулентность. Рейнольдсовы преобразования дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Турбулентная теплопроводность. Турбулентная вязкость. Турбулентное число Прандтля.

5 семестр

### *Тема 4*

Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы и пучка труб.

Теплообмен и сопротивление при ламинарном и турбулентном пограничном слое на пластине. Теплообмен при вынужденном внешнем обтекании трубы и пучка труб.

Теплообмен при движении теплоносителей в трубах и каналах. Первое начало термодинамики для течения в трубах. Местный и средний коэффициенты теплоотдачи.

Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении в трубе. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы. Турбулентное движение в трубах. Формулы Михеева и Петухова.

Теплоотдача при течении жидких металлов. Теплообмен при сверхкритическом состоянии жидкостей.

Интенсификация конвективного теплообмена при течении теплоносителя в трубах и каналах.

#### *Тема 5*

Расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции.

Теплоотдача при свободном движении жидкости около тел (пластина, труба) находящихся в неограниченном объеме жидкости. Свободная конвекция в ограниченном объеме.

#### *Тема 6*

Теплообмен при фазовых превращениях.

Теплообмен при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Теория Нуссельта. Поправочные коэффициенты к теории Нуссельта (на волновое течение и переменность физических свойств конденсата).

Турбулентное течение пленки конденсата расчет коэффициента теплоотдачи.

Теория Нуссельта для пленочной конденсации на горизонтальной трубе.

Влияние скорости пара, состояние поверхности, влажности и перегрева пара, примесей воздуха в паре. Теплообмен при конденсации пара в трубах. Тепло-

обмен при кипении жидкостей. Кривая кипения. Пузырьковое и пленочное кипение. Критический радиус пузырька. Скорость роста пузырька. Отрывной диаметр пузырька. Частота отрыва пузырьков. Расчет коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме. Критические тепловые нагрузки при кипении. Теплоотдача при пленочном кипении.

#### *Тема 7*

Теплообмен излучение, сложный теплообмен.

Физическая природа, понятия и законы теплового излучения. Интегральный и спектральные характеристики энергии излучения: поток, плотность потока и интенсивность излучения.

Метод многократных отражений и метод полных потоков излучения. Классификация потоков излучения. Лучистый теплообмен между двумя безграничными пластинами, двумя концентрическими сферами и произвольно расположенными телами.

Угловые коэффициенты излучения. Теоретические основы современных зональных методов расчета теплообмена излучением. Интегральные уравнения

излучения. Основы методов расчета теплообмена излучение от излучающей и поглощающей среды к поверхностям нагрева теплообменных устройств.

Поглощательная способность и степень черноты среды (продуктов сгорания).

Понятие о методах расчета сложного теплообмена (радиоационно-кондуктивного и радиационно-конвективного).

#### *Тема 8*

Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.

Классификация теплообменных аппаратов. Характерные конструктивные схемы теплообменных аппаратов. Основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках: прямоток, противоток, перекрестный ток, смешанная схема и многократный перекрестный ток.

Основные положения и уравнения теплового расчета. Средняя разность температур и метод ее вычисления. Температурный напор и его определение для основных схем движения теплоносителей. Сравнение прямотока и противотока. Определение поверхности теплообмена при переменном коэффициенте теплопередачи и переменных теплоемкостях теплоносителей. Вычисление коэффициента теплопередачи для различной формы поверхностей теплообмена. Вычисление конечной температуры теплоносителей. Интенсификация процессов теплопередачи.

Особенности в методике теплового расчета регенеративных теплообменников. Выражение полного падения давления в теплообменнике. Гидравлические сопротивления и местные сопротивления. Затраты напора, обусловленные ускорением потока и преодолением гидростатического давления столба жидкости. Мощность, необходимая для перемещения теплоносителя.

### **2.3. Практические занятия**

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

1. Параметры состояния.
2. Законы и уравнения состояния идеальных газов.
3. Первый закон термодинамики.
4. Теплоемкость, энтальпия и внутренняя энергия идеальных газов.
5. Основные процессы идеальных газов.
6. Второй закон термодинамики.
7. Истечение и дроселирование газов.
8. Расчет компрессоров.
9. Циклы двигателей внутреннего сгорания.
10. Циклы газотурбинных установок.
11. Реальные газы. Свойства воды и водяного пара. Процессы изменения состояния водяного пара.
12. Истечение и дроселирование паров.
13. Циклы паротурбинных и парогазовых установок.
14. Циклы холодильных машин.

15. Влажный воздух.

15. Элементы термодинамики химических процессов.

*«Теоретические основы теплотехники. Теплообмен»*

4 семестр

1. Теплопроводность при стационарном режиме .
2. Теплопроводность при нестационарном режиме .
3. Основные положения конвективного теплообмена, теория подобия .
4. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности.
5. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков .
6. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.
7. Теплоотдача при свободном движении жидкости .

5 семестр

8. Конвективный тепло- и массообмен .
9. Теплоотдача при конденсации пара.
10. Теплоотдача при кипении однокомпонентных жидкостей.
11. Тепловое излучение .
12. Расчет теплообменников аппаратов.

#### **2.4. Лабораторный практикум. Наименование лабораторных работ**

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

3 семестр

1. Определение изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении.
2. Изучение термодинамических процессов идеальных газов.
3. Исследование процесса адиабатного истечения газов через сужающееся сопло.
4. Исследование циклов паротурбинных установок.
5. Исследование процессов во влажном воздухе.

*«Теоретические основы теплотехники. Теплообмен»*

4 семестр

1. Определение коэффициента теплопроводности твердых материалов методом пластины.
2. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе.
3. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра.
4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра в атмосфере различных газов.

5 семестр

5. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом.
6. Исследование работы теплообменного аппарата.

## 2.5. Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная работа предусматривает выполнение студентами домашних расчетных заданий по основным темам дисциплины. Темы и задания для расчетных работ приведены ниже.

### Домашнее задание № 1 "Расчет газовой смеси"

- 1. Определить:** а) газовую постоянную смеси;  
б) кажущуюся молекулярную массу;  
в) плотность и объем смеси при нормальных условиях.
- 2. Произвести** перевод компонентов смеси в другой состав.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N <sub>2</sub>	75	64	83	72	50	68	70	85	62									
O <sub>2</sub>	5	12	-	5	-	10	-	7	22									
CO <sub>2</sub>	14	17	3	15	16	19	8	3	12									
CO	6	-	9	8	30	-	13	5	-									
H <sub>2</sub>	-	7	5	-	4	3	6	-	4									

Для четных вариантов указан объемный состав;

Для нечетных – массовый.

### Домашнее задание № 2 "Определение теплоемкости газовой смеси "

**Определить** теплоемкости газовой смеси (согласно варианту задания):

- среднюю в интервале температур  $t_1-t_2$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной;
- считая  $c = \text{const}$  (по молекулярно-кинетической теории).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t <sub>1</sub>	250	100	350	200	450	400	150	600	550	650	150	200	350	300	250
t <sub>2</sub>	800	750	1000	950	700	850	600	1050	1300	1200	500	750	850	950	700
	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$c'_v$	$\tilde{c}_p$	$c'_p$	$c_v$	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c'_v$	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$\tilde{c}_v$	$c_v$
	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c'_v$	$c_p$	$c_v$	$\tilde{c}_v$	$c'_p$	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$c'_v$	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c_p$	$c'_v$

Примечание: Состав газовой смеси принять по заданию № 1.

### Домашнее задание № 3

#### "Определение параметров газа в политропном и изобарном процессах"

Газ массой  $m$  имеет начальные параметры – давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ . После политропного изменения состояния газа его объем стал  $V_2$ , а давление  $p_2$ .

**Определить** конечную температуру газа, показатель политропы  $n$ , количество теплоты, работу, изменение внутренней энергии, изменение энтальпии и энтропии.

**Найти** эти же величины, если изменение состояния газа происходит по изобаре ( $p_1 = \text{const}$ ) до того же значения конечного объема  $V_2$ .

**Построить** процессы в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
m	2	4	5	3	6	2	4	5	3	6	2	4	5	3	2
$p_1$	0,12	0,15	0,14	0,12	0,2	0,25	0,12	0,15	0,14	0,22	0,2	0,25	0,18	0,12	0,15
$t_1$	20	50	10	27	30	37	15	40	47	25	17	35	20	37	25
газ	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	воз дух	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	He	CO	O <sub>2</sub>	He	воз дух	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He
$V_2$	3,5	0,8	2,0	1,2	0,7	2,5	1,7	3,0	2,8	0,5	2,2	3,4	4,5	2,6	4,0
$p_2$	1,2	1,45	1,3	1,25	1,4	1,35	1,15	1,5	1,36	1,14	1,28	1,52	1,8	1,7	1,32

### Домашнее задание № 4

#### "Расчет цикла Карно"

(применительно к тепловому двигателю)

Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха – совершает прямой цикл Карно. Предельные температуры рабочего тела в цикле: наибольшая  $t_1$ , наименьшая  $t_2$ .

Предельные давления рабочего тела в цикле: наибольшее  $P_{\text{max}}$ , наименьшее  $P_{\text{min}}$ .

**Определить:**

- основные параметры состояния рабочего тела в характерных точках;
- количество подведенного и отведенного в цикле тепла;
- полезную работу, совершенную рабочим телом за цикл;
- термический КПД цикла;
- изменение энтропии в изотермических процессах цикла.

**Построить** цикл (в масштабе) в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах.

вариант	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_1, ^\circ\text{C}$	317	250	327	330	270	320	250	303	300	277	320	260	300	270

$t_2, ^\circ\text{C}$	27	30	30	37	30	20	25	17	20	27	25	17	20	15
$P_{\max}, \text{МПа}$	3,0	2,8	2,6	2,5	4,2	3,6	2,0	3,2	3,5	2,4	4,0	2,2	2	3,8
$P_{\min}, \text{МПа}$	0,1 5	0,1 3	0,1	0,1 4	0,1 5	0,1 2	0,1	0,1 4	0,1 3	0,1 5	0,1 7	0,1 2	0,1 3	0,1 7

Домашнее задание № 5

**«Истечение газа через сужающееся сопло»**

Из газового резервуара большого объема происходит обратимый, т.е. без трения, адиабатный процесс истечения газа через сопло. Параметры газа в резервуаре  $p_1$  и  $T_1$ , а  $p_2$  – давление среды, в которую поступает газ.

Ва-риант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t, ^\circ\text{C}$	15 0	25 0	200	30 0	35 0	400	15 0	25 0	200	30 0	35 0	400	15 0	250
$P_1, \text{ба}$ $p$	6	8	10	7	9	5	9	6	8	10	7	8	5	9
$P_2, \text{ба}$ $p$	4	4,5	6	4	7	3	6	4,5	5,5	7	4,5	6	4	6,5
$f_{\text{мм}^2}$ ,	20	40	25	30	45	35	40	25	30	35	40	45	25	30
Газ	CO	He	CO 2	Ar	O <sub>2</sub>	CO 2	CO	N <sub>2</sub>	CH 4	He	O <sub>2</sub>	SO 2	CO	CH 4

**Определить**

1. Скорость адиабатного истечения газа и массовый секундный расход.
2. Значение  $p_2$ , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, значение этой скорости, а также максимальный секундный расход.
3. Скорость при истечении газа через сопло Лавалья при  $p_2' = 0,4p_1$ .

Домашнее задание № 6

**"Расчет многоступенчатого компрессора"**

**Задание.** Рассчитать многоступенчатый поршневой компрессор (без учета трения и вредного пространства), т.е. определить: количество ступеней компрессора, степень повышения давления в каждой ступени, количество теплоты, отведенной от воздуха в цилиндрах компрессора, в промежуточном и конечном холодильниках (при охлаждении до  $t_1$ ), и мощность привода, если давление воздуха на входе в первую ступень компрессора  $p_1 = 0,1$  МПа, температура  $t_1 = 27$   $^\circ\text{C}$ .  $\Delta t$  - допустимое повышение температуры воздуха в каждой ступени.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	205	200	195



n	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,32	1,31	1,3	1,29	1,23	1,24	1,25	1,26
$P_k, \text{МПа}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	15	16	17
$G, \text{кг/с}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	0,5	0,6	0,7

**Указание.** При расчете по допустимым  $\Delta t$ , как правило, получается число ступеней, не равное целому числу (н-р 1,3; 2,6; 3,5), поэтому нужно принимать целое число (2, 3, 4) и для  $\Delta t$ , соответствующего целому числу ступеней, проводить все расчеты,

**Изобразить** графики политропного сжатия газа в компрессоре в диаграмме  $PV$  и  $TS$ .

### Домашнее задание № 7

#### «Процессы водяного пара. Дросселирование водяного пара»

Начальное состояние водяного пара характеризуется давлением  $p_1$  и степенью сухости  $x_1$ . Водяной пар нагревается в пароперегревателе при постоянном давлении  $p_1$  до температуры  $t_2$ . Затем пар дросселируется до давления  $p'_2$  и направляется в турбину, где адиабатно расширяется до давления  $p_3 = 0,003 \text{ МПа}$ .

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_1, \text{МПа}$	3,5	5,5	4,0	5,0	4,5	3,0	5,5	5,0	4,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$x$	0,8	0,9	0,9 2	0,8 6	0,8 2	0,9	0,8 4	0,8 8	0,9 2	0,8 8	0,9	0,8 6	0,8 2	0,8
$t_2, ^\circ\text{C}$	46 0	60 0	520	480	500	56 0	440	580	610	550	42 0	460	540	60 0
$p'_1, \text{МПа}$	2,8	5,0	3,5	4,6	4,0	2,4	4,4	4,2	3,8	2,2	2,6	3,4	3,6	4,4

#### Определить:

- все параметры пара в точках 1, 2, 3;
- количество теплоты, подведенной к 1 кг пара в пароперегревателе;
- изменение удельной внутренней энергии пара в пароперегревателе и турбине;
- располагаемый теплоперепад при расширении пара в турбине;
- увеличение располагаемого теплоперепада, при условии, что пар направляется в турбину без дросселирования (при давлении  $p_1$ ), а расширению происходит до того же конечного давления  $p_3 = 0,003 \text{ МПа}$ .

**Указание.** Задание выполнить с помощью  $is$ -диаграммы водяного пара [3].

### Домашнее задание № 8

### «Истечение водяного пара из сопла»

При начальных давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  водяной пар вытекает в среду с давлением  $p_2$ .

Истечение водяного пара происходит:

а) из суживающегося сопла;

б) из сопла Лаваля.

вариант	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_1$ , МПа	0,6	1,0	0,8	1,2	1,5	2,0	3,0	1,8	2,4	2,8	1,4	2,6	1,8
$t_1$ , °С	300	350	200	260	280	400	360	240	320	250	220	340	300
$p_2$ , МПа	0,12	0,14	0,1	0,14	0,12	0,1	0,14	0,12	0,1	0,14	0,12	0,1	0,12
$\xi$	0,07	0,05	0,08	0,04	0,06	0,045	0,03	0,035	0,055	0,05	0,07	0,04	0,05

#### Определить:

1. Теоретическую скорость истечения водяного пара;
2. Действительную скорость истечения, при коэффициенте потерь энергии  $\xi$ .

## 2.6. Курсовая работа

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

4 семестр

«Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь» выполняется во втором семестре. В курсовой работе необходимо провести анализ реального цикла паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина методом коэффициентов полезного действия, а также энтропийным и эксергетическим методами. Титульный лист задания на курсовую работу приведен в приложении.

*«Теоретические основы теплотехники. Теплообмен»*

5 семестр

"Расчет теплообменного аппарата".

## 2.7. Перечень промежуточных форм контроля знаний.

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

К промежуточным формам контроля знаний относятся блиц-опрос на лекциях, тестирование и проверочные работы. Ниже представлен вариант тестовых заданий и проверочных работ по изучаемым темам.

### Задания для текущей проверки знаний

*По теме № 1*

1. Термодинамика изучает ...
2. Закрытая термодинамическая система – такая, ...

3. Основными параметрами состояния являются ..., единицы их измерения следующие ...
  4. Если известно  $V$  и  $p_{ВАК}$ , то  $p_{АВС}$  можно определить ...
  5. Термодинамическое равновесие – ...
  6. Экстенсивные параметры состояния – такие ... (приведите пример)
  7. Идеальный газ – это ...
- Можно ли считать воздух, азот, водород идеальными газами? При каких условиях?
8. Термическое уравнение состояние идеального газа для 1 кг газа записывается ...

*По теме № 2*

1. Укажите способы передачи энергии от одного тела к другому.
2. Работа – это...,  
Полная работа обозначается..., единица измерения...  
Удельная работа обозначается..., единица измерения...
3. Укажите графически работу расширения, чему она равна?

4. Укажите процесс, в котором работа:
  - отрицательна;
  - равна нулю.

5. Понятие «внутренняя энергия» включает в себя ...

6. Какое утверждение является верным, что это означает?
  - а) внутренняя энергия является функцией процесса;
  - б) внутренняя энергия является функцией состояния.
7. Какое утверждение является верным, что это означает?
  - а) работа является аддитивным параметром;
  - б) работа является интенсивным параметром.
8. Какое утверждение является справедливым для реальных газов:  
 $u=f_1(p,T)$ ;  $u=f_2(v,T)$ ;  $u=f_3(p,v)$ ;  $u=f_4(T)$
9. Запишите 1 закон термодинамики:
  - а) для закрытой системы;
  - б) для потока.

*По теме № 4*

1. Дайте определение удельной теплоемкости тела в процессе с постоянным объемом.
2.  $\tilde{c}$  – это...  
единица измерения ...
3. Если известна  $\tilde{c}$ ,  $c'$  можно определить...
4. В процессе при постоянном давлении и при  $c_p = const$  количество теплоты определяется ...
5. Для любого процесса при  $c = const$  изменение внутренней энергии можно определить...
6. Согласно молекулярно-кинетической теории теплоемкость газов зависит от ..., т.е. учитывается...
7. Для идеального газа справедливо следующее соотношение:  
 $c_p - c_v = R$   
 $R - c_v = c_p$   
 $c_p + c_v = R$   
 $R - c_p = c_v$
8. Средней теплоемкостью в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  называется...
9. Определить среднюю массовую теплоемкость водорода в процессе с постоянным давлением в интервале температур от  $150^0\text{C}$  до  $500^0\text{C}$ .
10. Если газовая смесь задана объемными долями, то молярная теплоемкость смеси определяется...

*По темам № 5 и 6*

1. Запишите соотношения между параметрами для изобарного процесса.
2. Процесс, в котором изменение внутренней энергии равно нулю – ...
3. Изобразите изохорный процесс в  $PV$ - диаграмме.
4. II закон термодинамики записывается ...
5. Прямым циклом называется такой цикл, ...

*По теме № 10*

- 1.1. Цикл ДВС с подводом тепла при постоянном давлении  $T_s$ -координатах изображается...
- 1.2. Укажите, в каких процессах осуществляется подвод и отвод теплоты.
- 1.3. Процессы 1-2 и 4-1 – это процессы ...
- 1.4. Укажите теплоту, полезно используемую в цикле.
- 1.5. Как определяется термический КПД цикла?
2. Как определяется количество отведенного тепла в цикле Отто?
3. Укажите основные характеристики цикла ДВС со смешанным подводом тепла.

Проверочная работа № 1  
**«Параметры состояния. Газовые смеси»**

1. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,004$  МПа.

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют 735 мм рт. ст., а другом – 764 мм рт. ст.?

2. Определить молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем при нормальных физических условиях, а также объемный состав газовой смеси, если задан ее массовый состав: 7 %  $N_2$ , 8 %  $H_2$ , 51 %  $CH_4$ , 5 %  $O_2$ , 19 %  $CO$  и 10 %  $CO_2$ .

Проверочная работа № 2  
**«Уравнение состояния идеального газа, расчет теплоемкости газов»**

1. Компрессор подает сжатый воздух в резервуар, при этом давление в резервуаре, измеренное манометром, повышается от  $p_1 = 0$  до  $p_2 = 0,8$  МПа, а температура – 20 до 27° С. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар, если объем баллона  $V = 5$  м<sup>3</sup>, а барометрическое давление  $B = 750$  мм рт.ст. (Задачу решить в единицах СИ).

2. Определить средние массовую и объемную теплоемкость  $SO_2$  при постоянном давлении:

а) в пределах 350 – 1000 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

Проверочная работа № 3  
**«Изо процессы идеальных газов»**

1. 3 кг воздуха с начальными температурой  $t_1 = 12^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,9\text{ МПа}$  нагреваются при постоянном объеме до температуры  $t_2 = 375^\circ\text{C}$ . Определить конечное давление газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2.  $4\text{ м}^3$  окиси углерода с начальной температурой  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,2\text{ МПа}$  адиабатно сжимается так, что внутренняя энергия каждого килограмма газа увеличивается на  $10\text{ кДж}$ . Определить количество газа, а также конечные параметры и изменение его энтальпии.

#### Проверочная работа № 4

##### «Циклы двигателей внутреннего сгорания. Расчет компрессора»

1. Двигатель работает по циклу с подводом теплоты в процессе  $v = \text{const}$ . Начальная температура рабочего тела, обладающего свойствами воздуха,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , давление  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,6$ .

При сгорании выделяется энергия в количестве  $900\text{ кДж/кг}$ . Определить параметры в характерных точках цикла, термический КПД, полученную работу и количество отведенной теплоты.

2. Производительность компрессора  $V_K = 700\text{ м}^3$  воздуха в час; начальные параметры воздуха:  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ; конечное давление  $p_2 = 0,6\text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора, если сжатие будет производиться изотермически. На сколько возрастет теоретическая мощность двигателя, если сжатие в компрессоре будет совершаться по адиабате?

#### Проверочная работа № 5

##### «Водяной пар»

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 12\text{ бар}$ ,  $v = 0,1912\text{ м}^3/\text{кг}$

б)  $p = 13\text{ бар}$ ,  $t = 185^\circ\text{C}$ .

2. В резервуаре объемом  $V = 5\text{ м}^3$ , находится влажный пар со степенью сухости  $x = 0,3$ . Определить массу влажного пара, объем, занимаемый водой, и объем, занимаемый сухим насыщенным паром. Давление в резервуаре  $p = 19\text{ МПа}$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение  $1\text{ кг}$  пара при  $p = 1,5\text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,96$ , если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 25^\circ\text{C}$ .

#### Проверочная работа № 6

##### «Циклы паротурбинных установок»

1. Сравнить термический к.п.д. цикла Ренкина, регенеративного цикла с одним отбором при давлении пара 2,6 МПа и регенеративного цикла с двумя отборами при давлениях пара 2,6 МПа и 0,12 МПа. Для всех трех случаев начальные параметры пара  $p_1 = 18 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ .

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 3 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 380 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 3,5 \text{ кПа}$ , обеспечивает отбор пара  $D_{от} = 5 \text{ кг/с}$  при давлении  $p_{от} = 0,4 \text{ МПа}$ .

Определить расход пара на турбину, если известны электрическая мощность турбины  $N_e = 8 \text{ 000 кВт}$ , внутренние относительные к.п.д. части высокого давления (до отбора) и части низкого давления (после отбора)  $\eta'_{oi} = \eta''_{oi} = 0,79$  и механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в  $is$ -диаграмме.

#### Проверочная работа № 7 «Циклы холодильных установок»

1. Воздушная холодильная установка, работающая в интервале температур между  $t_1 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , имеет холодопроизводительность  $Q_0 = 180 \text{ кДж/с}$ . Давление воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , давление после сжатия в компрессоре  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ . Определить мощность привода компрессора, мощность детандера, количество тепла, передаваемое охлаждающей воде, и расход холодильного агента. Считать, что установка работает по идеальному циклу.

2. Холодопроизводительность парокомпрессионной холодильной установки с редукционным вентилем, работающей на фреоне-12, составляет  $140 \text{ кДж/с}$ . Установка работает в интервале температур от  $t_1 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , пар фреона-12 выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность фреона-12, холодильный коэффициент цикла, а также расход хладагента и теоретическую мощность привода компрессора.

#### Проверочная работа № 8 «Влажный воздух»

1. При определении состояния влажного воздуха с помощью психрометра зафиксировано, что «сухой» термометр показывает  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а «мокрый»  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Найдите влагосодержание  $d$ , относительную влажность  $\varphi$ , энтальпию  $h$ , а также температуру точки росы для этого воздуха.

2. В сушильной установке производится подсушка топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. От начального состояния с температурой  $t = 20^{\circ} \text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi = 40\%$  воздух предварительно подогревается до температуры  $80^{\circ} \text{C}$  и далее направляется в сушильную камеру, где в процессе высушивания топлива воздух охлаждается до  $35^{\circ} \text{C}$ .

Рассчитайте необходимое количество теплоты  $q$  для нагревания 1 кг воздуха, параметры воздуха на выходе из сушильной камеры и количество воды, которое отбирает каждый килограмм воздуха от топлива. Считать, что тепловые потери отсутствуют.

## 2.7. Вопросы к экзаменам 3,4,5 семестры

*«Теоретические основы теплотехники. Термодинамика»*

1. Предмет и метод термодинамики. Основные понятия и определения: термодинамическая система (открытая, закрытая; адиабатная; замкнутая), равновесное и неравновесное состояние т/д системы, гомогенная, гетерогенная т/д система; термодинамический процесс; окружающая среда, рабочее тело.
2. Идеальный газ, основные параметры состояния. Термическое уравнение состояния идеального газа.
3. Энергия, ее виды. Теплота и работа как способы передачи энергии.
4. Первый закон термодинамики для неподвижного газа. Энтальпия, ее свойства.
5. Теплоемкость газов; массовая, молярная, объемная теплоемкости, связь между ними; изохорная, изобарная; истинная и средняя теплоемкости; способы определения теплоемкости.
6. Смеси идеальных газов. Способы задания смесей. Расчет газовой постоянной и теплоемкости смеси.
7. Термодинамические процессы идеальных газов (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, политропный).
8. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.
9. Энтропия, диаграмма T-S. Расчет изменения энтропии.
10. Понятие цикла, прямой, обратный цикл. Порядок исследования циклов тепловых двигателей.
11. Цикл Карно. Понятие термического КПД.
12. Обобщенный цикл Карно.
13. Элементы термодинамики движущегося газа. Массовый и объемный расходы. Уравнение неразрывности.
14. Первый закон термодинамики для движущегося газа.
15. Основные закономерности соплового и диффузорного течений. Режимы течения.
16. Расчет скорости истечения. Критический режим течения, критические параметры.



17. Определение расхода. Максимальный расход.
18. Сверхкритический режим истечения. Сопло Лаваля.
19. Действительный процесс истечения газов. Коэффициент скорости, коэффициент расхода.
20. Дросселирование идеальных газов.
21. Циклы ДВС с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении. Цикл ДВС со смешанным подводом тепла.
22. ГТУ с подводом тепла при постоянном давлении. Цикл ГТУ с регенерацией тепла.
23. Цикл ГТУ со ступенчатым сжиганием топлива и ступенчатым расширением.
24. Реальные газы, их свойства. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.
25. Водяной пар. Основные понятия и определения.
26.  $Pv$ -диаграмма водяного пара. Основные параметры жидкости, насыщенного и перегретого пара.
27.  $Ts$ - и  $is$ - диаграммы водяного пара. Таблицы водяного пара.
28. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный).
29. Истечение водяного пара.
30. Дросселирование водяного пара.
31. Цикл Карно для водяного пара.
32. Цикл Ренкина, его термический КПД.
33. Влияние основных параметров на КПД цикла Ренкина.
34. Цикл со вторичным перегревом пара.
35. Регенеративный цикл паротурбинной установки.
36. Теплофикационный цикл. Принципиальная схема ТЭЦ.
37. Внутренний относительный КПД паровой турбины. Эффективный КПД паротурбинной установки.
38. Бинарные циклы.
39. Циклы парогазовых установок.
40. Циклы установок с магнетогидродинамическими генераторами.
41. Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.
42. Работоспособность термодинамической системы. Эксергетический метод анализа эффективности циклов.
43. Основные понятия о работе холодильных установок. Обратный цикл Карно.
44. Цикл воздушной холодильной установки.
45. Цикл паровой компрессорной холодильной установки.
46. Циклы парожеткторных и абсорбционных холодильных установок.
47. Тепловой насос.
48. Влажный воздух. Основные понятия и определения.
49.  $Id$ - диаграмма влажного воздуха.

### **Критерии оценки знаний студентов**

Итоговой формой контроля знаний студентов по данной дисциплине является экзамен. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса по изученному курсу и задачу. В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по пятибалльной системе.

Оценка «отлично» ставится в случае правильных и полных ответов на оба теоретических вопроса билета и правильного решения задачи.

Оценка «хорошо» ставится в случае:

- правильного, но неполного ответа на один из теоретических вопросов билета, требующего уточняющих дополнительных вопросов со стороны преподавателя или ответа, содержащего ошибки принципиального характера, которые студент исправляет после замечаний (дополнительных вопросов) преподавателя; правильного решения задачи;

- правильных и полных ответа на оба теоретических вопроса билета; затруднений при решении задачи, с которыми студент справляется после помощи преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» ставится в случае:

- ответов, содержащего ошибки принципиального характера на теоретические вопросы билета; правильного решения задачи;

- неверного ответа (отсутствия ответа) на один из теоретических вопросов билета; решения задачи после незначительной помощи преподавателя;

- правильных и полных ответов на оба теоретических вопроса билета; неверного решения задачи (не справился с задачей после помощи преподавателя).

Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае:

неверных ответов (отсутствия ответов) на оба теоретических вопроса билета;

неверного ответа (отсутствия ответов) на один из теоретических вопросов билета и неверного решения задачи.

#### *«Теоретические основы теплотехники. Теплообмен»*

1. Основные понятия и определения теплопередачи (способы переноса тепла, тепловой поток).

2. Температурное поле. Закон Фурье, коэффициент теплопроводности.

3. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

4. Условия однозначности для процессов теплопроводности.

5. Уравнение для стационарной теплопроводности.

6. Теплопроводность плоской стенки.

7. Теплопередача через плоскую стенку.

8. Теплопроводность цилиндрической стенки.

9. Теплопередача через цилиндрической стенку.

10. Теплопроводность и теплопередача через шаровую стенку.

11. Критический диаметр цилиндрической стенки.

12. Тепловая изоляция.

14. Пути интенсификации теплопередачи. Теплопередача через ребристую стенку.
15. Теплопроводность в стержне постоянного сечения.
16. Аналитическое описание нестационарных процессов теплопроводности.
18. Охлаждение неограниченной пластины.
19. Анализ решения Охлаждение неограниченной пластины
20. Определение количества теплоты, отданного пластиной в процессе охлаждения.
21. Охлаждение и нагревание тел конечных размеров.
22. Зависимость процесса охлаждения (нагрева) от формы тела.
23. Регулярный режим охлаждения (нагрева) тела.
24. Основные понятия и определения конвективного теплообмена.
25. Основные физические свойства жидкости.
26. Дифференциальные уравнения неразрывности к движения для однородной жидкости,
27. Дифференциальное уравнение теплообмена.
28. Краевые условия, используемые для решения задач конвективного теплообмена.
28. Основные понятия и определения конвективного теплообмена
29. Основные Физические свойства жидкости
30. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена
31. Краевые условия
32. Гидравлический и тепловой пограничные слои
33. Основные положения теории подобия, условия гидродинамического и теплового подобия. Физический смысл основных чисел подобия.
34. Обработка и обобщение результатов опытов.
35. Эмпирические формулы в критериальном виде
36. Теплоотдача при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве.
37. Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве.
38. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности
39. Особенности движения и теплообмена в трубах.
40. Теплоотдача, при ламинарном и турбулентном движении жидкости в горизонтальных трубах.
41. Теплоотдача при течении жидкости в трубах некруглого сечения изогнутых и шероховатых трубах.
42. Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании одиночной трубы.
43. Теплоотдача при поперечном вынужденном обтекании пучков труб.
44. Теплообмен при конденсации чистого пара: основные положения, виды конденсации.
45. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного газа.

46. Зависимость конденсации от перегрева пара, состояния поверхности, содержания в паре неконденсирующихся газов, скорости и направления течения пара, влияние компоновки поверхности нагрева.
47. Теплоотдача при конденсации пара в трубах.
1. Основные понятия и определения из теории кипения, режимы кипения.
49. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме,
50. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в условиях вынужденной конвекции в трубах.
51. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена.
52. Тепло - и массоотдача.
53. Аналогия процессов теплообмена и массообмена.
54. Тепло- и массообмен при конденсации пара из газовой смеси.
55. Тепло- и массообмен при испарении в парогазовую среду.
56. Основные сведения о тепло и массообмене при химических превращениях.
57. Описание процесса излучением. Основные понятия и определения.
58. Основные законы теплового излучения
59. Теплообмен излучением между телами.
60. Теплообмен излучением при наличии экранов.
61. Тепловое излучение газов.
62. Теплообмен излучением между газом и оболочкой.
63. Закон Бугера.
64. Классификация теплообменных аппаратов.
65. Основные положения и уравнения теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов.
66. Средняя разность температур и методы ее вычисления.
67. Расчет конечных температур рабочих жидкостей.
68. Общие сведения о тепловом расчете регенеративных теплообменных аппаратов.
69. Задачи гидромеханического расчета теплообменных аппаратов.
70. Гидравлическое сопротивление элементов теплообменного аппарата. Расчет мощности, необходимой для перемещения теплоносителей.
71. Способы теплообмена.
72. Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решение.
73. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.
74. Применение методов подобия и размерности к изучению процессов конвективного теплообмена.
75. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекании трубы и пучков труб.
76. Расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции.
77. Теплообмен при фазовых превращениях, теплообмен излучением, сложный теплообмен.
78. Массообмен: поток массы компонента.

79. Вектор плотности потока массы.
80. Молекулярная диффузия: концентрационная диффузия, закон Фика.
81. Термо- и бародиффузия.
82. Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.

### 3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### Основная литература:

1. Теплотехника: учеб./под ред. А.П. Баскакова. – 3-е изд., перераб. и доп.. – М.: БАСТЕТ, 2010. – 326 с.. – Библиогр.: с. 321.
2. Ерохин, Виктор Георгиевич. Основы термодинамики и теплотехники [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько, 2009. - 224 с.

#### Дополнительная литература:

1. Гриценко, М. В. Термодинамика [Текст] : рук. по выполнению курсовой работы: учеб. пособие / М. В. Гриценко, 2007. - 88 с.
2. Гриценко, М. В. Теплотехника [Текст] : Лабораторный практикум / М. В. Гриценко, А. В. Гриценко, 2006. - 132 с.
3. Теплопередача [Текст] : учеб. пособие / под ред. В. С. Чередниченко, 2004. - 199 с.
4. Александров, А. А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок [Текст] : учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ / А. А. Александров, 2004. - 159 с.
5. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену [Текст] : учеб. пособие : рек. УМО / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко, 2008. - 196 с.
6. Осипов, Н.Е. Теплотехника: учеб. справ./ Н.Е. Осипов. – Липецк.: изд-во ЛКИ, 2008. – 82 с. (ЭБС Руконт).

#### Журналы:

1. Новости теплоснабжения.
2. Энергетик.
3. Теплоэнергетика.

#### программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.rucont.ru/">http://www.rucont.ru/</a>	Национальный цифровой ресурс Руконт - межотраслевая электронная библиотека на базе технологии Контекстум

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ**

Предметом изучения дисциплины "Теоретические основы теплотехники" являются закономерности взаимного превращения теплоты и работы, взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, а также процессы, происходящие в газах и парах и свойства этих тел при различных физических условиях. В теоретической части термодинамика является общим разделом науки об энергии, а в прикладной части представляет собой теоретический фундамент всей теплотехники, изучающей процессы, протекающие в тепловых двигателях.

Целью дисциплины является изучение законов термодинамики, ознакомление с основными термодинамическими свойствами рабочих тел и теплоносителей теплотехнических установок, методами расчета и анализа рабочих процессов и циклов теплотехнических установок с целью достижения их наивысшей энергетической эффективности; изучение закономерностей основных процессов переноса тепла и массы, освоение методов решения различных задач тепломассообмена, приобретение навыков экспериментального исследования процессов тепломассообмена посредством физического и математического моделирования.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:**

Дисциплина «Теоретические основы теплотехники» входит в цикл общих профессиональных дисциплин ОПД.Ф.09.

Выписка из стандарта:

Теоретические основы теплотехники:

термодинамика:

первый закон термодинамики; второй закон термодинамики; реальные газы; водяной пар; термодинамические свойства реальных газов;  $PV$ -диаграмма; таблицы термодинамических свойств веществ; истечения из сопел; дросселирование; циклы паротурбинных установок; тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки; газовые циклы; схемы, циклы и термический КПД двигателей и холодильных установок; эксергетический анализ циклов; основы химической термодинамики; основы термодинамики необратимых процессов.

теплообмен:

способы теплообмена; дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения; система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена; теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекании трубы и пучка труб; расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции; теплообмен при фазовых превращениях; теплообмен излучением, сложный теплообмен; массообмен: поток массы компонента; вектор плотности потока массы; молекулярная диффузия: концентрационная диффузия, закон Фика; термо- и бародиффузия; массоотдача, математическое описание и аналогия процессов массо- и теплообмена; теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.

Математика: дифференциальное и интегральное исчисления; дифференциальные уравнения; основы вычислительного эксперимента; уравнения математической физики.

Физика: молекулярная физика и термодинамика.

Химия: химическая термодинамика и кинетика: энергетика химических процессов, химическое и фазовое равновесие, скорость реакции и методы ее регулирования.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате изучения дисциплины в соответствии с квалификационной характеристикой выпускников, студенты должны

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

1) Знать:

первый и второй законы термодинамики; термодинамические свойства веществ; основные термодинамические процессы; процессы течения газов и жидкостей; теплосиловые газовые и паровые циклы; методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок; холодильные циклы; основы химической термодинамики.

Способы теплообмена. Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения. Систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, применение методов подобия и его размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы или пучка труб. Расчет коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции. Теплообмен при фазовых превращениях. Теплообмен излучением, сложный теплообмен. Массообмен. Массоотдача, математическое описание и аналогия процессов массо и теплообмена. Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов. Основы химической термодинамики

2) Уметь:

применять уравнения и справочную литературу для определения термодинамических свойств различных веществ; рассчитывать величины, характеризующие преобразование энергии в термодинамических процессах и циклах теплотехнических установок; вычислять показатели энергетической эффективности прямых и обратных термодинамических циклов; анализировать влияние изменения термодинамических параметров рабочего тела на энергетическую эффективность различных теплотехнических установок.

Применять уравнения и справочную литературу для расчета различных задач теплообмена;

Рассчитывать температурное поле и тепловые потоки в твердых телах, а также в потоках жидкости и газа;

Рассчитывать величины, характеризующие интенсивность процессов теплообмена, анализировать различные факторы, влияющие на процессы теплообмена;

Математически сформулировать конкретную задачу теплообмена и выполнять ее решение путем физического или математического моделирования;

Выполнять тепловой расчет теплообменных аппаратов.

3) Владеть: методами расчета термодинамических процессов и тепловых потоков; методами расчета параметров различных теплотехнических установок и теплообменных аппаратов.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ.

##### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля
		Лекции	Практические занятия (час.)	Лабораторные занятия (час.)	СРС	
<b>Семестр 3</b>						
1	<i>Раздел 1 Первый закон термодинамики</i>	12	8	8	8	Посещение лекций. Отчеты по выполнению лабораторных работ. Тестирование. Контрольная работа по модулю 1
2	<i>Раздел 2 Второй закон термодинамики</i>	6	2	2	12	Посещение лекций.



	<i>мики</i>					<b>Отчеты по выполнению лабораторных работ. Тестирование. Контрольная работа по модулям 1 и 2.</b>
<b>3</b>	<i>Раздел 3 Третий закон термодинамики. Процессы в газах</i>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>Посещение лекций. Отчеты по выполнению лабораторных работ. Тестирование. Контрольная работа по модулю 3.</b>
<b>Семестр 4</b>						
<b>4</b>	<i>Раздел 4 Паро-турбинные установки</i>	<b>18</b>	<b>8</b>		<b>20</b>	<b>Посещение лекций. Тестирование. Контрольная работа по модулю 4.</b>
	<i>Раздел 5 Конденсация</i>	<b>18</b>	<b>10</b>		<b>24</b>	<b>Тестирование. Защита курсовой Работы.</b>

### **БЛОК «ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы			Формы текущего контроля
		Лекции (час.)	Практические занятия (час.)	Лаб. работы	
1	Раздел 1. Теплообмен и способы его описания. Тема 1. Основные понятия и исходные положения теплообмена. Тема 2. Дифференциальное уравнение теплопро-	36	18	18	<b>Тестирование.</b> Блиц-опрос на лекциях. Контрольная работа. Всего 34 часа

	водности и его решения. Тема 3. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена.				
2	Раздел 2. Виды теплообмена при различных физических явлениях. Тема 4. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы и пучка труб. Тема 5. Расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции. Тема 6. Теплообмен при фазовых превращениях.	18	9	9	<b>Тестирование.</b> Блиц-опрос на лекциях. Контрольная работа. Всего 32 часа
3	Часть 3. Методы расчета теплообмена. Тема 7. Теплообмен излучение, сложный теплообмен. Тема 8. Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.	18	9	9	<b>Тестирование.</b> Блиц-опрос на лекциях. Контрольная работа. Всего 28 часов

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1 ЛЕКЦИИ

#### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»

##### *Семестр 3*

##### *Раздел 1 Первый закон термодинамики*

*Тема 1* Основные понятия и исходные положения термодинамики. Предмет и метод термодинамики. Термодинамическая система и окружающая среда. Параметры состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные состояния и процессы. Термодинамическое равновесие. Идеальный газ.

Основные законы идеального газа. Термическое уравнение состояния идеального газа. Универсальное уравнение состояния идеального газа.

*Тема 2* Первый закон термодинамики.

Теплота и работа как способы передачи энергии. Уравнение работы газа при расширении. Внутренняя энергия. Обратимые и необратимые процессы. Аналитические выражения первого закона термодинамики. Уравнение первого закона для стационарного потока массы.

*Тема 3* Смеси идеальных газов.

Способы задания состава смеси. Расчет термодинамических свойств смеси идеальных газов по свойствам компонентов.

*Тема 4* Энтальпия. Теплоемкость газов.

Свойства энтальпии, ее физический смысл. Теплоемкость газов. Изохорная и изобарная теплоемкости. Молекулярно-кинетическая и квантовая теории теплоемкости газов. Истинная и средняя теплоемкости.

*Тема 5* Основные процессы идеальных газов.

Порядок исследования термодинамических процессов. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Адиабатный процесс. Политропные процессы.

*Раздел 2 Второй закон термодинамики*

*Тема 6* Второй закон термодинамики.

Основные положения второго закона. Круговые термодинамические процессы, или циклы. Термический коэффициент полезного действия. Прямой обратимый цикл Карно. Теорема Карно. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно.

Ts-диаграмма и ее свойства. Термодинамические циклы в Ts-диаграмме. Свойства обратимых и необратимых циклов. Изменение энтропии в них. Принцип возрастания энтропии и физический смысл второго закона термодинамики. Максимальная работа. Эксергия. Потеря эксергии в необратимых процессах. Энтропия и термодинамическая вероятность. Характеристические функции. Химический потенциал. Общие условия термодинамического равновесия. Основные дифференциальные уравнения термодинамики.

*Раздел 3 Третий закон термодинамики. Процессы в газах*

*Тема 7* Третий закон термодинамики.

Формулировки и аналитическое выражение третьего закона термодинамики. Гипотеза Планка. Абсолютная энтропия. Следствия третьего закона термодинамики.

*Тема 8* Процессы течения газов.

Истечения из сопел. Основные уравнения процессов течения. Скорость звука. Истечение из суживающихся сопел. Максимальный расход и критическая скорость. Переход через скорость звука. Сопло Лавая. Истечение с учетом необратимости. Коэффициенты скорости и расхода. Параметры полного адиабатного торможения.

Дросселирование. Дросселирование идеального газа.

*Тема 9* Процессы сжатия в компрессоре.

Работа одноступенчатого компрессора. Теоретическая индикаторная диаграмма. Действительная индикаторная диаграмма. Процессы сжатия в реальном компрессоре. Многоступенчатый компрессор.

*Тема 10* Газовые циклы.

Индикаторная диаграмма и цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания. Циклы с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении и смешанным подводом тепла. КПД циклов и их термодинамический анализ.

Принципиальная схема газотурбинной установки. Цикл газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном давлении. Термический КПД идеального цикла. Действительный цикл и его КПД. Влияние необратимости процессов сжатия и расширения. Регенерация, многоступенчатое сжатие и ступенчатый подвод тепла в газотурбинной установке.

*Тема 11* Реальные газы.

Термодинамические свойства реальных газов.  $PV$ -диаграмма. Фактор сжимаемости и  $zP$ -диаграмма. Фазовая  $pT$ -диаграмма. Таблицы термодинамических свойств веществ. Условия фазового равновесия. Правило фаз Гиббса. Уравнение Менделеева-Клаузиуса.

Вириальное уравнение для умеренно сжатых газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Принцип соответственных состояний и подобие термодинамических свойств веществ. Газовые циклы

*Семестр 4*

*Раздел 4 Паротурбинные установки*

*Тема 12* Водяной пар.

Водяной пар. Удельный объем, энтальпия и энтропия воды, влажного, сухого насыщенного и перегретого пара. Сверхкритическая область состояния пара. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, других веществ.  $Ts$ -диаграмма и  $hs$ -диаграмма для водяного пара. Изопроцессы водяного пара.

Истечение водяного пара. Дросселирование водяного пара.

*Тема 13* Циклы паротурбинных установок.

Цикл Карно на влажном паре. Принципиальная схема паротурбинной установки. Цикл Ренкина. Изображение цикла Ренкина в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Термический КПД цикла. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла. Необратимое расширение пара в турбине. Тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки.

Цикл и схема паротурбинной установки со вторичным перегревом пара. Изображение цикла в  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах. КПД цикла. Регенеративный подогрев питательной воды. Термический КПД регенеративного цикла. Комбинированная выработка электроэнергии и тепла. Теплофикационные циклы.

Циклы атомных станций с водяным теплоносителем. Цикл насыщенного пара с промежуточной сепарацией и перегревом пара.

*Тема 14* Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.

О методах анализа эффективности циклов. Методы сравнения термических КПД обратимых циклов. Метод коэффициентов полезного действия в анализе необратимых циклов. Энтропийный метод расчета потерь работоспособности в необратимых циклах. Эксергетический анализ циклов. Эксергетический метод расчета потерь работоспособности.

*Тема 15* Комбинированные циклы.

Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела паротурбинных установок. Принципиальная схема, цикл и КПД паро-паровой бинарной установки. Схемы и циклы парогазовых установок.

Прямое преобразование тепла в электроэнергию. Цикл МГД установки.

*Раздел 5 Конденсация*

*Тема 16* Циклы холодильных установок.

Обратные циклы. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Принципиальная схема и цикл воздушной холодильной установки. Схемы, циклы и термический КПД двигателей и холодильных установок. Принципиальная схема и цикл парокомпрессионной холодильной установки.

Цикл термотрансформатора (теплового насоса). Отопительный коэффициент.

*Тема 17* Влажный воздух.

Абсолютная и относительная влажность влажного воздуха. Влагосодержание. Температура и точка росы. Расчет термодинамических свойств влажного воздуха.  $h$ -диаграмма влажного воздуха. Термодинамические процессы с влажным воздухом.

*Тема 18* Основы химической термодинамики.

Основы химической термодинамики; основы термодинамики необратимых процессов. Тепловой эффект химической реакции. Закон Гесса. Константа химического равновесия и изменение термодинамического потенциала. Зависимость константы равновесия от температуры.

## **БЛОК «ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

*Семестр 4*

**Раздел 1 «Теплообмен и способы его описания»**

**Тема 1. Основные понятия и исходные положения тепломассообмена.** Способы тепло- и массопереноса: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Феноменологический метод изучения явлений тепло- и массообмена. Определение основных понятий: температурное поле, градиент температуры, тепловой поток, плотность теплового потока. Вектор плотности теплового пото-

ка. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел.

**Тема 2. Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения.** Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Коэффициент теплопроводности, Закон Ньютона-Рихмана. Перенос тепла в плоской стенке при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности. Теплопередача через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки. Критический диаметр тепловой изоляции. Передача тепла через шаровую стенку. Оребрение поверхности нагрева, как способ интенсификации процесса теплопередачи. Перенос тепла по стержню (ребру). Тепловой поток с поверхности стержня (ребра). Теплопередача через оребренную стенку. Коэффициент эффективности ребра. Численные методы решения задач стационарной теплопроводности. Температурное поле в процессе охлаждения (нагрева) пластины. Метод Фурье. Безразмерная форма решения задачи о нестационарной теплопроводности пластины. Число Био. Безразмерное время (число Фурье). Температурное поле в процессе охлаждения (нагрева) бесконечно длинного цилиндра, шара и некоторых тел конечных размеров. Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров и произвольной формы. Регулярный режим охлаждения. Определение теплофизических свойств материалов методом регулярного режима.

**Тема 3. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена.** Математическое описание процесса конвективного теплообмена: дифференциальные уравнения энергии, движения, неразрывности. Физические свойства жидкостей и газов, существенные для процесса конвективного теплообмена. Классификация теплоносителей по числу Прандтля. Безразмерный вид математического описания конвективного теплообмена. Безразмерные комплексы: число Рейнольдса, число Грасгофа, число Рэлея, число Ниссельта, число Фурье, число Эйлера, число Прандтля, число БИО, число Фруда, число Пекле. Теория подобия и размерности. Пи – теорема. Пограничный слой. Турбулентность. Рейнольдсовы преобразования дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Турбулентная теплопроводность. Турбулентная вязкость. Турбулентное число Прандтля.

### *Семестр 5*

#### **Раздел 2 «Виды теплообмена при различных физических явлениях»**

**Тема 4. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы и пучка труб.** Теплообмен и сопротивление при ламинарном и турбулентном пограничном слое на пластине. Теплообмен при вынужденном внешнем обтекании трубы и пучка труб. Теплообмен при движении теплоносителей в трубах и каналах. Первое начало термодинамики для течения в трубах. Местный и средний коэффициенты теплоотдачи. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении в трубе. Вязкостный и

вязкостно-гравитационный режимы. Турбулентное движение в трубах. Формулы Михеева и Петухова. Теплоотдача при течении жидких металлов. Теплообмен при сверхкритическом состоянии жидкостей.

Интенсификация конвективного теплообмена при течении теплоносителя в трубах и каналах.

**Тема 5. Расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции.** Теплоотдача при свободном движении жидкости около тел (пластина, труба), находящихся в неограниченном объеме жидкости. Свободная конвекция в ограниченном объеме.

**Тема 6. Теплообмен при фазовых превращениях.** Теплообмен при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Теория Нуссельта. Поправочные коэффициенты к теории Нуссельта (на волновое течение и переменность физических свойств конденсата). Турбулентное течение пленки конденсата расчет коэффициента теплоотдачи. Теория Нуссельта для пленочной конденсации на горизонтальной трубе. Влияние скорости пара, состояние поверхности, влажности и перегрева пара, примесей воздуха в паре. Теплообмен при конденсации пара в трубах. Теплообмен при кипении жидкостей. Кривая кипения. Пузырьковое и пленочное кипение. Критический радиус пузырька. Скорость роста пузырька. Отрывной диаметр пузырька. Частота отрыва пузырьков. Расчет коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме. Критические тепловые нагрузки при кипении. Теплоотдача при пленочном кипении.

### **Раздел 3 «Методы расчета теплообмена»**

**Тема 7. Теплообмен излучение, сложный теплообмен.** Физическая природа, понятия и законы теплового излучения. Интегральный и спектральные характеристики энергии излучения: поток, плотность потока и интенсивность излучения. Метод многократных отражений и метод полных потоков излучения. Классификация потоков излучения. Лучистый теплообмен между двумя безграничными пластинами, двумя концентрическими сферами и произвольно расположенными телами. Угловые коэффициенты излучения. Теоретические основы современных зональных методов расчета теплообмена излучением. Интегральные уравнения излучения. Основы методов расчета теплообмена излучением от излучающей и поглощающей среды к поверхностям нагрева теплообменных устройств. Поглощательная способность и степень черноты среды (продуктов сгорания). Понятие о методах расчета сложного теплообмена (радиоационно-кондуктивного и радиоационно-конвективного).

**Тема 8. Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов.** Классификация теплообменных аппаратов. Характерные конструктивные схемы теплообменных аппаратов. Основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках: прямоток, противоток, перекрестный ток, смешанная схема и многократный перекрестный ток.

## 5.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»

Наименование темы

*Семестр 3*

1. Параметры состояния.
2. Законы и уравнения состояния идеальных газов
3. Первый закон термодинамики
4. Теплоемкость, энтальпия и внутренняя энергия идеальных газов
5. Основные процессы идеальных газов.
6. Второй закон термодинамики
7. Истечение и дроселирование газов
8. Расчет компрессоров
9. Циклы двигателей внутреннего сгорания
10. Циклы газотурбинных установок

*Семестр 4*

11. Реальные газы. Свойства воды и водяного пара. Процессы изменения состояния водяного пара
12. Истечение и дроселирование паров
13. Циклы паротурбинных и парогазовых установок
14. Циклы холодильных машин
15. Влажный воздух
16. Элементы термодинамики химических процессов

### БЛОК «ТЕПЛОМАСООБМЕН»

4 семестр

1. Теплопроводность при стационарном режиме
2. Теплопроводность при нестационарном режиме
3. Основные положения конвективного теплообмена, теория подобия.
4. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности.
5. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб.
6. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.
7. Теплоотдача при свободном движении жидкости.

5 семестр

8. Конвективный тепло- и массообмен
9. Теплоотдача при конденсации пара
10. Теплоотдача при кипении однокомпонентных жидкостей
11. Тепловое излучение
12. Расчет теплообменник аппаратов



### 5.3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

#### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»

1. Определение изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении.
2. Изучение термодинамических процессов идеальных газов.
3. Исследование процесса адиабатного истечения газов через сужающееся сопло.
4. Исследование циклов паротурбинных установок.
5. Исследование процессов во влажном воздухе.

#### БЛОК «ТЕПЛОМАССОБМЕН»

1. Определение коэффициента теплопроводности твердых материалов методом пластины
2. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе
3. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра
4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра в атмосфере различных газов
5. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом
6. Исследование работы теплообменного аппарата

### 5.4 КУРСОВАЯ РАБОТА

#### «Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь»

##### Содержание

1. Описание принципиальной схемы тепловой электростанции и принцип действия основных её элементов: котла, турбины, конденсатора
2. Исходные данные
3. Термодинамический анализ обратимого цикла Ренкина
4. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь с помощью метода тепловых потоков
5. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь с помощью энтропийного метода
6. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь эксергетическим методом
7. Сравнение результатов анализа необратимого цикла Ренкина по трем методам

Простейшая ПСУ, схема которой показана на рисунке 1, состоит из парового котла *ПК* с пароперегревателем *ПП*, паровой турбины *ПТ*, конденсатора *К* и насоса *Н*.

1-2 – процесс адиабатного расширения пара в турбине

2-3 – процесс конденсации пара в конденсаторе

3-4 – процесс адиабатного повышения давления воды в насосе

4-5 – процесс нагрева жидкости до температуры кипения

5-6 – процесс парообразования

6-1 – процесс перегрева пара

2. Исходные данные:

Температура пара перед турбиной:	$t_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$
Давление пара перед турбиной:	$P_1 = 16,67 \text{ МПа}$
Давление пара в конденсаторе:	$P_2 = 0,004 \text{ МПа}$
Параметры окружающей среды:	$t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
	$P_0 = 0,098 \text{ МПа}$
Температура горячего источника (в потоке)	$t_t = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$
Относительный внутренний КПД турбины:	$\eta_{0i}^m = 0,85$
Относительный внутренний КПД насоса:	$\eta_{0i}^h = 0,90$
Механический КПД турбины:	$\eta_m = 0,97$
КПД электрогенератора:	$\eta_g = 0,98$
КПД паропровода:	$\eta_{пп} = 0,99$
КПД котла:	$\eta_{к.а.} = 0,91$
Низшая теплота сгорания топлива (Уголь Минусинский, экибастузское СС)	$Q_n^p = 17920 \text{ кДж/кг}$
Мощность установки	$N = 150000 \text{ кВт}$

Рис. 1 Схема паросиловой установки

- 1 – котлоагрегат с пароперегревателем
- 2 – паропровод
- 3 – турбогенераторная установка
- 4 – конденсатор
- 5 – насос

## 6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
<i>Семестр 3</i>			
1	<b>Раздел 1 Первый закон термодинамики</b>	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Подготовка к контрольной по модулю.	8
2	<b>Раздел 2 Второй закон термодинамики</b>	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Выполнение расчетно-графической работы Подготовка к контрольной работе по модулям 1 и 2.	12
3	<b>Раздел 3 Третий закон термодинамики. Процессы в газах</b>	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Подготовка к контрольной работе по модулю 3.	10
<i>Семестр 4</i>			
4	<b>Раздел 4 Паротурбинные установки</b>	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Выполнение курсовой работы Подготовка к контрольной работе по модулю 4.	20
5	<b>Раздел 5 Конденсация</b>	Подготовка отчетов по выполнению практических работ. Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Выполнение курсовой работы Подготовка к контрольной работе по модулю 5.	24

### БЛОК «ТЕПЛОМАССОБМЕН»

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
<i>Семестр 4</i>			
1	Раздел 1. Теплообмен и способы его описания.	<b>Подготовка к выполнению практических работ.</b> <b>Подготовка отчетов по выполнению лабораторных работ.</b> <b>Подготовка к контролируемому тесту по модулю.</b> Подготовка к контрольной работе.	34
<i>Семестр 5</i>			
2	Раздел 2. Виды теплообмена при различных физических явлениях.	<b>Подготовка к выполнению практических работ.</b> <b>Подготовка отчетов по выполнению лабораторных работ.</b> <b>Подготовка к контролируемому тесту по модулю.</b> Подготовка к контрольной работе.	32
3	Раздел 3. Методы расчета теплообмена.	<b>Подготовка к выполнению практических работ.</b> <b>Подготовка отчетов по выполнению лабораторных работ.</b> <b>Подготовка к контролируемому тесту по модулю.</b> <b>Подготовка к контрольной работе.</b>	28

### 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Наилучшей гарантией глубокого и прочного усвоения дисциплины «Теоретические основы теплотехники» является заинтересованность студентов в приобретении знаний. Поэтому для поддержания интереса студентов к процессам и технологиям получения и обработки материалов необходимо использовать различные образовательные технологии и задействовать все атрибуты процесса научного познания.

При преподавании дисциплины «Теоретические основы теплотехники» используется технология модульного обучения.

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция». Где перед изучением модуля обозначается проблема, на решение которой будет направлен весь последующий материал модуля.

При проведении практических занятий можно использовать либо «Мозговой штурм», либо «Метод Дельфи», которые будут направлены на вовлечение всех студентов в решении конкретных задач.

При выполнении работ используются следующий прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы имитирующей реальное событие; обсуждение с преподавателем цели работы и хода ее выполнения; обсуждение и анализ полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы.

## **8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

### **8.1 Контролирующий тест**

Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

### **8.2 Контрольная работа**

Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным модулям семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

### **8.3 Курсовая работа**

Целью курсовой работы является самостоятельное освоение студентами методов расчетов режимов паротурбинной установки.

«Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь» выполняется в четвертом семестре. В курсовой работе необходимо провести анализ реального цикла паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина методом коэффициентов полезного действия, а также энтропийным и эксергетическим методами.

Курсовая работа «Расчет теплообменного аппарата» выполняется в 5 семестре.

### **8.4 Примерные экзаменационные вопросы БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА»**

Семестр 3

50. Предмет и метод термодинамики.

51. Основные понятия и определения: термодинамическая система (открытая, закрытая; адиабатная; замкнутая), равновесное и неравновесное состояние т/д системы, гомогенная, гетерогенная т/д система; термодинамический процесс; окружающая среда, рабочее тело.

52. Идеальный газ, основные параметры состояния.

53. Термическое уравнение состояния идеального газа.
54. Энергия, ее виды. Теплота и работа как способы передачи энергии.
55. Первый закон термодинамики для неподвижного газа. Энтальпия, ее свойства.
56. Теплоемкость газов; массовая, молярная, объемная теплоемкости, связь между ними; изохорная, изобарная; истинная и средняя теплоемкости; способы определения теплоемкости.
57. Смеси идеальных газов.
58. Способы задания смесей.
59. Расчет газовой постоянной и теплоемкости смеси.
60. Термодинамические процессы идеальных газов (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, политропный).
61. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.
62. Энтропия, диаграмма T-S. Расчет изменения энтропии.
63. Понятие цикла, прямой, обратный цикл.
64. Порядок исследования циклов тепловых двигателей.
65. Цикл Карно. Понятие термического КПД.
66. Обобщенный цикл Карно.
67. Элементы термодинамики движущегося газа.
68. Массовый и объемный расходы. Уравнение неразрывности.
69. Первый закон термодинамики для движущегося газа.
70. Основные закономерности соплового и диффузорного течений.
71. Режимы течения.
72. Расчет скорости истечения.
73. Критический режим течения, критические параметры.
74. Определение расхода.
75. Максимальный расход.
76. Сверхкритический режим истечения. Сопло Лаваля.
77. Действительный процесс истечения газов. Коэффициент скорости, коэффициент расхода.
78. Дросселирование идеальных газов.
79. Циклы ДВС с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении.
80. Цикл ДВС со смешанным подводом тепла.
81. ГТУ с подводом тепла при постоянном давлении.
82. Цикл ГТУ с регенерацией тепла.
83. Цикл ГТУ со ступенчатым сжиганием топлива и ступенчатым расширением.
84. Реальные газы, их свойства. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.

#### Семестр 4

1. Водяной пар. Основные понятия и определения.

2.  $Pv$ -диаграмма водяного пара. Основные параметры жидкости, насыщенного и перегретого пара.
3.  $Ts$ - и  $is$ - диаграммы водяного пара. Таблицы водяного пара.
4. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный).
5. Истечение водяного пара.
6. Дросселирование водяного пара.
7. Цикл Карно для водяного пара.
8. Цикл Ренкина, его термический КПД.
9. Влияние основных параметров на КПД цикла Ренкина.
10. Цикл со вторичным перегревом пара.
11. Регенеративный цикл паротурбинной установки.
12. Теплофикационный цикл. Принципиальная схема ТЭЦ.
13. Внутренний относительный КПД паровой турбины. Эффективный КПД паротурбинной установки.
14. Бинарные циклы.
15. Циклы парогазовых установок.
16. Циклы установок с магнетогидродинамическими генераторами.
17. Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.
18. Работоспособность термодинамической системы. Эксергетический метод анализа эффективности циклов.
19. Основные понятия о работе холодильных установок. Обратный цикл Карно.
20. Цикл воздушной холодильной установки.
21. Цикл паровой компрессорной холодильной установки.
22. Циклы парорезжекторных и абсорбционных холодильных установок.
23. Тепловой насос.
24. Влажный воздух. Основные понятия и определения.
25.  $Id$ - диаграмма влажного воздуха.

## **БЛОК «ТЕПЛОМАССООБМЕН»**

Семестр 4.

### **Вопросы к зачету\***

1. Основные понятия и определения теплопередачи (способы переноса тепла, тепловой поток).
2. Температурное поле. Закон Фурье, коэффициент теплопроводности.
3. Дифференциальное уравнение теплопроводности.
4. Условия однозначности для процессов теплопроводности.
5. Уравнение для стационарной теплопроводности.
6. Теплопроводность плоской стенки.
7. Теплопередача через плоскую стенку.
8. Теплопроводность цилиндрической стенки.



9. Теплопередача через цилиндрической стенку.
10. Теплопроводность и теплопередача через шаровую стенку.
11. Критический диаметр цилиндрической стенки.
12. Тепловая изоляция.
14. Пути интенсификации теплопередачи. Теплопередача через ребристую стенку.
15. Теплопроводность в стержне постоянного сечения.
16. Аналитическое описание нестационарных процессов теплопроводности.
20. Охлаждение неограниченной пластины.
21. Анализ решения Охлаждение неограниченной пластины
20. Определение количества теплоты, отданного пластиной в процессе охлаждения.
21. Охлаждение и нагревание тел конечных размеров.
22. Зависимость процесса охлаждения (нагревания) от Формы тела.
23. Регулярный режим охлаждения (нагревания) тела.
24. Основные понятия и определения конвективного теплообмена.
25. Основные физические свойства жидкости.
26. Дифференциальные уравнения неразрывности движения для однородной жидкости,
27. Дифференциальное уравнение теплообмена.
28. Краевые условия, используемые для решения задач конвективного теплообмена.
28. Основные понятия и определения конвективного теплообмена
29. Основные Физические свойства жидкости
30. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена
31. Краевые условия
32. Гидравлический и тепловой пограничные слои
33. Основные положения теории подобия, условия гидродинамического и теплового подобия. Физический смысл основных чисел подобия.
34. Обработка и обобщение результатов опытов.
35. Эмпирические формулы в критериальном виде.

### **Семестр 5.**

#### **Вопросы к экзамену**

1. Теплоотдача при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве.
2. Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве.
3. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности
4. Особенности движения и теплообмена в трубах.
5. Теплоотдача, при ламинарном и турбулентном движении жидкости в горизонтальных трубах.
6. Теплоотдача при течении жидкости в трубах некруглого сечения изогнутых и шероховатых трубах.

7. Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании одиночной трубы.
8. Теплоотдача при поперечном вынужденном обтекании пучков труб.
9. Теплообмен при конденсации чистого пара: основные положения, виды конденсации.
10. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного газа.
11. Зависимость конденсации от перегрева пара, состояния поверхности, содержания в паре неконденсирующихся газов, скорости и направления течения пара, влияние компоновки поверхности нагрева.
12. Теплоотдача при конденсации пара в трубах.
13. Основные понятия и определения из теории кипения, режимы кипения.
14. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме,
15. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в условиях вынужденной конвекции в трубах.
16. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена.
17. Тепло - и массоотдача.
18. Аналогия процессов теплообмена и массообмена.
19. Тепло- и массообмен при конденсации пара из газовой смеси.
20. Тепло- и массообмен при испарении в парогазовую среду.
21. Основные сведения о тепло и массообмене при химических превращениях.
22. Описание процесса излучением. Основные понятия и определения.
23. Основные законы теплового излучения
24. Теплообмен излучением между телами.
25. Теплообмен излучением при наличии экранов.
26. Тепловое излучение газов.
27. Теплообмен излучением между газом и оболочкой.
28. Закон Бугера.
29. Классификация теплообменных аппаратов.
30. Основные положения и уравнения теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов.
31. Средняя разность температур и методы ее вычисления.
32. Расчет конечных температур рабочих жидкостей.
33. Общие сведения о тепловом расчете регенеративных теплообменных аппаратов.
34. Задачи гидромеханического расчета теплообменных аппаратов.
35. Гидравлическое сопротивление элементов теплообменного аппарата. Расчет мощности, необходимой для перемещения теплоносителей.

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ».

### БЛОК ТЕРМОДИНАМИКА

#### а) основная литература:

1. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М: Издательство МЭИ, 2004.

2. Ерохин, Виктор Георгиевич. Основы термодинамики и теплотехники [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько, 2009. - 224 с.

#### б) дополнительная литература:

1. Техническая термодинамика. Учебник. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. – 4-е изд., перераб. – М: Энергоатомиздат, 1983.

2. Термодинамика поршневых двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Королев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.

3. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. – 4-е изд. – М: Энергоатомиздат, 1987.

4. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М: Издательство МЭИ, 1999.

5. Нs-диаграмма водяного пара.

### БЛОК «ТЕПЛОМАССООБМЕН»

#### а) основная литература:

1. **Цветков, Федор Федотович.** Тепломассообмен [Текст] : учеб. пособие : доп. Мин. обр. РФ / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. - 3-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2006. - 550 с.

2. **Ерохин, Виктор Георгиевич.** Основы термодинамики и теплотехники [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. - 2-е изд. - М. : ЛИБРОКОМ, 2009.

3. **Теплотехника** [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / В. А. Гуляев [и др.]. - М. : РАПП, 2009. - 346 с.

#### б) дополнительная литература:

4. **Теоретические основы теплотехники.** Тепломассообмен [Текст] : учеб.-метод. комплекс для спец. 140101-тепловые электрические станции / АмГУ, Эн.ф. ; сост. М. В. Гриценко, С. П. Присяжная. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. - 58 с.

5. **Теплотехника** [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс по дисц. для спец. 220301, 280101, 260704, 260901, 260902 / АмГУ, Эн.ф. ; сост. М. В. Гриценко. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007.

6. **Цветков, Федор Федотович.** Задачник по тепломассообмену [Текст] : учеб. пособие : рек. УМО / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2008. - 196 с.

7. **Теплотехника** [Текст] : учеб. : рек. Мин. обр. РФ / под ред. В. Н. Луканина. - М. : Высш. шк., 2006, 2009. - 672 с.

8. **Михеев, Михаил Александрович**. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. - 3-е изд., репринт. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 344 с.

9. **Теплотехника** [Текст] : учеб. / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 326 с.

**в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

<b>№</b>	<b>Наименование ресурса</b>	<b>Краткая характеристика</b>
1	<a href="http://www.iqlib.ru/">http://www.iqlib.ru/</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.

**г) периодические издания (профессиональные журналы)**

1. «Электричество»
2. «Электрические станции»
3. «Энергетик»
4. «Промышленная энергетика»
5. «Электротехника»
6. «Электрика»
7. «Энергохозяйство за рубежом»
8. «Energy Policy»

# 1. КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕПЛОМАССОБМЕН.*

Теоретические сведения, необходимые для изучения дисциплины изложены в [1, 2, 3]. Ниже приведен краткий конспект лекций.

### **Основные понятия и исходные положения тепломассообмена**

*Способы тепло- и массопереноса: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия. Феноменологический метод изучения явлений тепло- и массообмена. Определение основных понятий: температурное поле, градиент температуры, тепловой поток, плотность теплового потока. Вектор плотности теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел.*

Самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры называется теплообменом.

Теплообмен в общем случае может осуществляться тремя различными способами: теплопроводностью (кондуктивный теплообмен), конвекцией и тепловым излучением (радиацией). Совокупность трех перечисленных выше способов теплообмена называется сложным теплообменом.

Массообменом называют самопроизвольный необратимый процесс переноса массы данного компонента в пространстве с неоднородным полем химического потенциала этого компонента (в простейшем случае с неоднородным полем концентрации или парциального давления этого компонента).

Аналогично переносу теплоты теплопроводностью и конвективной теплоотдачей, различают массопроводность – молекулярную диффузию и конвективную массоотдачу – конвективную диффузию.

Перенос теплоты часто сопровождается переносом массы вещества и наоборот; поэтому закономерности этих двух явлений в последнее время рассматривают совместно как теорию тепломассообмена. Однако, поскольку с массообменом в чистом виде на практике приходится встречаться гораздо реже, чем с теплообменом, основное внимание обычно уделяется последнему.

Исследование многочисленных энергетических процессов связано с решением задач переноса теплоты, электричества и вещества. Перенос этих субстанций в твердых телах вне связи их друг с другом подчиняется условно принятым линейным зависимостям, например:

– перенос теплоты – закону Фурье: удельный тепловой поток пропорционален температурному градиенту;

– перенос электричества в металлах – закону Ома: удельный поток электричества пропорционален градиенту электрического потенциала;

– молекулярный перенос вещества – закону Фика: удельный поток вещества пропорционален градиенту концентрации (или разности диффузионных - химических потенциалов).

Перенос энергии и вещества осуществляется одним или несколькими материальными носителями. Носителями теплоты могут быть любые вещественные системы: атомы, молекулы, молекулярные комплексы, вихревые образования, гидродинамические потоки, а также кванты акустического (фононы) и электромагнитного (фотоны) излучений.

Перенос электричества в металлах осуществляется свободными электронами; в ионных проводниках – ионами; в полупроводниках – электронами и дырками.

В переносе вещества также участвуют разные носители. Например, при диффузии водяного пара в газообразной среде перенос происходит с помощью отдельных молекул или молекулярных комплексов, или вихрей, или гидродинамического потока.

Любой вид переноса характеризуется одинаковыми понятиями: полем, потоком, сопротивлением и т.д.

В общем случае потенциал является функцией координат пространства и времени. Совокупность значений потенциала в данный момент времени для всех точек пространства называют потенциальным полем. Например, если потенциалом является температура, то поле называется температурным.

Если потенциал меняется во времени, то поле называется нестационарным (или неустановившимся); в противном случае – стационарным. Стационарное поле может быть трехмерным, двумерным и одномерным. Наиболее простой вид имеют уравнения одномерных стационарных полей.

Соответствующие полю режимы – установившиеся и неустановившиеся.

Различают также однородные и неоднородные поля. В первом случае потенциал во всех точках поля в каждый момент времени один и тот же, во втором – нет.

Геометрическое место точек, имеющих одинаковый потенциал, образует изопотенциальную поверхность. В температурном поле точки с одинаковым значением температуры образуют изотермическую поверхность. В неоднородном температурном поле возникает перенос теплоты по описанным выше механизмам.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность, называется тепловым потоком  $\Phi$ , Вт. Тепловой поток, равномерно распределенный на единице площади поверхности, называется плотностью теплового потока. Различают местную (локальную) и среднюю по поверхности плотность теплового потока.

Тепловой поток и плотность его могут быть выражены как в векторной, так и в скалярной форме. Под вектором плотности теплового потока понима-

ют вектор, проекция которого на произвольное направление есть местная плотность теплового потока, проходящего через площадку, перпендикулярную к выбранному направлению.

Распространение теплоты может происходить в какой-либо среде (твердой, жидкой, газообразной) или в вакууме (излучением). Различают следующие среды: сплошные, однофазные, многофазные:

– сплошная среда – это среда, которую можно рассматривать как континуум, пренебрегая ее дискретным строением;

– однофазная среда – это сплошная одно- или многокомпонентная среда, свойства которой в пространстве могут изменяться только непрерывно;

– многофазная среда – сплошная одно- или многокомпонентная среда, состоящая из ряда однофазных частей, на границах которых физические свойства изменяются скачкообразно.

Для выражения интенсивности массообмена используют понятия потока массы и плотности потока массы.

Под потоком массы данного компонента смеси понимают его массу, проходящую в единицу времени через произвольную поверхность. Если масса вещества выражена в кг, а время в с, то поток массы имеет размерность кг/с.

Поток массы, отнесенный к единице площади поверхности, называют плотностью потока массы  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Поток массы и плотность потока массы могут быть выражены как в скалярной, так и в векторной форме.

## **Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решения**

*Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Коэффициент теплопроводности. Закон Ньютона-Рихмана. Перенос тепла в плоской стенке при постоянном и переменном коэффициенте теплопроводности. Теплопередача через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки. Критический диаметр тепловой изоляции. Передача тепла через шаровую стенку. Оребрение поверхности нагрева, как способ интенсификации процесса теплопередачи. Перенос тепла по стержню (ребру). Тепловой поток с поверхности стержня (ребра). Теплопередача через оребренную стенку. Коэффициент эффективности ребра. Численные методы решения задач стационарной теплопроводности.*

*Температурное поле в процессе охлаждения (нагревания) пластины. Метод Фурье. Безразмерная форма решения задачи о нестационарной теплопроводности пластины. Число Био. Безразмерное время (число Фурье). Температурное поле в процессе охлаждения (нагревания) бесконечно длинного цилиндра, шара и некоторых тел конечных размеров.*

*Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров и произвольной формы. Регулярный режим охлаждения. Определение теплофизических свойств материалов методом регулярного режима.*

Основной закон теплопроводности устанавливает количественную взаимосвязь между тепловым потоком, вызванным теплопроводностью, и температурными неоднородностями в среде.

Основной закон теплопроводности: плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры (градиент – вектор, показывающий направление наискорейшего возрастания некоторой функции на единицу длины).

Анализируя уравнение теплопроводности, можно установить физический смысл теплопроводности: теплопроводность – это количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу изотермической поверхности при градиенте температуры, равном единице.

Перенос вещества в смеси, обусловленный тепловым движением микро-частиц (например, молекул), называется молекулярной диффузией. Она может происходить в твердых, жидких и газообразных средах.

Молекулярную диффузию, вызываемую неоднородным распределением концентраций компонентов в смеси, называют концентрационной диффузией. Концентрационная диффузия описывается обычно на основе закона, согласно которому плотность потока массы диффундирующего компонента прямо пропорциональна градиенту его концентрации.

Для одномерного случая (перенос вещества вдоль только одной координаты) закон концентрационной диффузии был впервые установлен Фиком и поэтому носит его имя. Для трехмерного случая – закон Нернста.

Стационарный (установившийся) режим теплопроводности наиболее часто встречается в производстве (теплопотери через ограждающие конструкции помещений, теплопотери через стенки и теплоизоляцию теплообменных аппаратов и т.д.).

Рассмотрим процесс теплопроводности соответственно в плоской и цилиндрической стенке при условии, что температура на поверхности стенки поддерживается постоянной.

*Плоская стенка.* Допустим, что тепловой поток распространяется только в направлении координаты  $x$ , а теплопроводность не зависит от температуры.

В стационарном режиме тепловой поток и температура поверхности стенок постоянны.

Из анализа уравнения видно, что в стационарном режиме тепловой поток через плоскую стенку прямо пропорционален разности температур поверхностей стенки и обратно пропорционален толщине стенки.

Величина, численно равная отношению разности температур между двумя изотермическими поверхностями поверхности тела к плотности теплового потока в какой-либо точке на одной из этих поверхностей, называется внутренним термическим сопротивлением. Распределение температуры в плоской стенке, следует линейному закону.



Термическое сопротивление плоской многослойной стенки равно сумме термических сопротивлений составляющих ее слоев. В пределах каждого слоя наблюдается линейное распределение температуры, а при переходе от слоя к слою угловой коэффициент меняется вследствие изменения теплопроводности.

*Цилиндрическая оболочка.* Подвод теплоносителя к потребителю обычно осуществляется по трубам, а сами трубы имеют цилиндрический корпус. Рассмотрим цилиндрическую трубу с внутренним диаметром  $d_1$  и наружным  $d_2$ . В рассматриваемом случае температура изменяется только вдоль радиуса, и поэтому в цилиндрических координатах эта задача одномерна.

Из уравнения следует, что так же, как и для плоской стенки, тепловой поток через цилиндрическую оболочку прямо пропорционален разности температур поверхности стенки. Поэтому при стационарной теплопроводности в цилиндрической оболочке распределение температуры подчиняется логарифмическому закону.

### **Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена; применение методов подобия и размерностей к изучению процессов конвективного теплообмена)**

*Математическое описание процесса конвективного теплообмена: дифференциальные уравнения энергии, движения, неразрывности.*

*Физические свойства жидкостей и газов, существенные для процесса конвективного теплообмена. Классификация теплоносителей по числу Прандтля.*

*Безразмерный вид математического описания конвективного теплообмена. Безразмерные комплексы: число Рейнольдса, число Грасгофа, число Рэлея, число Нуссельта, число Фурье, число Эйлера, число Прандтля, число Био, число Фруда, число Пекле. Теория подобия и размерности. Пи – теорема.*

*Пограничный слой. Турбулентность. Рейнольдсовы преобразования дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Турбулентная теплопроводность. Турбулентная вязкость. Турбулентное число Прандтля.*

В промышленности широко применяются различные теплообменные устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой (обогрев зданий и сооружений с помощью отопительных приборов, нагрев молока при его пастеризации, нагрев воды и генерация пара в котельных установках, нагрев воздуха в калориферах и т.д.). В этих устройствах, как правило, происходит теплообмен между движущимися средами через поверхность раздела фаз или разделяющую их стенку.

Движущаяся среда, используемая для переноса теплоты, называется теплоносителем.

Конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью раздела с другой средой – твердым телом (например, стенкой), жидкостью или газом - называется теплоотдачей.

Поверхность раздела, через которую происходит перенос теплоты, носит название поверхности теплообмена или теплоотдающей поверхности.

Интенсивность теплоотдачи в большинстве случаев зависит от скорости движения теплоносителя относительно поверхности теплообмена. Движение может быть свободным или вынужденным.

Свободная конвекция жидкости на практике часто происходит за счет разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости, находящихся в поле гравитационных сил (гравитационная свободная конвекция), а вынужденная конвекция – в результате действия насоса или вентилятора.

В движущейся среде масса переносится одновременно конвекцией (за счет движения самой среды) и диффузией. Массообмен, обусловленный совместным действием конвективного переноса вещества и молекулярной диффузии, носит название конвективного массообмена.

В практических задачах большое значение имеет конвективный массообмен между жидкой или твердой поверхностью и окружающей средой. По аналогии с теплоотдачей конвективный массообмен между движущейся средой и поверхностью раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью или газом) называют массоотдачей.

Для количественного описания теплоотдачи широко используется закон теплоотдачи – плотность теплового потока, переносимого путем конвекции от поверхности теплообмена в среду (или, наоборот, из среды к поверхности теплообмена), пропорциональна разности температур поверхности теплообмена  $t_c$  и среды  $t_{жс}$ , взятой по абсолютной величине.

Различают местный (локальный) коэффициент теплообмена, который относится к рассматриваемой точке поверхности теплообмена, и средний коэффициент теплообмена, равный всему тепловому потоку  $\Phi$  (Вт) через поверхность теплообмена  $A$  ( $m^2$ ), деленному на средний температурный напор  $t_{ср}$  и площадь поверхности теплообмена.

Коэффициент теплообмена – важный теплофизический параметр, необходимый для расчета тепло обменного аппарата. В общем случае он зависит от физических свойств жидкости, конфигурации и размеров поверхности теплообмена и от условий обтекания ее жидкостью. Коэффициент теплообмена – это расчетная величина, находимая обычно из уравнений, полученных экспериментально.

Для количественного описания массоотдачи используется закон массоотдачи (закон Шюкарева).

Уравнение массоотдачи является аналогом уравнения теплоотдачи.

Градиент концентрации в диффузионном слое может быть направлен как к поверхности массообмена (сушка, сублимация, испарение со свободной поверхности жидкости, десорбция, растворение), так и от нее (конденсация,

абсорбция (поглощение газов и паров жидкостями), адсорбция, десублимация). В совместно протекающих процессах тепло- и массоотдачи он может либо совпадать по направлению с градиентом температуры в тепловом пограничном слое (конденсация), либо нет (испарение со свободной поверхности жидкости, конвективная сушка).

В процессах испарения со свободной поверхности, сушки, сублимации и конденсации пара из парогазовой смеси, поверхность массообмена является полупроницаемой, т. е. проницаемой для пара и непроницаемой для газа. Диффузия пара через пограничный слой вызывает встречную диффузию газа (взаимодиффузия). Поскольку общее давление парогазовой смеси в пограничном слое постоянно, то перемещение газа к поверхности массообмена (при испарении, сушке, сублимации) или от нее (конденсация, десублимация) должно компенсироваться общим конвективным потоком парогазовой смеси.

Основные положения теории подобия формулируются в виде трех теорем. Первая и вторая теоремы подобия формулируют основные свойства подобных между собой явлений, третья устанавливает признаки, по которым можно определить, подобны ли рассматриваемые явления.

Сущность теорем подобия:

– первой – в подобных явлениях все одноименные числа подобия (в том числе и критерии подобия) должны быть численно одинаковы;

– второй – зависимость между переменными, характеризующими какой-либо процесс, может быть представлена в виде зависимости между числами подобия;

– третьей – подобны те явления, у которых одноименные критерии подобия одинаковы.

Теория подобия дает возможность на основе анализа математического описания того или иного процесса ответить на вопрос, сколько должно быть критериев в критериальном уравнении, и раскрывает содержание всех критериев, однако не позволяет – найти конкретную функциональную зависимость определяемого критерия от определяющих. Последняя задача решается путем постановки экспериментов, моделирующих исследуемый процесс, и соответствующей обработки полученных данных. Критериальные уравнения используются для расчета искомой величины, входящей в определяемый критерий.

Все критерии подобия безразмерные величины. Их можно умножать и делить один на другой, возводить в степень. Получаемые при этом комплексы безразмерных величин также являются критериями подобия.

В конвективном теплообмене очень часто по критериальным уравнениям рассчитывают коэффициент теплообмена. Определяемый критерий, содержащий коэффициент теплообмена, можно получить, переходя к безразмерным переменным в дифференциальном уравнении теплоотдачи. Вводя новые переменные, получим уравнение с безразмерным комплексом, стоящим в левой части. Он представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи и называется числом Нуссельта.

Числа подобия, составленные только из заданных параметров математического описания задачи, называются критериями подобия. Анализ уравнений конвективного теплообмена позволяет получить следующие основные критерии подобия:

- критерий Рейнольдса, представляющий собой отношение сил инерции к силам вязкости;
- критерий Грасгофа, характеризующий подъемную силу, возникшую вследствие разности плотности жидкости;
- критерий Прандтля, определяющий физические свойства жидкости.

Входящие в эти критерии параметры должны быть заданы условиями однозначности. Конкретный вид уравнения, получаемого обычно экспериментальным путем, зависит от характера рассматриваемого явления теплоотдачи, геометрических параметров системы и условий проведения процесса.

### **Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при вынужденном течении в каналах, обтекание трубы и пучка труб**

*Теплообмен и сопротивление при ламинарном и турбулентном пограничном слое на пластине. Теплообмен при вынужденном внешнем обтекании трубы и пучка труб.*

*Теплообмен при движении теплоносителей в трубах и каналах. Первое начало термодинамики для течения в трубах. Местный и средний коэффициенты теплоотдачи.*

*Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении в трубе. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы. Турбулентное движение в трубах. Формулы Михеева и Петухова.*

*Теплоотдача при течи жидких металлов. Теплообмен при сверхкритическом состоянии жидкостей.*

*Интенсификация конвективного теплообмена при течи теплоносителя в трубах и каналах.*

Омывание трубы поперечным неограниченным потоком жидкости характеризуется рядом особенностей. Плавное, безотрывное обтекание цилиндра имеет место только при  $Re \leq 5$ . При больших значениях  $Re$  условия омывания лобовой и кормовой половин трубы совершенно различны. Ламинарный пограничный слой, образующийся в лобовой части трубы около вертикального диаметра, отрывается от ее поверхности, и в кормовой части образуются два симметричных вихря. Только 45-47% поверхности или при углах  $\varphi = 80-85^\circ$ , считая от лобовой точки, поверхность трубы омывается потоком жидкости безотрывно, вся остальная ее часть находится в вихревой зоне. Чем больше скорость потока, тем при больших углах  $\varphi$  происходит отрыв ламинарного пограничного

слоя. При больших значениях числа  $Re$  ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный, а отрыв слоя происходит при  $\varphi = 120-130^\circ$ . Это смещение приводит к уменьшению вихревой зоны в кормовой части трубы и обтекание ее улучшается. Турбулентный пограничный слой появляется при значительных числах  $Re=1 \cdot 10^5-4 \cdot 10^5$ . на появление турбулентного пограничного слоя большое влияние оказывает начальная турбулентность потока; чем она больше, тем при меньших значениях числа  $Re$  появится турбулентный пограничный слой. Такая своеобразная картина движения жидкости при поперечном обтекании одиночной трубы в значительной мере отражается на коэффициенте теплоотдачи по ее окружности.

В лобовой части трубы (при  $\varphi = 0$ ) коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение, так как пограничный слой имеет наименьшую толщину. По мере движения жидкости вдоль поверхности толщина пограничного слоя увеличивается и достигает максимального значения почти у экватора, что примерно соответствует месту отрыва пограничного слоя (рис. ). Благодаря увеличению толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи уменьшается, и у экватора достигает наименьшего значения. За экватором кормовая часть цилиндра омывается жидкостью, имеющей сложный вихревой характер движения, толщина его уменьшается, а коэффициент теплоотдачи увеличивается, достигая максимального значения при  $\varphi = 180^\circ$ , и может сравняться с теплоотдачей в лобовой части трубы. Описанная картина движения жидкости справедлива для значений чисел Рейнольдса  $Re=5-2 \cdot 10^5$ . При больших значениях числа  $Re>2 \cdot 10^5$  теплоотдача круговой трубы исследована недостаточно и наши познания о вихревой зоне весьма ограничены.

Из изложенного следует, что теплоотдача по окружности одиночной трубы при поперечном обтекании тесно связана с характером омывания ее поверхности, зависит от скорости и направления потока жидкости, от температуры и диаметра трубы, от направления теплового потока, от внешних тел, изменяющих степень турбулизации потока, и т.п. Все эти моменты указывают на трудность теоретического решения данной задачи.

Подробные экспериментальные исследования теплоотдачи проволок и трубок в поперечном потоке воздуха, воды, трансформаторного масла были проведены А.А. Жукаускасом. Им также были использованы экспериментальные работы других авторов. В результате обобщения всех данных были получены уравнения подобия по окружности одиночной трубы:

$$\text{при } Re_{\text{жкд}}=5-1 \cdot 10^3$$

$$Nu_{\text{жкд}} = 0,5 Re_{\text{жкд}}^{0,5} Pr_{\text{жк}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{жк}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} ;$$

для воздуха

$$Nu_{\text{жсд}} = 0,43 Re_{\text{жсд}}^{0,5}$$

При  $Re_{\text{жсд}} = 1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{\text{жсд}} = 0,25 Re_{\text{жсд}}^{0,6} Pr_{\text{жс}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25};$$

для воздуха

$$Nu_{\text{жсд}} = 0,216 Re_{\text{жсд}}^{0,6}$$

При вычислении чисел подобия за определяющий линейный размер принят внешний диаметр трубы; за определяющую температуру – средняя температура жидкости. Скорость отнесена к самому узкому сечению канала. Приведенные формулы справедливы для цилиндра, который располагается перпендикулярно направлению потока. Если угол атаки  $\varphi < 90^\circ$ , то коэффициент теплоотдачи для  $\varphi = 90^\circ$  нужно умножить на поправочный коэффициент  $\varepsilon_\varphi$ , значения которого приведены ниже, и  $\bar{\alpha}_\varphi = \varepsilon_\varphi \cdot \bar{\alpha}_{90^\circ}$ :

$\varphi$ , град	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\varepsilon_\varphi$	1	1	0,98	0,95	0,87	0,77	0,67	0,6	0,55

Теплообменные устройства сравнительно редко выполняются из одной поперечно-омываемой трубы, так как поверхность теплообмена при этом невелика. Обычно трубы собираются в пучок. В технике чаще встречаются два основных типа трубных пучков: шахматный и коридорный.

Характеристикой пучка являются поперечный шаг  $s_1$  (расстояние между осями труб в направлении, поперечном потоку жидкости) и продольный шаг  $s_2$  (расстояние между осями соседних двух рядов труб, расположенных один за другим в направлении течения жидкости). Помимо  $s_1$  и  $s_2$ , пучки характеризуются внешним диаметром труб и количеством рядов труб по ходу жидкости. Для определенного пучка шаги  $s_1$  и  $s_2$  и диаметр труб  $d$  обычно являются постоянными, не изменяющимися как поперек, так и вдоль течения жидкости. Течение жидкости в пучке имеет достаточно сложный характер. Рядом стоящие трубы пучка оказывают воздействие на омывание соседних, в результате теплообмен труб пучка отличается от теплоотдачи одиночной трубы. Обычно пучок труб устанавливают в каком-либо канале. Поэтому течение в пучке может быть связано с течением в канале.

Известны два основных режима течения жидкости: ламинарный и турбулентный. Эти же режимы могут иметь место и при движении жидкости в пучке. Форма течения жидкости в пучке во многом зависит от характера течения в ка-

нале перед пучком. Если при данном расходе и температурах течение в канале, где установлен пучок, было бы турбулентным при отсутствии пучка, то оно обязательно будет турбулентным и в пучке, так как пучок является прекрасным турбулизатором. Однако если пучок помещен в канал, в котором до его установки имел бы место ламинарный режим течения, то в этом случае в зависимости от числа  $Re$  можно иметь как одну, так и другую формы течения. Чем меньше число  $Re$ , тем устойчивее ламинарное течение, чем больше – тем легче перевести его в турбулентное. При низких значениях числа  $Re$  течение может остаться ламинарным. При этом межтрубные зазоры как бы образуют отдельные щелевидные каналы переменного сечения (исключение составляет предельный случай, когда расстояния между трубами очень велики).

В технике чаще всего встречается турбулентная форма течения жидкости в пучках. Так, например, поперечно-омываемые трубные поверхности нагрева котельных агрегатов омываются турбулентным потоком.

Однако и при турбулентном течении имеют место различные законы теплообмена. Это объясняется различным характером течения на стенках труб. Закон теплоотдачи изменяется при появлении на поверхности труб турбулентного пограничного слоя. Согласно опытам с одиночными трубами турбулентный пограничный слой на стенке появляется при  $Re > 2 \cdot 10^5$ . На трубах пучка турбулентный слой может появиться при меньших числах  $Re$ . Для пучков приближенно можно принять, что  $Re_{кр} = 1 \cdot 10^5$ . При этом в  $Re$  вводят скорость, подсчитанную по самому узкому поперечному сечению пучка; определяющий размер – внешний диаметр труб.

При  $Re < 1 \cdot 10^5$  передняя часть трубы омывается ламинарным пограничным слоем, а кормовая – неупорядоченными вихрями. Таким образом, в то время как течение в пространстве между трубами является турбулентным, на передней половине трубы имеется слой ламинарно текущей жидкости – имеет место *смешанное* движение жидкости.

Изменение характера омывания сказывается и на теплоотдаче. Можно выделить три основных режима омывания и теплоотдачи в поперечно-омываемых трубных пучках. Назовем их соответственно ламинарным, смешанным и турбулентными режимами.

В настоящее время наиболее изученным является смешанный режим. Он часто встречается в технике, в том числе и в котельных агрегатах. Смешанному режиму соответствуют числа  $Re$  примерно от  $1 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^5$ . Рассмотрим его основные особенности.

Омывание первого ряда труб и шахматного и коридорного пучков аналогично омыванию одиночного цилиндра. Характер омывания остальных труб в сильной мере зависит от типа пучка. В коридорных пучках все трубы второго и последующего рядов находятся в вихревой зоне впереди стоящих труб, причем циркуляция жидкости в вихревой зоне слабая, так как поток в основном проходит в продольных зазорах между трубами (в «коридорах»). Поэтому в коридор-

ных пучках как лобовая, так и кормовая части трубок омываются со значительно меньшей интенсивностью, чем те же части одиночной трубки или лобовая часть трубки первого ряда в пучке. В шахматных пучках характер омывания глубоко расположенных трубок качественно мало отличается от характера омывания трубок первого ряда.

Описанному характеру движения жидкости в пучках из круглых труб соответствует и распределение местных коэффициентов теплоотдачи по окружности труб различных рядов. Распределение местных  $\alpha$  при определенном значении числа  $Re$  представлено на рис. ; здесь  $\varphi$  – угол, отсчитываемый от лобовой точки трубы, цифры обозначают номера рядов.

Из рассмотренных кривых следует, что изменение местных  $\alpha$  по окружности труб первого ряда коридорного и шахматного пучков соответствует распределению  $\alpha$  для одиночной трубки. Для вторых и всех последующих рядов коридорного пучка характер кривых меняется: максимум теплоотдачи наблюдается не в лобовой точке, а при  $\varphi \approx 50^\circ$ . Таких максимумов два и расположены они как раз в тех областях поверхности труб, где происходит удар набегающих струй.

Лобовая же часть непосредственному воздействию потока не подвергается, поэтому здесь теплоотдача невысока. В шахматных пучках максимум теплоотдачи для всех рядов остается в лобовой точке (исключение может иметь место только при больших  $Re$  или малых  $s_2/d$ ).

Изменяется в начальных рядах пучков и средняя теплоотдача. На основании многочисленных исследований теплоотдачи пучков Н.В. Кузнецовым, В.М. Антуфьевым и другими можно сделать ряд общих выводов:

а) средняя теплоотдача первого ряда различна и определяется начальной турбулентностью потока;

б) начиная примерно с третьего ряда средняя теплоотдача стабилизируется, так как в глубинных рядах степень турбулентности потока определяется компоновкой пучка, являющегося по существу системой турбулизирующих устройств.

При невысокой степени турбулентности набегающего потока теплоотдача первого ряда шахматного пучка составляет примерно 60% теплоотдачи третьего и последующего рядов, теплоотдача второго ряда составляет примерно 70%. В коридорном пучке теплоотдача первого ряда также составляет примерно 60% теплоотдачи третьего и последующих рядов, а теплоотдача второго 90%. Изменение теплоотдачи по рядам приведено на диаграммах; по вертикали отложены отношения  $\varepsilon_i$  среднего коэффициента теплоотдачи произвольного ряда к той же величине для третьего ряда, по горизонтали – номера рядов.

Возрастание теплоотдачи по рядам, как указывалось, объясняется дополнительной турбулизацией потока в пучке. Однако если поток, набегающий на пучок труб, значительно искусственно турбулирован (например, с помощью различных турбулизирующих устройств: в результате резкого расширения, по-



сле прохождения через вентилятор или насос и др.), то теплоотдача начальных рядов может быть как равна теплоотдаче глубинных рядов, так и больше ее. В глубинных рядах течение и теплоотдача определяются компоновкой пучка и не зависит от начальной турбулентности.

Таким образом, при высокой степени турбулентности набегающего потока пучок уже может явиться детербулизирующим устройством. В этом случае нет достоверности данных для определения  $\alpha$  первых двух рядов. Расчет можно вести, полагая, что для всех рядов  $\varepsilon_i = 1$ .

Если пучок многорядный, то доля теплоотдачи начальных рядов незначительна по сравнению с теплоотдачей всего пучка и неточность в определении  $\varepsilon_i$  не приведет к существенным ошибкам при расчете среднего коэффициента теплоотдачи всего пучка  $\bar{\alpha}$ .

Теплоотдача пучков труб зависит также от расстояния между трубами. Это расстояние принято выражать в виде безразмерных характеристик  $s_1/d$  и  $s_2/d$ , называемых соответственно *относительными поперечными* и *продольными* шагами.

Согласно при смешанном режиме ( $Re_{жcd} \approx 10^3 - 10^5$ ) средний коэффициент теплоотдачи определенного ряда пучка может быть определен по уравнению

$$Nu_{жcd} = C Re_{жcd}^n Pr_{жс}^{0,33} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_i \varepsilon_s,$$

где для шахматных пучков  $C=0,41$  и  $n=0,6$  и для коридорных  $C=0,26$  и  $n=0,65$ . В формуле определяющим размером является внешний диаметр трубок пучка. Скорость жидкости, входящая в критерий  $Re_{жcd}$ , подсчитывается по самому узкому поперечному сечению ряда пучка. Определяющей температурой является средняя температура жидкости (исключение оставляет число  $Pr_C$ , выбираемое по температуре стенки).

Поправочный коэффициент  $\varepsilon_s$  учитывает влияние относительных шагов. Для глубинных рядов коридорного пучка

$$\varepsilon_s = \left( \frac{s_2}{d} \right)^{-0,15};$$

$$\text{для шахматного при } s_1/s_2 < 2 \quad \varepsilon_s = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{1/6};$$

$$\text{при } s_1/s_2 \geq 2 \quad \varepsilon_s = 1,12.$$

Относительные шаги изменялись в пределах от 1,24 до 4,04; в [48]  $s_1/d=1,3 - 2,6$ ;  $s_2/d=0,61 - 3,9$  и  $\frac{s_1/d}{s_2/d} \approx 0,33 - 3,4$ .

В соответствии с этим изменением относительных шагов теплоотдача глубинных рядов коридорного пучка изменялась в опытах при  $w_{y3}=const$  примерно на 20%, а шахматных – на 30%.

Для определения коэффициента теплоотдачи всего пучка в целом необходимо произвести осреднение средних значений  $\alpha$ , полученных для отдельных рядов:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \bar{\alpha}_i F_i}{\sum_{i=1}^{i=n} F_i},$$

где  $\bar{\alpha}_i$  - средний коэффициент теплоотдачи  $i$ -го ряда;  $F_i$  – суммарная поверхность теплообмена трубок  $i$ -го ряда;  $n$  – число рядов в пучке.

Если  $F_1=F_2=\dots=F_n$ , то формула упрощается:

$$\alpha = \frac{\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + (n-2)\bar{\alpha}_3}{n};$$

при этом

$$\bar{\alpha}_1 = \varepsilon_1 \cdot \bar{\alpha}_3 \quad \text{и} \quad \bar{\alpha}_2 = \varepsilon_2 \cdot \bar{\alpha}_3.$$

Поправочный множитель  $\varepsilon_i$  учитывает изменение теплоотдачи в начальных рядах труб. При  $s_2/d \leq 4$  и невысокой степени турбулентности набегающего потока поправку  $\varepsilon_i$  можно определить по диаграмме рис. 9-9.

По сравнению со смешанным режимом процесс течения и теплоотдачи в ламинарной и турбулентной областях изучен гораздо хуже. Однако имеющиеся в настоящее время данные позволяют сделать вывод, что и при турбулентном режиме теплоотдача первого и второго рядов меньше, чем глубинных. Начиная с третьего ряда теплоотдача стабилизируется.

В работе Бергелина и др. изучалась средняя теплоотдача тесных десятирядных шахматного и коридорного пучков ( $s_1/d$  и  $s_2/d$  равны или меньше 1,25). Теплоотдача в этом случае описывается уравнением

$$Nu_{\text{жcd}} = C Re_{\text{жcd}}^{1/3} Pr_{\text{ж}}^{1/3} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25},$$

где для шахматного пучка  $C=1,8$ , для коридорного  $C=1,2$ . Все определяющие величины выбираются так же, как и для формулы (9-4). Формула (9-5) справедлива при  $Re_{\text{жcd}}=10-200$  для шахматных и при  $Re_{\text{жcd}}=10-150$  – для коридорных пучков.

Возможное влияние свободной конвекции данной формулой не учитывается.

При прочих равных условиях в ламинарной области теплоотдача шахматных пучков в полтора раза больше теплоотдачи коридорных. В смешанной об-

ласти эта разница уменьшается, и в пределе при  $Re \approx 10^5$  практически исчезает. В турбулентной области теплоотдача шахматных и коридорных пучков разниться сравнительно мало.

При  $Re > 2 \cdot 10^5$  теплоотдача глубинных рядов шахматного и коридорного пучков труб может быть рассчитана по формуле

$$Nu_{жд} = 0,021 Re_{жд}^{0,84} Pr_{жд}^{0,36} \left( \frac{Pr_{жд}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}.$$

Опыты показывают, что переход от одного режима к другому происходит не при определенном значении числа Рейнольдса, а в некоторой сравнительно небольшой области. Поэтому значения чисел  $Re=150$  или  $200$  и  $Re=10^5$  нужно понимать как некоторые осредненные величины. Их значение зависит также от относительных шагов. Например, у ярко выраженных коридорных пучков ( $s_1/d \gg s_2/d$ ) изменение режима теплоотдачи происходит при больших значениях  $Re$ , чем у «решетчатых» коридорных пучков ( $s_1/d \ll s_2/d$ ) [62].

Формула применима лишь в случае, когда поток жидкости перпендикулярен оси труб пучка (угол атаки  $\varphi = 90^\circ$ ). Если  $\varphi < 90^\circ$ , то изменение теплоотдачи может быть учтено путем введения в формулу поправочного коэффициента

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\bar{\alpha}_\varphi}{\bar{\alpha}_{\varphi=90^\circ}},$$

представляющего собой отношение коэффициента теплоотдачи при угле атаки  $\varphi$  к коэффициенту теплоотдачи при  $\varphi = 90^\circ$ .

Значения  $\varepsilon_\varphi = f(\varphi)$  можно взять из графика.

При значениях  $\varphi$ , близких к нулю, теплоотдача рассчитывается по формуле продольно-омываемых пучков труб.

Напомним, что приведенные здесь данные относятся к случаю  $Pr \geq 1$ .

### **Расчет коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции**

*Теплоотдача при свободном движении жидкости около тел (пластина, труба), находящихся в неограниченном объеме жидкости. Свободная конвекция в ограниченном объеме.*

Свободное движение возникает за счет неоднородного распределения в рассматриваемой жидкости массовых (объемных) сил. Такими силами являются сила тяжести, центробежная сила и силы за счет наведения в жидкости электромагнитного поля высокой напряженности. Наиболее хорошо изучено свободное движение жидкости, вызванное гравитационными силами.

В уравнении движения гравитационные силы учитываются членом  $\rho \vec{g}$ , имеющим размерность силы, отнесенной к единице объема. При теплообмене температура жидкости переменна, поэтому возникает разность плотностей, и как следствие, разность гравитационных сил, представляющих собой архимедову или подъемную (опускную) силу.

В технических задачах ускорение силы тяжести от точки к точке рассматриваемого пространства практически не изменяется. Объемные же силы, вызванные центробежным эффектом или электромагнитным полем, могут изменяться в изучаемой жидкости за счет изменения вектора  $\vec{F}$ , представляющего собой отношение силы, действующей на данный элемент жидкости, к массе этого элемента. Если учитывается только сила тяжести, то  $\vec{F} = \vec{g}$ .

Здесь рассмотрена теплоотдача только при свободном гравитационном движении. Иногда результаты, полученные для гравитационной конвекции, применяют для оценки свободного движения под действием других массовых сил. Тогда ускорение силы тяжести заменяют суммой ускорения  $g$  и ускорения, соответствующего дополнительно действующей массовой силе (например, центробежного ускорения  $\frac{w^2}{r}$ ). Полученный таким образом результат следует рассматривать как приближенный, так как поле ускорений, соответствующих различным силам, может отличаться от поля гравитационного ускорения.

Далее рассмотрено свободное гравитационное течение для наиболее простых форм поверхности твердого тела (вертикальная плита, горизонтальный цилиндр). Предполагается, что объем жидкости настолько велик, что свободное движение, возникающее у других тел, расположенных в этом объеме, не сказывается на рассматриваемом течении. Как и при вынужденной конвекции, свободное движение жидкости может быть как ламинарным, так и турбулентным.

Пусть вертикальная пластина с неизменной температурой поверхности, равной  $t_c$ , находится в жидкости или газе. Жидкость вдали от пластины неподвижна (вынужденное течение отсутствует), температура жидкости вдали от пластины постоянна и равна  $t_0$ . Для простоты вычисления примем, что  $t_c > t_0$  (однако полученные результаты будут справедливы и для обратного соотношения температур). При этом у пластины появляется подъемное движение нагретого слоя жидкости. Вдали от пластины скорость по-прежнему равна нулю.

Расположим начало координату нижней кромки пластины, а ось  $Oy$  нормально к ее поверхности. Будем полагать, что пластина вдоль оси  $Oz$  бесконечна. Процесс стационарный.

Для упрощения решения задачи примем следующие допущения:

- 1) силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами тяжести и вязкости;
- 2) конвективный перенос теплоты, а также теплопроводность вдоль движущегося слоя жидкости можно не учитывать;
- 3) градиент давления равен нулю;

4) физические параметры жидкости (исключая плотность) постоянны; плотность является линейной функцией температуры.

Будем полагать, что температура в движущемся слое жидкости изменяется по уравнению

$$\vartheta = \vartheta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2,$$

где  $\vartheta = t - t_0$  и  $\vartheta_c = t_c - t_0$ ; согласно условию задачи  $\vartheta_c = const$ .

Уравнение удовлетворяет граничным условиям:

$$\vartheta = \vartheta_c \text{ при } y=0 \text{ и } \vartheta = 0 \text{ при } y=\delta.$$

Коэффициент теплоотдачи определяется уравнением

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\vartheta_c} \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dy}\right)_{y=0}.$$

Из уравнения следует, что

$$\frac{d\vartheta}{dy} = -\frac{2\vartheta_c}{\delta} + \frac{2\vartheta_c}{\delta^2} y = -\frac{2\vartheta_c}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right);$$

$$\left(\frac{d\vartheta}{dy}\right)_{y=0} = -\frac{2\vartheta_c}{\delta}.$$

Подставляя значение  $\left(\frac{d\vartheta}{dy}\right)_{y=0}$  в уравнение теплоотдачи, получаем:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta}.$$

Толщина движущегося слоя жидкости переменна по высоте и связана со скоростью движения в этом слое. Поле скоростей описывается уравнением движения. При принятых условиях течение происходит в основном в направлении оси  $Ox$ , поэтому используем уравнение движения только в проекциях на ось  $Ox$ . Для стационарного течения и с учетом ранее принятых допущений уравнение движения упрощается. В результате будем иметь:

$$\mu \frac{d^2 w_x}{dy^2} = -g(\rho_0 - \rho).$$

при линейной зависимости плотности от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta\vartheta),$$

где  $\beta = const$ . Отсюда

$$\rho_0 - \rho = \rho_0 \beta \vartheta.$$

Подставляя значение  $\mathcal{G}$  в уравнение, и учитывая последнее соотношение для плотности, уравнение движения можно написать следующим образом:

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -\frac{\rho_0 g \beta \mathcal{G}_c}{\mu} \left(1 - \frac{y}{\sigma}\right)^2$$

или

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -A \left(1 - 2\frac{y}{\sigma} + \frac{y^2}{\sigma^2}\right);$$

здесь

$$A = \frac{\rho_0 g \beta \mathcal{G}_c}{\mu} \neq f(y).$$

Интегрирование уравнения движения дает:

$$\frac{dw_x}{dy} = -A \left(y - \frac{1}{\delta} y^2 + \frac{1}{3\delta^2} y^3\right) + C_1$$

и

$$w_x = -A \left(\frac{y^2}{2} - \frac{1}{3\delta} y^3 + \frac{1}{12\delta^2} y^4\right) + C_1 y + C_2.$$

Примем следующие граничные условия для скорости:  $w_x=0$  как при  $y=0$ , так и при  $y = \delta$ . Отметим, что, строго говоря, при  $y = \delta$  ( $\mathcal{G} = 0$ ) скорость может быть не равна нулю. Это объясняется действием сил вязкости. Движущиеся частицы могут увлекать за собой слои жидкости, находящиеся в изотермических условиях.

При принятых граничных условиях из уравнения (б) следует, что

$$C_1 = \frac{A}{4} \delta \quad \text{и} \quad C_2 = 0.$$

Подставив значения  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (б) и произведя некоторые преобразования, получим следующее уравнение распределения скоростей в движущемся слое жидкости:

$$w_x = A \left(\frac{\delta}{4} y - \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{3\delta} y^3 - \frac{1}{12\delta^2} y^4\right).$$

На рис. 10-2 приведено распределение скоростей. Здесь же представлена кривая температур. Максимум скорости соответствует значению

$$y = 0,38\delta \approx \frac{\delta}{3}.$$

Заметим, что распределение скоростей при  $y = \delta$  не удовлетворяет условию  $(dw_x / dy)_{y=\delta} = 0$ . Производная при  $y = \delta$  имеет конечное значение. Это обстоятельство является следствием приближенности решения. Характер измене-

ния скорости на внешней границе движущегося слоя показан пунктирной линией.

Среднеинтегральная скорость равна:

$$\bar{w}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_x dy = \frac{\rho_0 g \beta \vartheta_c \delta^2}{40 \mu}.$$

Для простоты решения среднюю температуру жидкости в слое определим приближенно как среднеинтегральную по сечению слоя:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \vartheta dy = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \vartheta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 dy = \frac{\vartheta_c}{3}.$$

Таким образом, при принятых условиях величина средней температуры слоя не зависит от координаты  $x$ .

Расход жидкости через поперечное сечение слоя  $\delta \cdot 1$  равен:

$$G = \rho_0 \bar{w}_x \delta \cdot 1$$

и

$$dG = d(\rho_0 \bar{w}_x \delta).$$

Расход жидкости определен по плотности  $\rho_0$ . При этом полагаем, что жидкость плотностью  $\rho_0$ , вовлекаясь в движущийся слой, приобретает в среднем скорость  $\bar{w}_x$ .

Поставляя значение  $\bar{w}_x$ , получаем:

$$dG = d\left(\frac{\rho_0^2 g \beta \vartheta_c \delta^3}{40 \mu}\right) = \frac{3 \rho_0^2 g \beta \vartheta_c}{40 \mu} \delta^2 d\delta.$$

В движение вовлекается жидкость с первоначальной температурой  $t_0$ . В движущемся слое эта жидкость нагревается до различных температур, лежащих в интервале от  $t_0$  до  $t_c$ . Можно считать, что в среднем жидкость нагревается до температуры  $\bar{\vartheta}$ . На этот нагрев затрачивается теплота

$$dQ = c_p \vartheta dG = \alpha \vartheta_c dx \cdot 1 = \frac{2\lambda}{\delta} \vartheta_c dx \cdot 1.$$

Из уравнения (е) следует, что

$$dQ = \frac{2\lambda}{\delta c_p} \cdot \frac{\vartheta_c}{\vartheta} dx = \frac{6\lambda}{\delta c_p} dx.$$

приравнивая правые части уравнений, получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение  $\delta$  по высоте стенки:

$$\frac{3 \rho_0^2 g \beta \vartheta_c}{40 \mu} \delta^2 d\delta = \frac{6\lambda}{c_p} dx.$$

Интегрируя это уравнение, получаем:

$$\frac{3\rho_0^2 g \beta \vartheta_c}{160\mu} \delta^4 = \frac{6\lambda}{c_p} x + c.$$

Постоянную интегрирования  $c$  найдем из условия, что при  $x=0$   $\delta = 0$ . Отсюда  $c=0$ .

Из уравнения следует, что

$$\delta = 4,234 \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \beta \rho_0^2 g \vartheta_c}}.$$

$\alpha = 2\lambda / \delta$ , подставляя сюда значение  $\delta$ , получаем:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} = 0,4734 \sqrt[4]{\frac{c_p \beta \rho_0^2 g \vartheta_c \lambda^3}{\mu x}}.$$

Приведем данное уравнение к безразмерному виду, для чего левую и правую части уравнения умножим на  $x$  и разделим на  $\lambda$ .

После некоторых преобразований получим:

$$Nu_x \equiv \frac{\alpha x}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sqrt[4]{\frac{g \beta \vartheta_c x^3}{\mu^2 / \rho_0^2}} \cdot \frac{\mu c_p}{\lambda} = 0,473 (Gr_x Pr)^{1/4},$$

где

$$Gr \equiv \frac{g \beta \vartheta_c x^3}{\mu^2 / \rho_0^2}.$$

## Теплообмен при фазовых превращениях

*Теплообмен при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Теория Нуссельта. Поправочные коэффициенты к теории Нуссельта (на волновое течение и переменность физических свойств конденсата). Турбулентное течение пленки конденсата, расчет коэффициента теплоотдачи. Теория Нуссельта для пленочной конденсации на горизонтальной трубе.*

*Влияние скорости пара, состояния поверхности, влажности и перегрева пара, примесей воздуха в паре. Теплообмен при конденсации пара в трубах. Теплообмен при кипении жидкостей. Кривая кипения. Пузырьковое и пленочное кипение. Критический радиус пузырька. Скорость роста пузырька. Отрывной диаметр пузырька. Частота отрыва пузырьков. Расчет коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме. Критические тепловые нагрузки при кипении. Теплоотдача при пленочном кипении.*

*Конденсацией* называют переход вещества из газообразного состояния в жидкое или твердое. Конденсация насыщенного или перегретого пара происходит при его охлаждении ниже температуры насыщения. Она может протекать в объеме пара или парогазовой смеси либо на поверхности твердого тела или жидкости, с которыми пар (парогазовая смесь) находится в контакте. На



поверхности тела или жидкости возможны различные случаи протекания процесса конденсации: пленочная, капельная и смешанная.

Пленочной конденсацией называют конденсацию в жидкое состояние на лиофильной (хорошо смачиваемой жидкостью) поверхности твердого тела с образованием сплошной пленки конденсата.

Капельная конденсация – это конденсация в жидкое состояние на лиофобной (несмачиваемой жидкостью) поверхности твердого тела с образованием отдельных капель конденсата.

Смешанная конденсация – это конденсация в жидкое состояние на поверхности твердого тела, при которой на различных участках поверхности одновременно наблюдается как пленочная, так и капельная конденсация.

Контактная конденсация происходит непосредственно на поверхности жидкости (капель, струй и т. д.).

При пленочной конденсации выделяющаяся теплота отводится через охлаждаемую стенку и образовавшуюся на ней пленку конденсата. Термическое сопротивление в этом случае складывается из термического сопротивления пленки конденсата и фазового перехода на границе раздела жидкой и паровой фаз. Коэффициенты теплообмена при пленочной конденсации и прочих равных условиях на порядок меньше, чем при капельной.

Теплота при пленочной конденсации зависит от толщины пленки на поверхности теплообмена, от режима ее течения и от теплопроводности жидкости. На величину коэффициента теплообмена при конденсации большое влияние оказывает также присутствие в парах неконденсирующихся газов (например, воздуха), приводящее к снижению величины коэффициента теплообмена из-за экранирования поверхности теплообмена газовой прослойкой, имеющей низкую теплопроводность.

*Кипением* называется процесс образования пара внутри объема жидкости и на твердой поверхности нагрева, при котором паровые пузырьки образуются в отдельных точках поверхности – центрах парообразования. Различают два режима кипения – пузырьковый и пленочный. Пузырьковое кипение – это такое кипение, при котором пар образуется в виде периодически зарождающихся и растущих пузырей. Пленочным кипением называют кипение, при котором на поверхности нагрева образуется сплошная пленка пара, периодически прорывающегося в объем жидкости.

Изменение механизма (закономерностей) теплоотдачи в начале перехода от пузырькового режима кипения к пленочному или от пленочного к пузырьковому в теплотехнике называют кризисом теплоотдачи при кипении, а максимально возможную (при данных условиях) плотность теплового потока при пузырьковом кипении – первой критической плотностью теплового потока.

По достижении первой критической плотности теплового потока, дальнейшее увеличение температурного напора (разности температур стенки и жидкости) вызывает вначале существенное снижение плотности теплового потока до достижения минимально возможной (при данных условиях) плот-

ности теплового потока при пленочном кипении, называемой второй критической плотностью теплового потока.

На практике стремятся обеспечить бескритический режим работы парогенератора. Для расчета коэффициента теплообмена при кипении предложено большое количество эмпирических зависимостей.

### Теплообмен излучением, сложный теплообмен.

*Физическая природа, понятия и законы теплового излучения. Интегральный и спектральные характеристики энергии излучения: поток, плотность потока и интенсивность излучения.*

*Метод многократных отражений и метод полных потоков излучения. Классификация потоков излучения. Лучистый теплообмен между двумя безграничными пластинами, двумя concentрическими сферами и произвольно расположенными телами.*

*Угловые коэффициенты излучения. Теоретические основы современных зональных методов расчета теплообмена излучением. Интегральные уравнения излучения. Основы методов расчета теплообмена излучения от излучающей и поглощающей среды к поверхностям нагрева теплообменных устройств. Поглощательная способность и степень черноты среды (продуктов сгорания).*

*Понятие о методах расчета сложного теплообмена (радиоационно-кондуктивного и радиоационно-конвективного).*

Все нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн, распространяющихся в вакууме со скоростью света  $c = 299,8 \cdot 10^6$  м/с.

От длины волны зависит действие излучения при падении его на вещество (табл. 1).

Таблица 1

Примерная классификация электромагнитных колебаний

Виды излучения	Длина волны излучения $\lambda$ , м
Космическое (корпускулярное)	порядка $0,05 \cdot 10^{-12}$
$\gamma$ - излучение	$0,5 \cdot 10^{-12} - 0,1 \cdot 10^{-12}$
Рентгеновское	$1,10^{-12} - 20 \cdot 10^{-9}$
Ультрафиолетовое	$20 \cdot 10^{-9} - 0,4 \cdot 10^{-6}$
Видимое (световое)	$0,4 \cdot 10^{-6} - 0,8 \cdot 10^{-6}$
Тепловое (инфракрасное)	$0,8 \cdot 10^{-6} - 0,8 \cdot 10^{-3}$
Электромагнитные волны	$0,2 \cdot 10^{-3} - 10^3$

Тепловое излучение, заполняющее некоторую область пространства, как процесс распространения электромагнитных волн, испускаемых телом, совершенно не зависит от температуры окружающей среды. В противоположность лучистому переносу энергии тепловой поток, возникающий в твердых, жидких и

газовых телах под влиянием теплопроводности и конвекции, связан с температурным полем через градиент температуры.

Большинство твердых и жидких тел излучают энергию всех длин волн, т.е. имеют сплошной спектр излучения с длиной волны от 0 до  $\infty$ . К таким телам относятся непроводники и полупроводники электричества, а также металлы с окисленной шероховатой поверхностью. Чистые металлы с полированной поверхностью, газы и пары излучают энергию дискретно в определенных интервалах длин волн, т.е. имеют прерывистый спектр. Твердые и жидкие тела имеют значительные поглотительную и излучательную способности. Эти процессы у них протекают в тонких поверхностных слоях.

Интенсивность излучения зависит от природы тела, его теплового состояния (температуры), длины волны, состояния поверхности, а для газов и паров еще от толщины слоя и давления, так как их излучение и поглощение осуществляются всеми частицами объема вещества.

Процесс лучистого теплообмена между телами – это процесс превращения тепловой энергии в лучистую и обратно. Лучеиспускание свойственно всем телам при температурах, отличных от абсолютного нуля. Количество энергии излучения, передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность  $F$  называется потоком излучения (различают монохроматический и интегральный потоки излучения)  $Q$ , Вт. Из энергии излучения абсолютно черного тела  $Q_0$ , которая падает на тело в результате излучения других тел, часть поглощается телом  $Q_A$ , часть отражается  $Q_R$ , часть проходит сквозь него  $Q_D$ , следовательно:

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = 1,$$

где  $A, R, D$  – поглотительная, отражательная и пропускательная способности тела соответственно:  $A = \frac{Q_A}{Q_0}$ ;  $R = \frac{Q_R}{Q_0}$ ;  $D = \frac{Q_D}{Q_0}$ .

Отсюда

$$A + R + D = 1$$

В природе не существуют идеальные тела. Нет ни абсолютно черного тела (подстрочный индекс – 0), у которого  $A=1$ , ни абсолютно белого –  $R = 1$ , ни абсолютно прозрачного (диатермичного)  $D=1$ .

Введение в рассмотрение процессов идеальных тел необходимо, так как они дают предельные значения свойств, которые не достижимы реальными телами. Так, при переносе теплоты излучением между реальными телами для каждого из них

$$A \neq R \neq D \neq 1,$$

но в общем случае справедливо предыдущее соотношение.

Значения  $A, R$  и  $D$  зависят от природы тела, состояния поверхности, температуры и длины волны излучения. Например, обычное стекло пропускает видимые лучи и является непроницаемым для ультрафиолетовых лучей и в очень малой степени проницаемо для тепловых лучей.

Законы теплового излучения получены применительно к идеальному абсолютно черному телу и термодинамическому равновесию. Равновесным тепловым излучением называют тепловое излучение тел в замкнутых изотермических системах. Тепловое излучение имеет динамический характер. Тела в равновесной термодинамической системе одновременно излучают и поглощают энергию в одинаковых количествах, а результирующий поток энергии равен нулю ( $Q_{\text{рез}} = 0$ ).

Отношение плотности потока излучения, испускаемого в бесконечно малом интервале длин волн, к величине этого интервала длин волн называется спектральной плотностью потока излучения  $E_{\lambda}$ .

Зависимость спектральной плотности потока излучения от длины волны и температуры для абсолютно черного тела устанавливается законом Планка:

$$E_{\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1},$$

где  $E_{\lambda}$  – спектральная плотность потока излучения (спектральная интенсивность излучения) абсолютно черного тела, Вт;  $e$  – основание натуральных логарифмов;  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$  м·К – постоянные Планка;  $\lambda$  – длина волны, м;  $T$  – абсолютная температура, К.

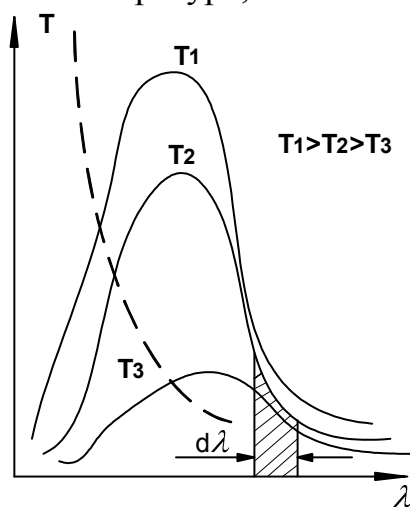


Рис. 1 Спектры излучения абсолютно черного тела

Излучение абсолютно черного тела имеет непрерывный спектр и зависит только от температуры и длины волны. При длинах волн  $\lambda = 0$  и  $\lambda = \infty$  спектральная плотность излучения равна нулю. С повышением температуры при данной длине волны  $E_{\lambda}$  возрастает. Спектральная плотность потока излучения  $E_{\lambda}$  имеет свое максимальное значение при каждой температуре излучения (рис. 5.1). С увеличением температуры абсолютно черного тела максимум излучения смещается в сторону коротких волн.

Длина волны  $\lambda_{\text{max}}$ , на которую приходится максимум при данной температуре  $T$ , определяется следующим образом:

$$\lambda_{\max} T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Данное соотношение составляет содержание закона Вина.

Пользуясь этим уравнением, можно вычислить температуру тела по распределению интенсивности в его спектре, рассматривая тело как черное или серое. Для Солнца  $\lambda_{\max} \approx 0,48 \text{ мкм}$ , тогда температура его поверхности  $T \approx 6000 \text{ К}$ . Закон Планка получен для абсолютно черного тела, а для не черных тел он выражает максимально возможную плотность потока излучения.

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость плотности потока интегрального полусферического излучения абсолютно черного тела  $E_0$  от температуры:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{o\lambda} d\lambda = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $E_0$  – плотность потока интегрального полусферического излучения абсолютно черного тела,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $c_0 = 5,6687 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ . Закон Стефана-Больцмана строго справедлив для серого излучения (рис. 2). Спектральная плотность излучения для каждого серого тела  $E_\lambda$  составляет некоторую, и притом одинаковую для всех длин волн и температур, долю от спектральной плотности излучения  $E_{o\lambda}$  абсолютно черного тела, то есть

$$\frac{E_\lambda}{E_{o\lambda}} = \text{const} = \varepsilon_\lambda$$

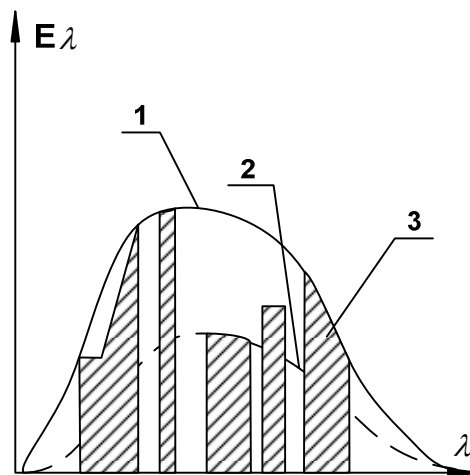


Рис. 2. Плотность потока излучения в зависимости от длины волны при одинаковой температуре:  
1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело; 3 – селективное излучение.

Величина  $\varepsilon_\lambda$  называется спектральной степенью черноты (спектральная относительная испускательная способность), численное значение которой зависит от физических свойств, качества поверхности того или иного серого тела. Очевидно, что согласно условиям, определяющим серое излучение, спектры излучения серого и абсолютно черного тел при одинаковых температурах подобны друг другу, а интегральная степень черноты  $\varepsilon$  равна спектральной  $\varepsilon_\lambda$ :

$$\frac{E}{E_0} = \varepsilon \quad \text{и} \quad \varepsilon = \varepsilon_\lambda$$

Закон Стефана-Больцмана для определения плотности потока интегрального полусферического излучения серого тела записывается в виде:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \varepsilon \int_0^\infty E_{o\lambda} d\lambda = \varepsilon c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = c \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $c = \varepsilon c_0$  коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Сопоставляя энергии интегрального излучения серого и абсолютно черного тела, степень черноты  $\varepsilon$  серого тела можно представить через отношение коэффициентов излучения:

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

Значение  $\varepsilon$  для серых тел лежит в пределах от 0 до 1, а коэффициента излучения от 0 до 5,6687 Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Как показали опыты, большинство технических материалов (непроводники и полупроводники электричества, металлы в окисленном состоянии) в достаточной степени отвечают требованиям серого тела.

Применение закона Стефана-Больцмана к реальным телам, принимаемым за серые тела, является справедливым лишь в той мере, в какой можно допустить, что коэффициент излучения постоянен и не зависит от температуры. В действительности коэффициент излучения (степень черноты) этих тел определяется не только его природой и температурой излучающей поверхности, но и ее состоянием. С увеличением шероховатости поверхности величина  $\varepsilon$  заметно возрастает. Так, например, для тщательно полированной электролитной меди  $\varepsilon = 0,018$ , а для продолжительно нагревавшейся, покрытой тонким слоем окиси,  $\varepsilon = 0,78$ .

Коэффициент излучения или степень черноты в большинстве случаев определяются экспериментально.

В отличие от серых тел, тела с селективным излучением (рис. 2, область 3) могут излучать и поглощать энергию в определенных, характерных для каждого тела областях спектра.

Закон Кирхгофа устанавливает связь между свойствами тела как поглотителя энергии, и как излучателя ее и формулируется так: отношение лучеиспускательной способности тела к поглощательной способности одинаково для всех серых тел, находящихся при одной и той же температуре, и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E}{A} = \frac{E_o}{A_o} = \frac{E_o}{1} = E_o = C_o \left( \frac{T}{100} \right)^4 = f(T)$$

Уравнение можно представить в виде

$$\varepsilon = \frac{E}{E_o} = \frac{A}{A_o} = A, \text{ т.е. } \varepsilon = A.$$

Следовательно, степень черноты  $\varepsilon$  какого-либо тела во всем интервале черного излучения равна поглощательной способности того же тела при той же температуре.

Для монохроматического излучения для каждой длины волны в отдельности

$$\frac{E_\lambda}{A_\lambda} = \frac{E_{o\lambda}}{A_{o\lambda}} = \frac{E_{o\lambda}}{1} = E_{o\lambda} = \phi(\lambda, T), \text{ а } \varepsilon_\lambda = A_\lambda.$$

Закон утверждает, что «отношение спектральной плотности излучения, какого-либо тела при определенной длине волны к его поглощательной способности при той же длине волны одинаково для всех тел, находящихся при одной и той же температуре, и равно спектральной плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре и длине волны».

Из закона Кирхгофа следует, что если тело обладает малым коэффициентом поглощения, то оно одновременно обладает и малой излучательной способностью (полированные металлы). Абсолютно черное тело, обладающее максимальным коэффициентом поглощения, имеет и наибольшую излучательную способность.

## Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов

*Классификация теплообменных аппаратов. Характерные конструктивные схемы теплообменных аппаратов. Основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках: проток, противоток, перекрестный ток, смешанная схема и многократный перекрестный ток.*

*Основные положения и уравнения теплового расчета. Средняя разность температур и метод ее вычисления. Температурный напор и его определение для основных схем движения теплоносителей. Сравнение проточка и противотока. Определение поверхности теплообмена при переменном коэффициенте теплопередачи и переменных теплоемкостях теплоносителей. Вычисление коэффициента теплопередачи для различной формы поверхностей теплообме-*

*на. Вычисление конечной температуры теплоносителей. Интенсификация процессов теплопередачи.*

*Особенности в методике теплового расчета регенеративных теплообменников. Выражение полного падения давления в теплообменнике. Гидравлические сопротивления и местные сопротивления. Затраты напора, обусловленные ускорением потока и преодолением гидростатического давления столба жидкости. Мощность, необходимая для перемещения теплоносителя.*

Теплообменником называют аппарат, в котором осуществляется теплообмен между двумя или несколькими теплоносителями или между теплоносителями и твердыми телами (стенкой, насадкой).

Теплообменники можно классифицировать по принципу Действия, назначению, способу организации движения теплоносителей и другим признакам.

*Смесительные теплообменники.* В данных теплообменниках теплопередача происходит при непосредственном смешении теплоносителей. Эти аппараты просты» компактны и используются в том случае, если не требуется дальнейшее разделение теплоносителей (например, нагрев воды водяным паром или горячей водой). Так, при обогреве теплиц, а также в системе водяного отопления зданий горячую воду из котельной или от ТЭЦ смешивают с охлажденной обратной водой, поступающей от потребителя.

*Рекуперативные теплообменники.* У этого вида теплообменников передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному осуществляется через разделяющую их стенку.

Простейшим рекуперативным теплообменником является теплообменник типа «труба в трубе». Простота конструкции, но громоздкость при больших поверхностях теплообмена. Развитием их является *кожухотрубный теплообменник*. Компактность, возможность развивать большие поверхности теплообмена в одном аппарате, но затруднена очистка межтрубного пространства.

В последние годы широкое распространение получили *пластинчатые рекуперативные теплообменники*, которые отличаются компактностью, низким гидравлическим сопротивлением и удобством очистки поверхностей теплообмена.

*Регенеративные теплообменники.* В данных теплообменниках горячий и холодный теплоносители поочередно омывают одну и ту же теплообменную поверхность.

*Теплообменники с промежуточным теплоносителем.* У этого вида горячий теплоноситель отдает теплоту некоторому промежуточному теплоносителю (жидкости или твердому зернистому материалу), а тот, в свою очередь, – холодному теплоносителю.

*Теплообменники с внутренними источниками теплоты.* В данных теплообменниках нагрев холодного теплоносителя осуществляется с помощью тепло-



выделений в самом аппарате за счет Действия электронагревателей или генератора токов высокой частоты.

Различают *конструктивный* и *поверочный* расчет теплообменника.

Конструктивный:

– известно: расход нагреваемого теплоносителя, начальная и конечная температура обоих теплоносителей;

– выбирают: тип теплообменника, его тепловую мощность, расход горячего теплоносителя, поверхность теплообмена по которой габариты аппарата.

Поверочный расчет:

– известно: тип, размеры теплообменника, поверхность теплообмена, расход теплоносителей, их начальная температура, удельные теплоемкости, коэффициент теплопередачи;

– определяют: тепловую мощность аппарата, конечную температуру теплоносителей, то есть проверяется применимость имеющегося теплообменника при стационарном режиме.

### *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕРМОДИНАМИКА.*

Теоретические сведения, необходимые для изучения дисциплины изложены в [1]. Ниже приведен краткий конспект лекций, а также темы для самостоятельного изучения и вопросы для самопроверки.

#### **Основные понятия и исходные положения термодинамики.**

Предмет и метод термодинамики. Термодинамическая система и окружающая среда. Параметры состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные состояния и процессы. Термодинамическое равновесие. Идеальный газ. Основные законы идеального газа (Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Авогадро). Термическое уравнение состояния идеального газа. Универсальная газовая постоянная, удельные газовые постоянные. Универсальное уравнение состояния идеального газа.

*Для самостоятельного изучения.*

Краткий исторический очерк развития термодинамики. ([1] стр. 5-6)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Кто являются основоположниками первого, второго и третьего закона термодинамики?
2. Какие ученые внесли наибольший вклад в развитие термодинамики?

#### **Первый закон термодинамики.**

Теплота и работа как способы передачи энергии. Уравнение работы газа при расширении. Внутренняя энергия. Обратимые и необратимые процессы.

Аналитические выражения первого закона термодинамики. Уравнение первого закона для стационарного потока массы

*Для самостоятельного изучения.*

Эквивалентность теплоты и работы. Опыты Румфорда и Джоуля. ([8] стр. 25-27)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Как в ходе развития науки менялись представления о теплоте?
2. В чем заключались эксперименты Румфорда?
3. В чем заключались опыты Джоуля?
4. Какие единицы применяют для измерения количества тепла и работы?

### **Смеси идеальных газов.**

Понятие о смесях. Способы задания и определение состава смеси. Расчет термодинамических свойств смеси идеальных газов по свойствам компонентов (кажущаяся молекулярная масса смеси, газовая постоянная смеси, удельный объем и плотность смеси).

*Для самостоятельного изучения.*

Закон Дальтона. Парциальные давления газов. ([8] стр. 20)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Сформулируйте закон Дальтона.
2. Как определяются парциальные давления газов?

### **Энтальпия. Теплоемкость газов.**

Свойства энтальпии, ее физический смысл. Теплоемкость газов (понятие теплоемкости, массовая, мольная, объемная теплоемкости, связь между ними). Изохорная и изобарная теплоемкости. Молекулярно-кинетическая и квантовая теории теплоемкости газов. Истинная и средняя теплоемкости.

*Для самостоятельного изучения.*

Определение теплоемкости газовой смеси. ([1] стр. 36)

*Вопросы для самопроверки.*

Как определяется теплоемкость газовой смеси?

### **Основные процессы идеальных газов.**

Порядок исследования термодинамических процессов. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Адиабатный процесс. Политропные процессы.

*Для самостоятельного изучения.*

1. Изменение теплоемкости рабочего тела в политропном процессе в зависимости от показателя политропы. ([1] стр. 83-85)
2. Способы определения показателя политропы. ([1] стр. 85-86)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Как изменяется теплоемкость рабочего тела в политропном процессе в зависимости от показателя политропы?
2. Поясните способы определения показателя политропы.

### **Второй закон термодинамики.**

Основные положения второго закона. Круговые термодинамические процессы, или циклы. Термический коэффициент полезного действия. Прямой обратимый цикл Карно. Теорема Карно. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно.

Ts-диаграмма и ее свойства. Термодинамические циклы в Ts-диаграмме. Свойства обратимых и необратимых циклов. Изменение энтропии в них. Принцип возрастания энтропии и физический смысл второго закона термодинамики. Максимальная работа. Эксергия. Потеря эксергии в необратимых процессах.

Энтропия и термодинамическая вероятность.

Характеристические функции. Химический потенциал. Общие условия термодинамического равновесия. Основные дифференциальные уравнения термодинамики.

*Для самостоятельного изучения.*

Теорема Карно. ([8] стр. 61-63)

*Вопросы для самопроверки.*

Сформулируйте и докажите теорему Карно.

### **Третий закон термодинамики.**

Формулировки и аналитическое выражение третьего закона термодинамики. Гипотеза Планка. Абсолютная энтропия. Следствия третьего закона термодинамики.

### **Процессы течения газов.**

Основные уравнения процессов течения. Скорость звука. Истечение из суживающихся сопел. Максимальный расход и критическая скорость. Переход через скорость звука. Сопло Лавалля. Истечение с учетом необратимости. Коэффициенты скорости и расхода. Параметры полного адиабатного торможения.

Уравнение процесса дросселирования. Дросселирование идеального газа.

*Для самостоятельного изучения.*

Параметры полного адиабатного торможения. ([8] стр. 297-298)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Что такое «температура адиабатного торможения»?
2. Как она определяется?
3. Где используется это понятие?

### **Процессы сжатия в компрессоре.**

Типы компрессоров. Принцип действия поршневого и центробежного компрессора. Работа одноступенчатого компрессора. Теоретическая индикаторная диаграмма. Действительная индикаторная диаграмма. Процессы сжатия в реальном компрессоре. Относительный внутренний КПД компрессора. Многоступенчатый компрессор.

*Для самостоятельного изучения.*

Способы уменьшения объемного КПД компрессора. ([1] стр. 151-152)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Как можно уменьшить объемный КПД компрессора?
2. Что такое коэффициент наполнения компрессора?

### **Газовые циклы.**

Принцип действия и классификация двигателей внутреннего сгорания. Индикаторная диаграмма и цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания. Циклы с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении и смешанным подводом тепла. КПД циклов и их термодинамический анализ.

Принципиальная схема газотурбинной установки. Цикл газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном давлении. Термический КПД идеального цикла. Действительный цикл и его КПД. Влияние необратимости процессов сжатия и расширения. Регенерация, многоступенчатое сжатие и ступенчатый подвод тепла в газотурбинной установке.

*Для самостоятельного изучения.*

Цикл газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном объеме. ([1] стр. 171-173)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Приведите схему ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме, поясните принцип действия.
2. Как изображается данный цикл в  $p, v$  и  $T, s$ -диаграммах?
3. Как определяется и от чего зависит термический КПД цикла?

## Реальные газы.

Термодинамические свойства реальных газов. Фазовые переходы. Точки фазового перехода.  $p$ - $v$ -диаграмма. Фактор сжимаемости и  $z$ - $p$ -диаграмма. Фазовая  $p$ - $T$ -диаграмма. Условия фазового равновесия. Правило фаз Гиббса. Уравнение Менделеева-Клаузиуса.

Уравнения состояния реальных газов (уравнение Майера-Боголюбова, уравнение Ван-дер-Ваальса, уравнение Вукаловича-Новикова). Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Принцип соответственных состояний и подобие термодинамических свойств веществ.

Эффект Джоуля-Томпсона. Дросселирование реальных газов.

*Для самостоятельного изучения.*

Опыт Эндрюса. ([8] стр. 174)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Какое вещество исследовал Эндрюс?
2. Какие зависимости давления, удельного объема и температуры им были установлены?

## Водяной пар.

$p$ , $v$ -диаграмма водяного пара. Удельный объем, энтальпия и энтропия воды, влажного, сухого насыщенного и перегретого пара. Сверхкритическая область состояния пара. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, других веществ.  $T$ , $s$ -диаграмма и  $h$ , $s$ -диаграмма для водяного пара.

Порядок расчета термодинамических процессов водяного пара. Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы.

Истечение водяного пара. Дросселирование водяного пара.

## Циклы паротурбинных установок.

Цикл Карно на влажном паре. Принципиальная схема паротурбинной установки. Цикл Ренкина. Изображение цикла Ренкина в  $p$ , $v$ - и  $T$ , $s$ -диаграммах. Термический КПД цикла. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла. Необратимое расширение пара в турбине. Тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки.

Цикл и схема паротурбинной установки со вторичным перегревом пара. Изображение цикла в  $T$ , $s$ - и  $h$ , $s$ -диаграммах. КПД цикла. Регенеративный подогрев питательной воды. Термический КПД регенеративного цикла. Комбинированная выработка электроэнергии и тепла. Теплофикационные циклы. Циклы атомных станций с водяным теплоносителем. Цикл насыщенного пара с промежуточной сепарацией и перегревом пара.

*Для самостоятельного изучения.*

1. Показатели, характеризующие экономичность цикла Ренкина. ([1] стр. 194)
2. Схема трехконтурной атомной электростанции. ([1] стр. 211)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Как определяется удельный расход пара?
2. Как определяется удельный расход теплоты?
3. Изобразите схему трехконтурной АЭС, назовите ее основные элементы.

### **Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.**

Общие сведения о методах анализа эффективности циклов. Методы сравнения термических КПД обратимых циклов. Метод коэффициентов полезного действия в анализе необратимых циклов. Энтропийный метод расчета потерь работоспособности в необратимых циклах. Эксергетический метод расчета потерь работоспособности.

### **Комбинированные циклы.**

Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела паротурбинных установок. Принципиальная схема, цикл и КПД паро-паровой бинарной установки. Схемы и циклы парогазовых установок.

Прямое преобразование тепла в электроэнергию. Цикл магнетогидродинамической установки.

*Для самостоятельного изучения.*

Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела паротурбинных установок. ([1] стр. 204-205)

*Вопросы для самопроверки.*

1. Какие положительные свойства имеет водяной пар (как рабочее тело)?
2. Какие отрицательные свойства?

### **Циклы холодильных установок.**

Основные понятия о работе холодильных установок. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Принципиальная схема и цикл воздушной холодильной установки. Принципиальная схема и цикл парокомпрессионной холодильной установки.

Цикл термотрансформатора (теплового насоса). Отопительный коэффициент.

*Для самостоятельного изучения.*

1. Цикл холодильной установки абсорбционного типа. ([1] стр. 223-224)
2. Цикл парожетторной холодильной установки. ([1] стр. 224-225)
3. Термотрансформаторы. ([1] стр. 229-231)

*Вопросы для самопроверки.*

1. В чем принципиальное отличие абсорбционных и парожетторных холодильных установок от воздушных и парокомпрессорных?
2. Поясните принцип действия холодильной установки абсорбционного типа.
3. Поясните принцип действия парожетторной холодильной установки.
4. Что такое термотрансформатор? Поясните его принцип действия.

### **Влажный воздух.**

Абсолютная и относительная влажность влажного воздуха. Влагосодержание. Температура точки росы. Расчет термодинамических свойств влажного воздуха.  $h, d$ -диаграмма влажного воздуха. Термодинамические процессы с влажным воздухом.

*Для самостоятельного изучения.*

Измерение влажности воздуха. ([1] стр. 124)

*Вопросы для самопроверки.*

1. С помощью какого прибора измеряют влажность воздуха?
2. Поясните его принцип действия.

### **Основы химической термодинамики.**

Классификация химических реакций. Тепловой эффект химической реакции. Закон Гесса. Константа химического равновесия и изменение термодинамического потенциала. Зависимость константы равновесия от температуры.

*Для самостоятельного изучения.*

1. Уравнения максимальной работы. ([1] стр. 242)
2. Зависимость химического равновесия от температуры реакции. ([1] стр. 252).

*Вопросы для самопроверки.*

1. Запишите уравнения максимальной работы. Поясните входящие в них величины.
2. Как влияет температура реакции на химическое равновесие?

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕПЛОМАССОБМЕН.

#### Методические рекомендации по проведению практических занятий

Практические занятия предусматривают решение задач по темам дисциплины. Основные расчетные формулы, необходимые для решения задач, задачи (с ответами), примеры решения типовых задач и необходимый справочный материал приведены в [4].

В начале практического занятия следует вспомнить необходимые для решения задач теоретические сведения (работа с аудиторией). Далее разбираются несколько (три, четыре – в зависимости от объема) типовых задач. Приводится алгоритм решения типовых задач. Разбираются примеры типовых ошибок. Далее для решения предлагаются более сложные задачи (одна, две), требующие креативного подхода.

#### Перечень тем практических занятий.

1. Теплопроводность при стационарном режиме.
2. Теплопроводность при нестационарном режиме.
3. Основные положения конвективного теплообмена, теория подобия.
4. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности.
5. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.
6. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб.
7. Теплоотдача при свободном движении жидкости.
8. Конвективный тепло- и массообмен .
9. Теплоотдача при конденсации пара.
10. Теплоотдача при кипении однокомпонентных жидкостей.
11. Тепловое излучение.
12. Расчет теплообменных аппаратов.

#### Методические указания к практическим занятиям

Таблица 2

№	Темы практических занятий	Объем в часах	Номера задач	Формы контроля
1	2	3	4	5
1	Теплопроводность при стационарном режиме	10	1-3, 1-5, 1-6*, 1-8, 1-9, 1-15, 1-16, 1-22, 1-20*, 1-26, 1-29	Проверочная работа № 1



2	Теплопроводность при нестационарном режиме	6	2-1, 2-3*, 2-4, 2-6, 2-9, 2-10, 2-11, 2-15	Проверочная работа № 2
3	Основные положения конвективного теплообмена, теория подобия	4	3-1, 3-2, 3-4, 3-5, 3-10, 3-11*	
4	Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности	4	4-1, 4-2, 4-4, 4-5, 4-7, 4-8*, 4-10	Проверочная работа № 3
5	Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах	6	5-3, 5-4, 5-8, 5-11, 5-21, 5-23*, 5-45, 5-46, 5-55	
6	Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб	4	6-1, 6-4, 6-7*, 6-8, 6-13, 6-19, 6-23	Проверочная работа № 4
7	Теплоотдача при свободном движении жидкости	4	7-2, 7-3, 7-6, 7-10, 7-13, 7-14*, 7-18	
8	Теплоотдача при конденсации пара	4	8-3, 8-6, 8-10, 8-12*, 8-15, 8-23, 8-27, 8-30	Проверочная работа № 5
9	Теплоотдача при кипении однокомпонентных жидкостей	4	9-2, 9-6, 9-8, 9-10*, 9-15, 9-17, 9-18	
10	Тепловое излучение	4	10-1, 10-3*, 10-11, 10-20, 11-5, 11-7*, 11-11	Проверочная работа № 6
11	Расчет теплообменных аппаратов	4	12-3, 12-4*, 12-5, 12-7, 12-9, 12-10, 12-16, 12-18	Выполнение и защита КР

Задачи, отмеченные \* рекомендуются для самостоятельного решения.

## *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕРМОДИНАМИКА.*

### **Методические рекомендации по проведению практических занятий**

Практические занятия предусматривают решение задач по темам дисциплины. Основные расчетные формулы, необходимые для решения задач, задачи (с ответами), примеры решения типовых задач и необходимый справочный материал приведены в [2].

В начале практического занятия следует вспомнить необходимые для решения задач теоретические сведения (работа с аудиторией). Далее разбираются несколько (три, четыре – в зависимости от объема) типовых задач. Приводится (если это необходимо) алгоритм решения типовых задач. Разбираются примеры

типовых ошибок. Далее для решения предлагаются более сложные задачи (одна, две), требующие креативного подхода.

Выдается домашнее расчетное задание (если оно предусмотрено по данной теме), анализируется выполнение предыдущего домашнего задания, разбираются типовые ошибки.

### Перечень тем практических занятий.

1. Параметры состояния.
2. Законы и уравнения состояния идеальных газов.
3. Первый закон термодинамики.
4. Теплоемкость, энтальпия и внутренняя энергия идеальных газов.
5. Основные процессы идеальных газов.
6. Второй закон термодинамики.
7. Истечение и дросселирование газов.
8. Расчет компрессоров.
9. Циклы двигателей внутреннего сгорания.
10. Циклы газотурбинных установок.
11. Реальные газы. Свойства воды и водяного пара. Процессы изменения состояния водяного пара.
12. Истечение и дросселирование паров.
13. Циклы паротурбинных и парогазовых установок.
14. Циклы холодильных машин.
15. Влажный воздух.
16. Элементы термодинамики химических процессов.

### Методические указания к практическим занятиям

Таблица 1

№	Темы практических занятий	Объем в часах	Номера задач	Формы контроля
1	2	3	4	5
1	Параметры состояния	2	1.2, 1.4, 1.6*, 1.13, 1.14, 1.18	проверочная работа № 1
2	Законы и уравнения состояния идеальных газов	2	3.1*, 3.2*, 3.3*, 3.4, 3.5, 3.8, 3.18, 3.22, 3.23	проверочная работа № 2, домашнее задание № 1
3	Первый закон термодинамики	2	2.1, 2.2*, 2.3, 2.6, 2.11*, 2.12, 2.14, 2.16, 2.20	
4	Теплоемкость, энтальпия и внутренняя энергия идеальных газов	4	4.1, 4.2*, 4.3, 4.6*, 4.7, 4.8*, 4.12, 4.14, 4.15	проверочная работа № 2, домашнее

				задание № 2
5	Основные процессы идеальных газов	4	6.2*. 6.5, 6.6., 6.7, 6.8, 6.16, 6.20, 6.24*, 6.25, 6.31, 6.33*, 6.35, 6.38	проверочная работа № 3, домашнее задание № 3
6	Второй закон термодинамики	2	7.1, 7.5, 7.12, 7.19, 7.21*, 7.23, 7.25*, 7.27, 7.28*	домашнее задание № 4
1	2	3	4	5
7	Истечение и дросселирование газов	4	11.2, 11.4, 11.6, 11.12*, 11.13, 11.16. 11.20, 11.28*	домашнее задание № 5
8	Расчет компрессоров	4	12.2, 12.4, 12.5, 12.10*, 12.14	проверочная работа № 4, домашнее задание № 6
9	Циклы двигателей внутреннего сгорания	4	12.17, 12.18, 12.22*, 12.23, 12.24, 12.25	проверочная работа № 4
10	Циклы газотурбинных установок	4	13.1*, 13.2*, 13.4, 13.6, 13.7, 13.12	проверочная работа № 4
11	Реальные газы. Свойства воды и водяного пара. Процессы изменения состояния водяного пара	4	9.1, 9.2*, 9.3, 9.4, 9.8, 9.15, 9.24*, 9.25, 9.26, 9.29, 9.31, 9.39*, 9.44	проверочная работа № 5, домашнее задание № 7
12	Истечение и дросселирование паров	2	11.33, 11.37, 11.39, 11.41*, 11.47, 11.48, 11.53*	домашнее задание № 8
13	Циклы паротурбинных и парогазовых установок	8	14.1, 14.2, 14.3, 14.4*, 14.6, 14.7*, 14.8*, 14.9. 14.11, 14.13, 14.15, 14.17*, 14.18. 14.20, 14.22, 14.23, 14.29, 14.30, 14.31, 14.34	проверочная работа № 6
14	Циклы холодильных машин	4	15.1, 15.4*, 15.5, 15.7, 15.11, 15.14	проверочная работа № 7, домашнее

				задание № 9
15	Влажный воздух	2	10.1, 10.3, 10.4. 10.6. 10.8*, 10.9, 10.13, 10.15*, 10.16	проверочная работа № 8, домашнее задание № 10
16	Элементы термодинамики химических процессов	2	16.1, 16.3, 16.9, 16.14, 16.16*, 16.18	

Задачи, отмеченные \* рекомендуются для самостоятельного решения.

### План проведения практического занятия

Тема занятия: Циклы холодильных машин. Расчет воздушной холодильной установки.

Цель: научить студентов определять параметры цикла воздушной холодильной установки.

Вопросы:

1. Какие установки называются холодильными?
2. Что такое холодильный агент?
3. Назовите группы холодильных установок.
4. Какие вещества являются хладагентами в этих установках?
5. Из каких элементов состоит схема воздушной холодильной установки? Какие процессы в них происходят?
6. Какой величиной характеризуется эффективность работы холодильной установки? Как она определяется?
7. Как определяется холодильный коэффициент цикла Карно?

Решение задач

Указания.

Записать краткое условие задачи, перевести исходные данные в систему СИ.

При расчете циклов холодильных установок следует изобразить рассматриваемый цикл в  $T,s$ -диаграмме. Далее определяются температуры в характерных точках цикла и неизвестные (по условию) величины.

#### Задача № 15.1 [2]

Воздушная холодильная машина должна обеспечить температуру в охлаждаемом помещении  $t_{\text{охл}} = -5^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающей среды  $t_{\text{о.с.}} = 20^{\circ}\text{C}$ . Холодопроизводительность машины 840 МДж/ч. Давление воздуха на выходе из компрессора  $p_2 = 0,5$  МПа, давление в холодильной камере  $p_1 = 0,1$  МПа.

Определите мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество теплоты, передаваемое окружающей

среде. Подсчитайте холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур. Представьте цикл в Ts-диаграмме.

Решение.

1. Определяем температуры в характерных точках цикла. Температуру в точке 2 найдем из соотношения параметров адиабатного процесса 1-2.

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} ; \quad T_2 = 268 \cdot \left( \frac{0,5}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 424,5 \text{ K}$$

Температуру в точке 4 найдем из соотношения параметров адиабатного процесса 3-4.

$$T_4 = T_3 \cdot \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} ; \quad T_4 = 293 \cdot \left( \frac{0,1}{0,5} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 185 \text{ K}$$

2. Определяем удельную холодопроизводительность цикла и расход воздуха (хладагента).

Удельная холодопроизводительность определяется:

$q_0 = c_p (T_1 - T_4)$ , где  $c_p$  – изобарная теплоемкость воздуха.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} ; \quad \mu c_p = \frac{7}{2} \tilde{R} ; \quad c_p = \frac{29,1}{28,96} = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

$$q_0 = c_p (T_1 - T_4) ; \quad q_0 = 1,005(268 - 185) = 83,415 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Расход воздуха:

$$m_\tau = \frac{Q_0}{q_0} ; \quad m_\tau = \frac{840 \cdot 10^3}{83,415} = 10070 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

3. Определяем холодильный коэффициент цикла

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1} ; \quad \varepsilon = \frac{268}{424,5 - 268} = 1,71$$

Холодильный коэффициент цикла Карно, осуществляемого в том же интервале температур.

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_3 - T_1} ; \quad \varepsilon = \frac{268}{293 - 268} = 10,72$$

4. Определяем мощность двигателя для привода установки.

Мощность двигателя установки определяются:

$$N = L = \frac{Q_0}{\varepsilon}; \quad N = L = \frac{840 \cdot 10^3}{3600 \cdot 1,71} = 136,45 \text{ кВт}$$

Также мощность установки можно определить как разность работы, затрачиваемой в компрессоре, и работы, получаемой в расширительном цилиндре.

Удельная работа, затрачиваемая на привод компрессора

$$l_K = c_p (T_2 - T_1); \quad l_K = 1,005(424,5 - 268) = 157,28 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная работа, получаемая в детандере

$$l_d = c_p (T_3 - T_4); \quad l_d = 1,005(293 - 185) = 108,54 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная работа, затрачиваемая на привод установки (удельная работа цикла)

$$l_u = l_K - l_d; \quad l_u = 157,28 - 108,54 = 48,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Мощность двигателя установки

$$N = L = m_\tau \cdot l_u; \quad N = L = \frac{10070}{3600} \cdot 48,74 = 136,34 \text{ кВт}$$

5. Определяем количество теплоты, передаваемое окружающей среде.

$$Q_2 = m_\tau \cdot c_p (T_2 - T_3);$$

$$Q_2 = 10070 \cdot 1,005(424,5 - 293) = 1330,8 \frac{\text{МДж}}{\text{ч}}$$

#### Задача № 15.4 [2]

Воздушная холодильная машина производит 198 кг/ч льда при  $-6^\circ\text{C}$  из воды, температура которой  $12^\circ\text{C}$ . Воздух в компрессоре сжимается от давления  $p_1 = 0,0981$  МПа до  $p_2 = 0,5$  МПа, температура на выходе из компрессора  $140^\circ\text{C}$ . Затем воздух поступает в холодильник и там охлаждается до  $t_3 = 30^\circ\text{C}$ .

Определите часовой расход воздуха и потребную для данной машины мощность.

#### Задача № 15.5 [2]

Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность 840 МДж/ч. Параметры воздуха на выходе из холодильной машины:  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = -3^\circ\text{C}$ . После сжатия воздух имеет давление 0,4 МПа. Температура окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ .

Определите температуру воздуха после расширения, мощность компрессора и детандера, холодильный коэффициент. Определите холодильный коэффициент обратного цикла Карно в том же интервале температур.

#### Домашнее расчетное задание

После изучения данной темы на лекционных занятиях и решения задач на практических занятиях, для самостоятельного выполнения выдается задание № 9.

Методические указания по выполнению домашних заданий, задания для расчета и исходные данные приведены в пп. 5.3. и 5.4.

### **3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ**

#### *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕПЛОМАССООБМЕН.*

#### **Методические рекомендации по проведению лабораторных занятий**

Лабораторные занятия предусматривают проведение эксперимента на лабораторных стендах (используется компьютерный лабораторный стенд, где реализуется имитационное моделирование процессов теплообмена). Методические указания по выполнению лабораторных работ, контрольные вопросы и необходимый справочный материал приведены в [3].

На первом занятии зав. лабораторией проводит инструктаж по технике безопасности, делается соответствующая запись в журнале по ТБ лаборатории. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

В начале лабораторного занятия осуществляется допуск к выполнению работы. Для допуска необходимо знать цель и содержание работы, пояснить схему рабочего участка и порядок проведения эксперимента.

Лабораторная работа выполняется подгруппой (два, три человека), каждой подгруппе выдается индивидуальное задание (исходные данные).

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- тему и цель работы;
- схему экспериментального участка;
- протокол эксперимента (в табличной форме);
- обработку результатов исследования (в отчете приводятся подробные расчеты для одного экспериментального режима, при выполнении нескольких аналогичных расчетов результаты приводятся в табличной форме);
- результаты обработки опытных данных (в табличной форме);
- графические зависимости, полученные в работе;

- ВЫВОДЫ.

Текст отчета выполняется на листах формата А4 в рукописном или машинописном виде, графические зависимости следует выполнять на миллиметровой бумаге формата А4 или А5. Обязательно указание единиц измерения приводимых (полученных экспериментально или рассчитанных) величин. Допускается выполнение расчетов и построение графических зависимостей с помощью прикладных расчетных программ (например, Mathcad).

Для защиты результатов лабораторной работы следует представить преподавателю отчет и ответить (письменно или устно) на контрольные вопросы.

Темы лабораторных занятий приведены в рабочей программе дисциплины и настоящем учебно-методическом комплексе.

### **Перечень тем лабораторных занятий**

1. Определение коэффициента теплопроводности твердых материалов методом пластины.
2. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе.
3. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра.
4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра в атмосфере различных газов.
5. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом.
6. Исследование работы теплообменного аппарата.

### **Методические указания по выполнению лабораторных работ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ приведены в [3].

Методические указания содержат: тему и цель работы, теоретические сведения, описание рабочего участка (экспериментальной установки), порядок проведения эксперимента, обработку результатов исследования, контрольные вопросы и необходимый справочный материал.

## *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕРМОДИНАМИКА.*

### **Методические рекомендации по проведению лабораторных занятий**

Лабораторные занятия предусматривают проведение эксперимента на лабораторных стендах (в том числе используется компьютерный лабораторный стенд, где реализуется имитационное моделирование термодинамических про-



цессов). Методические указания по выполнению лабораторных работ, контрольные вопросы и необходимый справочный материал приведены в [3, 9].

На первом занятии зав. лабораторией проводит инструктаж по технике безопасности, делается соответствующая запись в журнале по ТБ лаборатории. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

В начале лабораторного занятия осуществляется допуск к выполнению работы. Для допуска необходимо знать цель и содержание работы, пояснить схему рабочего участка и порядок проведения эксперимента.

Лабораторная работа выполняется подгруппой (два, три человека), каждой подгруппе выдается индивидуальное задание (исходные данные).

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- тему и цель работы;
- схему экспериментального участка;
- протокол эксперимента (в табличной форме);
- обработку результатов исследования (в отчете приводятся подробные расчеты для одного экспериментального режима, при выполнении нескольких аналогичных расчетов результаты приводятся в табличной форме);
- результаты обработки опытных данных (в табличной форме);
- графические зависимости, полученные в работе;
- выводы.

Текст отчета выполняется на листах формата А4 в рукописном или машинописном виде, графические зависимости следует выполнять на миллиметровой бумаге формата А4 или А5. Обязательно указание единиц измерения приводимых (полученных экспериментально или рассчитанных) величин. Допускается выполнение расчетов и построение графических зависимостей с помощью прикладных расчетных программ (например, Mathcad).

Для защиты результатов лабораторной работы следует представить преподавателю отчет и ответить (письменно или устно) на контрольные вопросы.

Темы лабораторных занятий приведены в рабочей программе дисциплины и настоящем учебно-методическом комплексе.

### **Перечень тем лабораторных занятий**

1. Определение изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении.
2. Изучение термодинамических процессов идеальных газов.
3. Исследование процесса адиабатного истечения газов через сужающееся сопло.
4. Исследование циклов паротурбинных установок.
5. Исследование процессов во влажном воздухе.

## Методические указания по выполнению лабораторных работ

Методические указания по выполнению лабораторных работ приведены в [3, 9].

Методические указания содержат: тему и цель работы, теоретические сведения, описание рабочего участка (экспериментальной установки), порядок проведения эксперимента, обработку результатов исследования, контрольные вопросы и необходимый справочный материал.

## 4.САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

### *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ.ТЕПЛОМАССООБМЕН.*

#### Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы

Самостоятельная работа предусматривает:

- подготовку студентов к аудиторным лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к выполнению и защите лабораторных работ;
- выполнение курсовой работы.

Для усвоения дисциплины необходима систематическая самостоятельная работа, контроль которой осуществляется с помощью графика самостоятельной работы (табл. 3).

Темы аудиторных лекционных, практических и лабораторных занятий; темы и примеры заданий для проверочных работ и курсовой работы; рекомендуемая литература приведены в рабочей программе дисциплины и настоящем учебно-методическом комплексе.

#### График самостоятельной работы студентов

Таблица 3

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки (недели)
1	2	3	4	5
1	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 1)	1 2	Тестирование на лекции. Проверочная работа № 1	1
2	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 2)	6	Тестирование на лекции	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
	Подготовка к лабораторной работе	2 2	Проверочная работа № 2 Защита лаб.работы	

3	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 3)	3 2	Тестирование на лекции Проверочная работа № 2 (по темам 2, 3)	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
4	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 4)  Подготовка к лабораторной работе	5 2  2	Тестирование на лекции. Проверочная работа № 3 Защита лаб.работы	17, 18, 19, 20, 21
1	2	3	4	5
5	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 5) Подготовка к лабораторной работе	1 2 4	Тестирование на лекции Проверочная работа № 4 Защита лаб.работы	22
6	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 6)	5 2	Тестирование на лекции Проверочная работа № 5	24, 25, 26, 27, 28
7	Подготовка к лекционным занятиям (тема 7)  Подготовка к лабораторной работе	2 2  2	Тестирование на лекции Проверочная работа № 6 Защита лаб.работы	29, 30, 31, 32
8	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 8) Подготовка к лабораторной работе	3 2 4	Тестирование на лекции  Защита лаб.работы	33, 34, 35, 36

### Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

Учебным рабочим планом специальности предусматривается выполнение курсовой работы по дисциплине «Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен» на тему «Тепловой и гидравлический расчет теплообменного аппарата». Выполнение и защита курсовой работы является важной составляющей самостоятельной работы студентов. При выполнении курсовой работы определяются геометрические характеристики теплообменного аппарата (число секций, длина) – конструкторский тепловой расчет, и мощность, необходимая для перемещения теплоносителя – гидравлический расчет. Порядок и пример расчета, исходные данные для проектирования приведены в п. 5.4.

Курсовая работа выполняется на листах формата А4 в объеме 25-30 страниц и графической части (2 листа), выполняемой в виде приложений на листах формата А3 (лист № 1) и формата А4 (лист № 2).

Задание на курсовую работу выдается преподавателем индивидуально на отдельном листе, который включается в курсовую работу. В задании указывается: тема курсовой работы, исходные данные, содержание курсовой работы, дата выдачи задания и срок сдачи выполненной курсовой работы.

#### График выполнения курсовой работы.

Таблица 4

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки (недели)
1	2	3	4	5
1	Тепловой расчет. Определение скорости и режима движения теплоносителей.	6	Проверка расчета	1
2	Тепловой расчет. Определение коэффициента теплопередачи.	6	Проверка расчета	2
1	2	3	4	5
3	Тепловой расчет. Определение геометрических характеристик.	6	Проверка расчета	3
4	Гидравлический расчет. Определение мощности, необходимой для перемещения теплоносителей.	6	Проверка расчета	4
5	Оформление курсовой работы	6	Нормоконтроль	5

Выполненная курсовая работа сдается преподавателю для проверки (два-три дня), защита курсовой работы производится в соответствии с графиком, по итогам защиты выставляется оценка. Студенты, не выполнившие или не защитившие курсовую работу, к экзаменационной сессии не допускаются.

#### Методические указания по выполнению курсовой работы

##### «Тепловой и гидравлический расчет теплообменного аппарата»

**Задание:** Выполнить тепловой расчет и определить основные размеры вертикального многоходового пароводяного трубчатого теплообменника жесткой конструкции, предназначенного для нагрева воды ( $G_1$ , т/ч) от  $t_{ж}^I$  до  $t_{ж}^{II}$ , °С.

Выполнить гидравлический расчет и определить потери давления  $\Delta p$  в проточной части аппарата и потребную мощность насоса.

Вода движется внутри латунных трубок [ $\lambda_{л} = 104,5 \frac{Вт}{м \times c}$ ] диаметром  $\frac{d_2}{d_1}$ ,

мм со скоростью  $\omega$ , м/с. Греющим теплоносителем служит сухой насыщенный водяной пар с давлением  $P$ , Па, который конденсируется на внешней поверхности трубок. При расчете тепловые потери в окружающую среду принимают до 10 % от количества подводимой теплоты.

### Варианты заданий для выполнения курсовой работы

	$P_{м},$ Па	$\frac{d_2}{d_1}$ мм	$G_1,$ т/ч	$\omega,$ м/с	$P_{т},$ Па	$t_{ж}^{\prime},$ $^{\circ}C$	$t_{ж}^{\prime\prime},$ $^{\circ}C$	$\eta$
1	$10 \times 10^4$	12/10	15	0,3	$3,8 \times 10^4$	14	65	0,98
2	$12 \times 10^4$	14/12	17	0,4	$4,1 \times 10^4$	16	70	0,96
3	$14 \times 10^4$	16/14	18	0,45	$4,2 \times 10^4$	18	73	0,95
4	$16 \times 10^4$	18/14	20	0,5	$4,5 \times 10^4$	20	75	0,97
5	$18 \times 10^4$	20/18	22	0,55	$4,8 \times 10^4$	22	78	0,98
6	$20 \times 10^4$	22/20	24	0,6	$5,0 \times 10^4$	24	80	0,95
7	$22 \times 10^4$	24/22	26	0,65	$5,5 \times 10^4$	26	82	0,96
8	$24 \times 10^4$	26/24	28	0,7	$6,0 \times 10^4$	28	84	0,97
9	$26 \times 10^4$	28/26	30	0,75	$6,5 \times 10^4$	30	86	0,95
10	$28 \times 10^4$	30/28	32	0,8	$7,0 \times 10^4$	32	88	0,96
11	$30 \times 10^4$	32/30	34	0,85	$7,5 \times 10^4$	34	90	0,97
12	$32 \times 10^4$	34/32	35	0,9	$8,0 \times 10^4$	36	93	0,98
13	$35 \times 10^4$	36/34	36	0,95	$8,5 \times 10^4$	38	95	0,96
14	$38 \times 10^4$	38/36	37	1,0	$9,0 \times 10^4$	40	98	0,95
15	$40 \times 10^4$	40/38	38	1,05	$9,5 \times 10^4$	42	100	0,94

Определяем количество передаваемой теплоты

$$Q = G_1 C_{p1} (t_{ж}^{\prime\prime} - t_{ж}^{\prime}), \text{ кВт}$$

Определяем расход пара  $G_2$ .

При  $p = \dots$  кПа,  $t_s = \dots$   $^{\circ}C$ ,  $i^{\prime\prime} = \dots$  кДж/кг,  $i^{\prime} = \dots$  кДж/кг

$$G_2 = \frac{Q}{0,98 \times (i^{\prime\prime} - i^{\prime})}, \text{ кг/с}$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи внешней поверхности трубки при конденсации пара необходимо знать температуру внешней поверхности стенки  $t_{c2}$  и высоту трубки  $H$ . Так как значения этих величин неизвестны, то расчет проводим методом последовательных приближений.

Определяем среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta t_{л} = \frac{t_{жс1}^{\prime\prime} - t_{жс1}^{\prime}}{\ln \frac{t_s - t_{жс1}^{\prime}}{t_s - t_{жс1}^{\prime\prime}}}, \text{ } ^{\circ}C$$

В первом приближении задаемся

$$t_{c2} \approx t_s - \frac{\Delta t_{\text{л}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Кроме того, задаемся высотой трубок  $H = 2\text{ м}$ .

Приведенная длина трубки

$$Z = \Delta t_2 \text{ НА}$$

При  $t_s = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$  по таблице находим  $A = \dots \frac{1}{\text{м}^0\text{C}}$  и  $B = \dots \times 10^{-3} \text{ м/Вт}$ .

Тогда  $Z = (t_s - t_{c2}) \text{ НА} < 2300$

Течение пленки конденсата – ламинарное по всей высоте трубок; расчет ведем по формуле

$$\text{Re} = 3,8 Z^{0,78}$$

$$\alpha_2 = \frac{\text{Re}}{\Delta t_2 \text{ НА}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ } ^\circ\text{C}}$$

Определяем коэффициент теплоотдачи к воде. Среднеарифметическая температура воды  $t_{\text{ж1}} = 0,5(t_{\text{ж1}}' + t_{\text{ж1}}'')$ ,  $^\circ\text{C}$ .

При этой температуре

$$v_{\text{ж1}} = \dots \times 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$\lambda_{\text{ж1}} = \dots \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\rho_{\text{ж1}} = \dots \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Pr}_{\text{ж1}} = \dots$$

$$\text{Re}_{\text{ж1}} = \frac{\omega d_1}{v_1}$$

Течение воды турбулентное; расчет ведем для турбулентного режима движения. Перепад температур по толщине стенки оцениваем примерно в  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , тогда  $t_{c1} \approx t_{c2} - 1, \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $\text{Pr}_{c1} = \dots$

$$\text{Nu}_{\text{ж1}} = 0,021 \text{ Re}_{\text{ж1}}^{0,8} \text{ Re}_{\text{ж1}}^{0,43} \left( \frac{\text{Re}_{\text{ж1}}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25}$$

$$\alpha_1 = \text{Nu}_{\text{ж1}} \frac{\lambda_{\text{ж1}}}{d_1}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ } ^\circ\text{C}}$$

Коэффициент теплопередачи

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ } ^\circ\text{C}}$$

Средняя плотность теплового потока

$$g = \kappa \Delta t_{\text{л}}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$

Площадь поверхности нагрева в первом приближении

$$F = \frac{Q}{g}, \text{ м}^2$$

Число трубок в одном ходе

$$m = \frac{4G_1}{\rho_{ж1} \omega \pi d_1^2}$$

Число ходов 4 и всего трубок  $n = 4 \times 50 = 200$

Высота трубок в первом приближении

$$H = \frac{F}{\pi d_{cp} n}, \text{ м}$$

Температура стенок трубок

$$t_{c2} = t_s - \frac{g}{\alpha_2}$$

$$t_{c1} = t_{c2} - \frac{g}{\lambda} \delta$$

Т.к. полученные значения величин  $H$ ,  $t_{c2}$  и  $t_{c1}$  не совпадают с принятыми, производят повторный расчет, принимая  $H = \dots \text{ м}$ ,  $t_{c2} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{c1} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$ .

В результате повторного расчета с пункта 4 получаем  $\alpha_1 = \dots \frac{Вт}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$ ,  $\alpha_2 = \dots \frac{Вт}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$ ,  $\kappa = \dots \frac{Вт}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$ ,  $g = \dots \frac{Вт}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$ ,  $F = \dots \text{ м}^2$ . Высота трубок во втором при-

ближении  $H = \dots \text{ м}$ . Температура поверхности стенок трубок во втором приближении  $t_{c2} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{c1} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$ . Совпадение полученных значений с ранее принятыми лежит в пределах точности расчета, и, таким образом, окончательно принимаем  $F = \dots \text{ м}^2$  и  $H = \dots \text{ м}$ .

### **Конструктивный расчет теплообменных аппаратов**

1. Определяем минимальный шаг расположения труб

$$l_{\min} = (1.25 \dots 1.35) d_H$$

$d_H$  – наружный диаметр трубы

$$l_{\min} = (1.35) d_H \approx 18 \text{ мм}$$

Ширина простенка должна быть связана условием

$$l_3 = (l - d_H) \geq 6 \text{ мм}$$

2. Определяем количество труб, расположенных на его диагоналях

$$n_0 = 0.75 (n_g - 1) + 1$$

$n_0$  – общее количество труб в аппарате

$n_g$  – количество труб на его диагоналях

$$200 = 0.75 (n_g - 0,75) + 1$$

$$n_g = \sqrt{\frac{199,75}{0,75}} = 16,31 \approx 16$$

3. Количество труб, расположенных на стороне наибольшего шестиугольника

$$2a - 1 = n_g$$

$$a = \frac{16+1}{2} = 8,5 \approx 8$$

$a$  – количество труб на стороне наибольшего шестиугольника

4. Внутренний диаметр корпуса аппарата при расположении труб по сторонам правильных шестиугольников определяют по выражению

$$D_b = l(n_g - 1) + d_n + 2(l - d_n)$$

$$D_b = 18(16 - 1) + 12 + 2(18 - 12) = 294 \text{ мм} \approx 300 \text{ мм}$$

5. В случае наличия перегородок, внутренний диаметр аппарата определяется зависимостью

$$D_b = 1,131 \sqrt{\frac{n_0}{\psi} \sin \varphi_0}$$

$\psi$  – коэффициент заполнения трубной решетки (для многоходовых  $\psi = 0,6 \dots 0,8$ , одноходовых  $= 0,8 \dots 0,9$ )

$\varphi$  – угол, образуемый центральными линиями трубных рядов, градус

$$D_b = 1,13 \times 18 \sqrt{\frac{200}{0,8} 0,809} = 289,26 \approx 290$$

Расчет пункта 4 верен.

6. Толщина трубной решетки

$$h = \sqrt{\frac{KP(D_b^2 - n_0 d_b^2)}{[\sigma_u]N}} + \delta, \quad \delta = 1 - 4 \text{ мм}$$

$K$  – коэффициент закрепления, 0,162;

$P$  – перепад давлений по сторонам трубной решетки, Па;

$[\sigma_u]$  – допускаемое напряжение на изгибе, па;

$N$  – коэффициент ослабления трубной решетки отверстиями

$$N = \frac{(l - d_n)}{l} = \frac{18 - 12}{18} = 0,333$$

7. Толщина трубной стальной решетки, исходя из надежной развальцовки труб должна быть больше, чем найденная.

$$h_{\min} = 0,005 + 0,125 d_n$$

### **Гидравлический расчет**

Гидравлический расчет состоит в определении потерь давления  $\Delta p$  в проточной части аппарата. В данном случае проточных частей две – трубная и кожухотрубная. Расчеты должны выполняться для обеих полостей. Гидравлические потери складываются из потерь на трение ( $\Delta p_{\text{тр}}$ ) и на преодоление местных сопротивлений ( $\Delta p_{\text{мс}}$ ).

$$\Delta p_{\text{тр}} = \left( \lambda \frac{l}{d_b} + \sum \xi_{\text{мс}} \right) \frac{\omega^2 \rho}{2};$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re}_{\text{ж}} - 1,5)^2} = \frac{1}{(1,8 \lg 81942 - 1,5)^2} = \frac{1}{53,94} = 0,0185$$

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{0,45 \times 0,012}{0,659 \times 10^{-6}} = 81942$$

Коэффициенты местных сопротивлений определяем по таблице



Вход и выход  $2(1,5 + 1) = 5$

Поворот между ходами  $2,5 \times 3 = 7,5$

Итого  $\sum \xi_{mc} = 12,5$

Гидравлическое сопротивление трубного пространства

$$\Delta p_{\text{тр}} = (0,0185 \frac{2,5 \times 4 \times 50}{0,012} + \sum 12,5) \frac{0,45^2 992,5}{2} = 78725$$

Потребная мощность насоса, побуждающая движение жидкости через аппарат

$$N = \frac{\Delta P V}{\eta} = \frac{78725 \times 4.72}{1000 \times 0.65 \times 992.2} = 0,5761 \text{ Вт} = 576,1 \text{ кВт}$$

$$N = \frac{\Delta P V}{1000 \rho \eta}, \text{ кВт}$$

$$\eta_{\text{насоса}} = 0,6 \dots 0,65$$

## Комплекты заданий для проверочных работ

### Проверочная работа № 1

«Определение теплопроводности плоской и цилиндрической стенок»

1. Стальная труба паропровода ( $d_1/d_2 = 50/60$  мм) покрыта слоем теплоизоляции с теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}} = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и толщиной  $\delta_{\text{из}} = 60$  мм. Найти суточную потерю теплоты с 1 м длины изолированного паропровода и определить, во сколько раз при наличии изоляции потеря теплоты меньше, чем при неизолированном паропроводе. Определить температуру на внутренней и наружной поверхности теплоизоляции. При расчете принять:  $\lambda_{\text{ст}} = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , температура пара  $t_1 = 170^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_1 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

2. Плоская стенка бака площадью  $F = 12 \text{ м}^2$  покрыта двухслойной изоляцией. Стенка бака стальная, толщиной  $\delta_1 = 9$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1 = 45,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Первый слой изоляции выполнен из материала толщиной  $\delta_2 = 50$  мм, коэффициент теплопроводности которого определяется уравнением  $\lambda_2 = 0,143 + 0,00019 t$ .

Второй слой  $\delta_3 = 10$  мм,  $\lambda_3 = 0,72 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Температура внутренней поверхности стенки бака  $t_{c1} = 280^\circ\text{C}$  и внешней поверхности изоляции  $t_{c4} = 50^\circ\text{C}$ . Вычислить количество теплоты, передаваемой через стенку, температуры на границах слоев изоляции.

**Проверочная работа № 2**  
**«Нестационарный теплообмен. Теория подобия»**

1. Изделие в форме параллелепипеда размером  $l_1 \times l_2 \times l_3$  ( $l_1$  – толщина,  $l_2$  – ширина,  $l_3$  – длина), выполненное из однородного материала с известными теплофизическими свойствами – коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкостью  $c_p$  и плотностью  $\rho$ , имея одинаковую по объему температуру  $t_0$ , помещается в среду с постоянной температурой  $t_{ж}$ . Коэффициент теплоотдачи между средой и стенками изделия в процессе нагревания изделия остается постоянным, равным  $\alpha$ .

Определить, в каких точках нагреваемого изделия будет наблюдаться минимум и максимум температуры, и вычислить эти температуры через время  $\tau$  после помещения тела в горячую среду.

Размеры изделия, мм	Материал пластины	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_0$ , °С	среда	$t_{ж}$ , °С	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\tau$ , с
6x6x10	металл	20	330	6050	10	масло	110	670	9

2. Исследования тепловых потерь с поверхности горизонтальных паропроводов в условиях естественной конвекции проводилось на лабораторной установке, где производились на горизонтальной трубе диаметром  $d = 30$  мм.

Опыты проводились при различных температурах стенки трубы. При этом были получены следующие значения коэффициента теплоотдачи:

$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	11,75	12,34	12,87	13,34	13,75
$t_c$ , °С	210	250	290	330	370

Температура окружающего воздуха  $t_{ж}$  вдали от поверхности трубы оставалась постоянной и равной 30 °С.

На основании полученных опытных значений коэффициентов теплоотдачи найти обобщенную зависимость для расчета теплоотдачи в условиях естественной конвекции. Учитывая, что критерий Pr для воздуха в широком интервале температур остается практически постоянным, зависимость искать в виде  $Nu = f(Gr)$ .

При обработке опытных данных в качестве определяющей температуры принять температуру воздуха вдали от поверхности трубы.

**Проверочная работа № 3**  
**«Теплоотдача при вынужденном движении жидкости»**

1. Тонкая пластина длиной  $l_0 = 125$  мм обтекается продольным потоком жидкости. Температура набегающего потока  $t_0 = 10$  °С.

Вычислить критическую длину  $x_{кр}$ , предельную толщину ламинарного пограничного слоя  $\delta_{кр}$ , значения местных коэффициентов теплоотдачи и толщину-

ну ламинарного пограничного слоя на расстояниях  $x=0,1 l_0$ ;  $0,5 l_0$  и  $1,0 l_0$  от передней кромки пластины.

Расчет произвести для двух случаев:

а) пластина обтекается воздухом при скорости набегающего потока  $w_0=10$  м/с;

б) пластина обтекается водой при  $w_0=2$  м/с.

При расчете принять  $Re_{x\text{ КР}}=5 \cdot 10^5$ .

2. Вычислить средний коэффициент теплоотдачи при течении трансформаторного масла в трубе диаметром  $d=10$  мм и длиной  $l=1$  м, если средняя по длине трубы температура масла  $t_{ж}=70$  °С, средняя температура стенки трубки  $t_c=10$  °С и скорость масла  $w=0,5$  м/с.

#### **Проверочная работа № 4**

##### **«Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании цилиндра. Теплоотдача при естественной конвекции»**

1. Медный шинопровод круглого сечения диаметром  $d=15$  мм охлаждается поперечным потоком сухого воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха равны соответственно:  $w=0,5$  м/с и  $t_{ж}=20$  °С.

Вычислить коэффициент теплоотдачи от поверхности шинопровода к воздуху и допустимую силу тока в шинопроводе при условии, что температура его поверхности не должна превышать  $t_c=80$  °С.

Удельное электрическое сопротивление меди  $\rho = 0,0175$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

2. Вычислить потери теплоты в единицу времени с 1 м<sup>2</sup> поверхности горизонтального теплообменника, корпус которого имеет цилиндрическую форму и охлаждается свободным потоком воздуха. Наружный диаметр корпуса теплообменника  $d=300$  мм, температура поверхности  $t_c=200$  °С и температура воздуха в помещении  $t_{ж}=40$  °С.

#### **Проверочная работа № 5**

##### **«Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества»**

1. На поверхности вертикальной трубы высотой  $H=3$  м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара. Давление пара  $p=3,5 \cdot 10^5$  Па. Температура поверхности трубы  $t_c=133$  °С.

Определить толщину пленки конденсата  $\delta_x$  и значение местного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  в зависимости от расстояния  $x$  от верхнего конца трубы. Расчет произвести для расстояний  $x$ , равных  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,6$ ;  $1,0$ ;  $1,5$ ;  $2,0$  и  $3$  м.

Построить график изменений  $\delta_x$  и  $\alpha_x$  по высоте трубы.

При расчете считать режим течения пленки конденсата ламинарным по всей высоте трубы.

2. Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя к кипящей воде, если тепловая нагрузка поверхности нагрева  $q=2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ , режим кипения пузырьковый и вода находится под давлением  $p$ , равным 1 и 5 МПа.

Определить также разность температур между поверхностью нагрева и кипящей водой  $\Delta t$  при этих давлениях.

### **Проверочная работа № 6 «Теплообмен излучением»**

1. Поверхность стального изделия имеет температуру  $t_C = 627 \text{ }^\circ\text{C}$  и степень черноты  $\epsilon_C = 0,7$ . Излучающую поверхность можно считать серой.

Вычислить плотность собственного излучения поверхности изделия и длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной интенсивности излучения.

2. В нагревательной печи температура газов по всему объему постоянна и равна  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Объем печи  $V=12 \text{ м}^3$ , и полная поверхность ограждения  $F=28 \text{ м}^2$ .

Общее давление продуктов сгорания  $p = 98,1 \text{ кПа}$ , парциальное давление водяных паров  $p_{H_2O} = 1 \cdot 10^4 \text{ кПа}$  и углекислоты  $p_{CO_2} = 1 \cdot 10^4 \text{ кПа}$ .

Вычислить степень черноты излучающей газовой смеси и собственное излучение продуктов сгорания.

### **ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕРМОДИНАМИКА.**

#### **Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы**

Самостоятельная работа предусматривает:

- подготовку студентов к аудиторным лекционным, практическим и лабораторным занятиям;
- выполнение домашних расчетных заданий по основным темам дисциплины;
- выполнение курсовой работы.

Для усвоения дисциплины необходима систематическая самостоятельная работа, контроль которой осуществляется с помощью графика самостоятельной работы (табл. 2).

Темы аудиторных лекционных, практических и лабораторных занятий; темы и задания для расчетных домашних работ и курсовой работы; рекомендуемая литература приведены в рабочей программе дисциплины и настоящем учебно-методическом комплексе.

### График самостоятельной работы студентов

Таблица 2

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки (недели)
1	2	3	4	5
1	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 1)	2	Тестирование на лекции	1,2
2	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 2)	2	Тестирование на лекции	2,3
3	Подготовка к лекционным занятиям (тема 3) Домашнее задание № 1	1	Проверочная работа № 1 (по темам 1, 3)	4
		2	Проверка и защита домашнего задания	
1	2	3	4	5
4	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 4) Подготовка к лабораторной работе Домашнее задание № 2	2	Тестирование на лекции.	5, 6
		1	Защита лаб. работы	
		3	Проверка и защита домашнего задания	
5	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 5) Подготовка к лабораторной работе Домашнее задание № 3	2	Проверочная работа № 1	7, 8
		1	Защита лаб. работы	
		3	Проверка и защита домашнего задания	
6	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 6) Домашнее задание № 4	2	Блиц-опрос на лекции.	9, 10, 11
		2	Проверка и защита домашнего задания	
7	Подготовка к лекционным занятиям (тема 7)	1	Блиц-опрос на лекции	12
8	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 8) Подготовка к лабораторной работе Домашнее задание № 5	2	Защита лаб. работы	13,14
		1	Проверка и защита домашнего задания	
		2	Проверка и защита домашнего задания	
9	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 9)	2	Проверка и защита домашнего задания	15, 16

	Домашнее задание № 6	3		
10	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 10)	2	Тестирование на лекции Проверочная работа № 4 (по темам 9 и 10)	16, 17, 18, 19
11	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 11)	2	Блиц-опрос на лекции.	20
12	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 12) Домашнее задание № 7, 8	2 4	Проверочная работа № 5 Проверка и защита домашнего задания	21, 22
13	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 13) Подготовка к лабораторной работе	2 1	Проверочная работа № 6 Защита лаб. работы	23, 24, 25, 26
14	Подготовка к лекционным занятиям (тема 14) Курсовая работа (по темам 13 и 14)	1 30	Защита курсовой работы	27, 28
15	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 15)	2	Блиц-опрос на лекции.	29, 30, 31
16	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 16)	2	Проверочная работа № 7	32, 33
17	Подготовка к лекционным и практическим занятиям (тема 17) Подготовка к лабораторной работе	2 1	Защита лаб. работы Проверочная работа № 8	34, 35
18	Подготовка к лекционным занятиям (тема 18)	1	Блиц-опрос на лекции.	36

### Методические указания по выполнению курсовой работы

Учебным рабочим планом специальности предусматривается выполнение курсовой работы по дисциплине «Теоретические основы теплотехники. Термодинамика» на тему «Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь». Выполнение и защита курсовой работы является важной составляющей самостоятельной работы студентов. При выполнении курсовой работы термодина-

мическое совершенство циклов паросиловых установок оценивается методом коэффициентов полезного действия, энтропийным и эксергетическим методами. Знание методов анализа эффективности циклов теплосиловых установок и умение применять эти методы для практических расчетов является обязательным условием изучения данной дисциплины. Необходимый теоретический материал, порядок и пример расчета, исходные данные для проектирования приведены в [4].

Курсовая работа выполняется на листах формата А4 в объеме 25-30 страниц и графической части (3 листа), выполняемой в виде приложений на миллиметровой бумаге формата А4.

Задание на курсовую работу выдается преподавателем индивидуально на отдельном листе, который включается в курсовую работу. В задании указывается: тема курсовой работы, исходные данные, содержание курсовой работы, дата выдачи задания и срок сдачи выполненной курсовой работы.

#### График выполнения курсовой работы.

Таблица 3

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки (недели)
1	2	3	4	5
1	Определение всех параметров ( $p, t, v, i, s, x$ ) в характерных точках цикла	4	Проверка полученных данных	1
2	Анализ реального цикла ПТУ методом коэффициентов полезного действия	8	Проверка расчета	2
3	Анализ реального цикла ПТУ энтропийным методом	6	Проверка расчета	3
4	Анализ реального цикла ПТУ эксергетическим методом	6	Проверка расчета	3
5	Оформление курсовой работы	6	Нормоконтроль	4

Выполненная курсовая работа сдается преподавателю для проверки (два-три дня), защита курсовой работы производится в соответствии с графиком, по итогам защиты выставляется оценка. Студенты, не выполнившие или не защитившие курсовую работу, к экзаменационной сессии не допускаются.

#### Методические указания по выполнению домашних заданий

Домашние задания выполняются в отдельной тетради или на листах формата А4 (каждое задание оформляется отдельно). Задания для расчета и исходные данные приведены ниже. Исходные данные выбираются из таблицы согласно варианту.

При выполнении домашнего задания следует записать краткое условие и произвести перевод исходных данных в систему СИ. Решение задач должно сопровождаться краткими пояснениями и подробными вычислениями. Необходимо привести соответствующую формулу, выразить из уравнения неизвестную величину (в буквенном выражении), затем подставить числовые значения и найти ответ. Для каждой найденной величины нужно указать единицу измерения (в системе СИ). Если при решении задач какая-либо величина является справочной или определяется по диаграмме, следует привести источник, откуда она взята (с указанием автора, названия, года издания и страницы).

### Комплекты заданий для домашних расчетных работ

#### Домашнее задание № 1 «Расчет газовой смеси»

*Определить:* а) газовую постоянную смеси;  
 б) кажущуюся молекулярную массу;  
 в) плотность и объем смеси при нормальных условиях.  
*Произвести* перевод компонентов смеси в другой состав.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N <sub>2</sub>	75	64	83	72	50	68	70	85								
O <sub>2</sub>	5	12	-	5	-	10	-	7								
CO <sub>2</sub>	14	17	3	15	16	19	8	3								
CO	6	-	9	8	30	-	13	5								
H <sub>2</sub>	-	7	5	-	4	3	6	-								

Для четных вариантов указан объемный состав;  
 Для нечетных – массовый.

#### Домашнее задание № 2 «Определение теплоемкости газовой смеси»

*Определить* теплоемкости газовой смеси (согласно варианту задания):  
 а) среднюю в интервале температур  $t_1$ – $t_2$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной;  
 б) считая  $c = \text{const}$  (по молекулярно-кинетической теории).  
*Примечание:* Состав газовой смеси принять по заданию № 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t_1$	250	100	350	200	450	400	150	600	550	650	150	200	350	300
$t_2$	800	750	1000	950	700	850	600	1050	1300	1200	500	750	850	950



	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$c'_v$	$\tilde{c}_p$	$c'_p$	$c_v$	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c'_v$	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$\tilde{c}_v$
	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c'_v$	$c_p$	$c_v$	$\tilde{c}_v$	$c'_p$	$c_p$	$c'_p$	$\tilde{c}_p$	$c'_v$	$\tilde{c}_v$	$c_v$	$c_p$

**Домашнее задание № 3**  
**«Определение параметров газа**  
**в политропном и изобарном процессах»**

Газ массой  $m$  имеет начальные параметры – давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ . После политропного изменения состояния газа его объем стал  $V_2$ , а давление  $p_2$ .

*Определить* конечную температуру газа, показатель политропы  $n$ , количество теплоты, работу, изменение внутренней энергии, изменение энтальпии и энтропии.

*Найти* эти же величины, если изменение состояния газа происходит по изобаре ( $p_1 = const$ ) до того же значения конечного объема  $V_2$ .

*Построить* процессы в  $p, V$  и  $T, s$  диаграммах.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
M	2	4	5	3	6	2	4	5	3	6	2	4	5	3
$p_1$	0,12	0,15	0,14	0,12	0,2	0,25	0,12	0,15	0,14	0,22	0,2	0,25	0,18	0,12
$t_1$	20	50	10	27	30	37	15	40	47	25	17	35	20	37
Газ	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	воз дух	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	He	CO	O <sub>2</sub>	He	воз дух	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
$V_2$	3,5	0,8	2,0	1,2	0,7	2,5	1,7	3,0	2,8	0,5	2,2	3,4	4,5	2,6
$p_2$	1,2	1,45	1,3	1,25	1,4	1,35	1,15	1,5	1,36	1,14	1,28	1,52	1,8	1,7

**Домашнее задание № 4**  
**«Расчет цикла Карно»**

(применительно к тепловому двигателю)

Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха – совершает прямой цикл Карно. Предельные температуры рабочего тела в цикле: наибольшая  $t_1$ , наименьшая  $t_2$ . Предельные давления рабочего тела в цикле: наибольшее  $P_{max}$ , наименьшее  $P_{min}$ .

*Определить:*

- основные параметры состояния рабочего тела в характерных точках;
- количество подведенного и отведенного в цикле тепла;
- полезную работу, совершенную рабочим телом за цикл;
- термический КПД цикла;
- изменение энтропии в изотермических процессах цикла.

*Построить* цикл (в масштабе) в  $p, v$  и  $T, s$  диаграммах.

вариант	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t_1, ^\circ\text{C}$	317	250	327	330	270	320	250	303	300	277	320	260	300
$t_2, ^\circ\text{C}$	27	30	30	37	30	20	25	17	20	27	25	17	20
$P_{\max}, \text{МПа}$	3,0	2,8	2,6	2,5	4,2	3,6	2,0	3,2	3,5	2,4	4,0	2,2	2
$P_{\min}, \text{МПа}$	0,15	0,13	0,1	0,14	0,15	0,12	0,1	0,14	0,13	0,15	0,17	0,12	0,13

### *Домашнее задание № 5*

#### **«Истечение газа через сужающееся сопло»**

Из газового резервуара большого объема происходит обратимый, т.е. без трения, адиабатный процесс истечения газа через сопло. Параметры газа в резервуаре  $p_1$  и  $T_1$ , а  $p_2$  – давление среды, в которую поступает газ.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t, ^\circ\text{C}$	150	250	200	300	350	400	150	250	200	300	350	400	150	250
$P_1, \text{ба p}$	6	8	10	7	9	5	9	6	8	10	7	8	5	9
$P_2, \text{ба p}$	4	4,5	6	4	7	3	6	4,5	5,5	7	4,5	6	4	6,5
$f_{\text{ММ}^2}$	20	40	25	30	45	35	40	25	30	35	40	45	25	30
Газ	CO	He	CO <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	He	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>

*Определить*

1. Скорость адиабатного истечения газа и массовый секундный расход.
2. Значение  $p_2$ , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, значение этой скорости, а также максимальный секундный расход.
3. Скорость при истечении газа через сопло Лавалья при  $p_2' = 0,4p_1$ .

### *Домашнее задание № 6*

#### **«Расчет многоступенчатого компрессора»**

*Рассчитать* многоступенчатый поршневой компрессор (без учета трения и вредного пространства), т.е. *определить*: количество ступеней компрессора, степень повышения давления в каждой ступени, количество теплоты, отведенной от воздуха в цилиндрах компрессора, в промежуточном и конечном холодильниках (при охлаждении до  $t_1$ ), и мощность привода, если давление воздуха на входе в первую ступень компрессора  $p_1 = 0,1$  МПа, температура  $t_1 = 27$  °С.  $\Delta t$  - допустимое повышение температуры воздуха в каждой ступени.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	205	200	195	190
N	1,2 7	1,2 6	1,2 5	1,2 4	1,2 3	1,3 2	1,3 1	1,3	1,2 9	1,2 3	1,2 4	1,2 5	1,2 6	1,2 7
$P_k, \text{МПа}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	15	16	17	18
G, кг/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	0,5	0,6	0,7	0,8

*Указание.* При расчете по допустимым  $\Delta t$ , как правило, получается число ступеней, не равное целому числу (н-р 1,3; 2,6; 3,5), поэтому нужно принимать целое число (2, 3, 4) и для  $\Delta t$ , соответствующего целому числу ступеней, проводить все расчеты,

*Изобразить* графики политропного сжатия газа в компрессоре в диаграммах  $P, V$  и  $T, s$ .

### *Домашнее задание № 7*

#### **«Процессы водяного пара. Дросселирование водяного пара»**

Начальное состояние водяного пара характеризуется давлением  $p_1$  и степенью сухости  $x_1$ . Водяной пар нагревается в пароперегревателе при постоянном давлении  $p_1$  до температуры  $t_2$ . Затем пар дросселируется до давления  $p'_2$  и направляется в турбину, где адиабатно расширяется до давления  $p_3 = 0,003$  МПа.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_1, \text{МПа}$	3,5	5,5	4,0	5,0	4,5	3,0	5,5	5,0	4,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
X	0,8	0,9	0,9 2	0,8 6	0,8 2	0,9	0,8 4	0,8 8	0,9 2	0,8 8	0,9	0,8 6	0,8 2	0,8
$t_2, ^\circ\text{C}$	46 0	60 0	520	480	500	56 0	440	580	610	550	42 0	460	540	60 0
$p'_1, \text{МПа}$	2,8	5,0	3,5	4,6	4,0	2,4	4,4	4,2	3,8	2,2	2,6	3,4	3,6	4,4

*Определить:*

- все параметры пара в точках 1, 2, 3;
- количество теплоты, подведенной к 1 кг пара в пароперегревателе;
- изменение удельной внутренней энергии пара в пароперегревателе и турбине;
- располагаемый теплоперепад при расширении пара в турбине;
- увеличение располагаемого теплоперепада, при условии, что пар направляется в турбину без дросселирования (при давлении  $p_1$ ), а расширению происходит до того же конечного давления  $p_3 = 0,003 \text{ МПа}$ .

*Указание.* Задание выполнить с помощью  $i,s$ -диаграммы водяного пара [7].

### *Домашнее задание № 8*

#### **«Истечение водяного пара из сопла»**

При начальных давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  водяной пар вытекает в среду с давлением  $p_2$ .

Истечение водяного пара происходит:

- а) из суживающегося сопла;
- б) из сопла Лавалья.

вариант	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_1, \text{ МПа}$	0,6	1,0	0,8	1,2	1,5	2,0	3,0	1,8	2,4	2,8	1,4	2,6	1,6
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	300	350	200	260	280	400	360	240	320	250	220	340	380
$p_2, \text{ МПа}$	0,1 2	0,1 4	0,1	0,1 4	0,1 2	0,1	0,1 4	0,12	0,1	0,1 4	0,1 2	0,1	0,1 4
$\xi$	0,0 7	0,0 5	0,0 8	0,0 4	0,0 6	0,04 5	0,0 3	0,03 5	0,05 5	0,0 5	0,0 7	0,0 4	0,0 6

*Определить:*

3. Теоретическую скорость истечения водяного пара;
4. Действительную скорость истечения, при коэффициенте потерь энергии  $\xi$ .

### *Домашнее задание № 9*

#### **«Расчет цикла холодильной воздушной установки»**

В компрессор воздушной холодильной установки поступает воздух из холодильной камеры с давлением  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температурой  $t_1$ . После адиабатного сжатия до давления  $p_2$ , воздух поступает в теплообменник, где при постоянном давлении его температура понижается до  $t_3$ . Затем воздух поступает в детандер, где расширяется до первоначального давления  $p_1$  и направляется

в холодильную камеру. Отнимая теплоту от охлаждаемых тел, воздух нагревается до первоначальной температуры  $t_1$ . Холодопроизводительность установки  $Q_0$ .

*Определить:*

- температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру;
- количество теплоты, передаваемое охлаждающей воде в теплообменнике;
- расход воздуха;
- теоретическую мощность двигателя установки;
- холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур.

Изобразить схему воздушной холодильной установки и ее цикл в  $p,v$ - и  $T,s$ -диаграммах.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_1, ^\circ\text{C}$	-10	-8	-12	-10	-7	-9	-6	-14	-12	-5	-2	-15	-6
$t_3, ^\circ\text{C}$	16	20	15	21	19	18	15	16	17	23	25	20	22
$Q, \text{кВт}$	150	130	170	140	160	120	110	130	120	140	100	160	130

### Домашнее задание № 10

#### «Влажный воздух»

Воздух с температурой  $t_1$  и относительной влажностью  $\varphi_1$ , адиабатно увлажняется в кондиционере до  $\varphi_2$ .

**Определить:** количество воды, необходимое для увлажнения 1 кг воздуха, и его температуру воздуха, после увлажнения.

*Указание.* Задачу решить с помощью  $I,d$ -диаграммы влажного воздуха. Изобразить процесс увлажнения цикл в  $I,d$ -диаграмме.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_1, ^\circ\text{C}$	35	25	30	25	35	30	40	35	25	30	40	35	25
$\varphi_1, \%$	50	60	70	65	75	55	45	60	55	65	50	70	45
$\varphi_2, \%$	75	85	90	90	85	80	70	95	75	90	80	95	75

## Комплекты заданий для проверочных работ

### Проверочная работа № 1 «Параметры состояния. Газовые смеси»

#### Вариант 1

1. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,004$  МПа.

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют 735 мм рт. ст., а другом – 764 мм рт. ст.?

2. Определить молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем при нормальных физических условиях, а также объемный состав газовой смеси, если задан ее массовый состав: 7 % N<sub>2</sub>, 8 % H<sub>2</sub>, 51 % CH<sub>4</sub>, 5 % O<sub>2</sub>, 19 % CO и 10 % CO<sub>2</sub>.

#### Вариант 2

1. В машинном зале электростанции работают три турбины, в конденсаторах которых поддерживается абсолютное давление  $p_1 = 2,94$  кПа,  $p_2 = 3,923$  кН/м<sup>2</sup> и  $p_3 = 0,711$  lbf/in<sup>2</sup>.

Определите величины вакуумов в процентах барометрического давления. Показание барометра в машинном зале  $B = 753$  мм рт. ст.

2. Определить газовую постоянную и плотность газовой смеси, а также парциальные давления отдельных компонентов, если смесь состоит из 14 % CO<sub>2</sub>, 73 % N<sub>2</sub>, 6 % O<sub>2</sub> и 7 % H<sub>2</sub>O по объему. Абсолютное давление смеси равно  $p = 0,2$  МПа, а температура  $t = 300$  °С.

#### Вариант 3

1. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 8 кгс/см<sup>2</sup> при показании барометра 745 мм рт. ст.

Каково абсолютное давление масла, выраженное в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм?

2. Генераторный газ имеет следующий объемный состав:  $H_2 = 7,0 \%$ ;  $CH_4 = 2 \%$ ;  $CO = 27,6 \%$ ;  $CO_2 = 4,8 \%$ ;  $N_2 = 58,6 \%$ . Определить массовые доли, молекулярную массу смеси, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при  $15^\circ C$  и  $0,1$  МПа.

#### Вариант 4

1. Каковы будут показания манометра, выраженные в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм, если абсолютное давление равно  $98\,600$  Па, а атмосферное давление  $V = 435$  мм. рт. ст.?

2. Смесь состоит из  $18 \%$   $H_2$ ,  $24 \%$   $CO$ ,  $6 \%$   $CO_2$  и  $52 \%$   $N_2$  по объему. Определить газовую постоянную, плотность и массовый состав смеси, если абсолютное давление смеси  $p = 0,4$  МПа, а температура ее  $t = 35^\circ C$ .

#### Вариант 5

1. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,0035$  МПа.

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют  $742$  мм рт. ст., а другом –  $768$  мм рт. ст.?

2. Продукты сгорания имеют следующий объемный состав:  $CO_2 - 12,2 \%$ ,  $O_2 - 7,1 \%$ ,  $CO - 0,4 \%$  и  $N_2 - 80,3 \%$ . Определить массовый состав, газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси, если абсолютное давление смеси  $p = 0,5$  МПа, а температура ее  $t = 27^\circ C$ .

#### Вариант 6

1. В машинном зале электростанции работают три турбины, в конденсаторах которых поддерживается абсолютное давление  $p_1 = 2,86$  кПа,  $p_2 = 3,452$  кН/м<sup>2</sup> и  $p_3 = 0,670$  lbf/in<sup>2</sup>.

Определите величины вакуумов в процентах барометрического давления. Показание барометра в машинном зале  $V = 748$  мм рт. ст.

2. В  $1$  м<sup>3</sup> сухого воздуха содержится по объему  $21 \%$   $O_2$  и  $79 \%$   $N_2$ . Определить массовый состав воздуха, молекулярную массу и газовую постоянную его,

а также парциальные давления кислорода и азота в мегапаскалях, если барометрическое давление равно  $B = 0,1 \text{ МПа}$ .

### Вариант 7

1. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает  $7 \text{ кгс/см}^2$  при показании барометра  $748 \text{ мм рт. ст.}$

Каково абсолютное давление масла, выраженное в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм?

2. Определить молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем при нормальных физических условиях, а также объемный состав газовой смеси, если задан ее массовый состав:  $7 \% \text{ N}_2$ ,  $8 \% \text{ H}_2$ ,  $51 \% \text{ CH}_4$ ,  $5 \% \text{ O}_2$ ,  $19 \% \text{ CO}$  и  $10 \% \text{ CO}_2$ .

### Вариант 8

1. Каковы будут показания манометра, выраженные в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм, если абсолютное давление равно  $99 \text{ 100 Па}$ , а атмосферное давление  $B = 456 \text{ мм. рт. ст.}$

2.  $1 \text{ кг}$  воздуха состоит из  $23,2$  массовых частей кислорода и  $76,8$  массовых частей азота. Определить объемный состав воздуха, среднюю молекулярную массу, газовую постоянную, а также парциальные давления кислорода и азота в мегапаскалях, если барометрическое давление равно  $B = 0,1 \text{ МПа}$ .

### Вариант 9

1. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,0038 \text{ МПа}$ .

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют  $746 \text{ мм рт. ст.}$ , а другом –  $768 \text{ мм рт. ст.}$ ?

2. Генераторный газ состоит из  $57 \% \text{ H}_2$ ,  $23 \% \text{ CH}_4$ ,  $6 \% \text{ CO}_2$ ,  $2 \% \text{ CO}$  и  $12 \% \text{ N}_2$  по объему. Определить среднюю молекулярную массу, газовую постоянную, плотность смеси, а также массовые доли компонентов при  $p = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t = 17^\circ \text{C}$ .

### Вариант 10



1. В машинном зале электростанции работают три турбины, в конденсаторах которых поддерживается абсолютное давление  $p_1 = 2,74$  кПа,  $p_2 = 3,753$  кН/м<sup>2</sup> и  $p_3 = 0,706$  lbf/in<sup>2</sup>.

Определите величины вакуумов в процентах барометрического давления. Показание барометра в машинном зале  $B = 758$  мм рт. ст.

2. В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг диоксида углерода. Определить молярные доли смеси, ее удельный объем при нормальных условиях, молярную массу смеси и газовую постоянную.

### Вариант 11

1. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 9 кгс/см<sup>2</sup> при показании барометра 738 мм рт. ст.

Каково абсолютное давление масла, выраженное в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм?

1. Смесь газов, образовавшаяся при сжигании 1 кг мазута в топке парового котла, имеет состав, определенный парциальными объемами составляющих:  $V_{CO} = 1,85$  м<sup>3</sup>;  $V_O = 0,77$  м<sup>3</sup>;  $V_N = 12,78$  м<sup>3</sup>. Определить молярную массу, газовую постоянную, массовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление  $p = 0,1$  МПа.

### Вариант 12

1. Каковы будут показания манометра, выраженные в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм, если абсолютное давление равно 97 400 Па, а атмосферное давление  $B = 420$  мм. рт. ст.?

2. Определить молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем при нормальных физических условиях, если ее массовый состав следующий: 6,7 % N<sub>2</sub>; 6,9 % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 48,7 % CH<sub>4</sub>; 4,7 % O<sub>2</sub>; 17 % CO; 7,6 % CO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub> = 8,4 %.

### Вариант 13

1. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = 0,0042$  МПа.

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонсах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют 745 мм рт. ст., а другом – 762 мм рт. ст.?

2. Смесь 10 кг кислорода и 15 кг азота имеет давление 0,3 МПа и температуру 27 °С. Определить молярные доли каждого газа в смеси, относительную молекулярную массу смеси, удельную газовую постоянную, общий объем смеси, парциальные давления и объемы.

### **Проверочная работа № 2**

#### **«Уравнение состояния идеального газа, расчет теплоемкости газов»**

##### **Вариант 1**

1. Компрессор подает сжатый воздух в резервуар, при этом давление в резервуаре, измеренное манометром, повышается от  $p_1 = 0$  до  $p_2 = 0,8$  МПа, а температура – 20 до 27° С. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар, если объем баллона  $V = 5 \text{ м}^3$ , а барометрическое давление  $B = 750$  мм рт.ст.

2. Определить средние массовую и объемную теплоемкость  $\text{SO}_2$  при постоянном давлении:

а) в пределах 350 – 1000 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

##### **Вариант 2**

1. На сколько больше вмещается в баллон, объем которого  $V = 50$  л, кислорода, чем водорода, при температуре  $t = 15$  °С и давлении по манометру  $p = 15$  МПа, если барометрическое давление  $B = 750$  мм рт.ст.?

2. Определить средние объемную и массовую теплоемкость угарного газа при постоянном давлении:

а) в пределах 550-1800 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

##### **Вариант 3**

1. Из баллона емкостью  $V = 60$  л выпускается воздух в атмосферу, при этом давление воздуха, измеренное манометром, уменьшается с  $p_1 = 1$  МПа до  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить массу выпущенного воздуха, если температура его из-

менилась от  $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление  $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$

2. Определить средние массовую и объемную теплоемкость водорода при постоянном давлении:

а) в пределах  $150 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 4

1. Воздушный баллон, рассчитанный на предельное абсолютное давление  $p_{\text{расч}} = 25 \text{ МПа}$ , заполнен воздухом с избыточным давлением  $p_1 = 14,9 \text{ МПа}$ . При пожаре в помещении, где находился баллон, температура воздуха в нем повысилась до  $t_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выдержит ли баллон возросшее давление, если известно, что температура воздуха в баллоне до пожара была  $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление  $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$ ?

2. Определить среднюю теплоемкость кислорода (массовую и объемную) при постоянном объеме:

а) в пределах  $400-950 \text{ }^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 5

1. В цилиндре диаметром  $d = 80 \text{ мм}$  содержится  $100 \text{ г}$  воздуха при избыточном давлении  $p = 0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наружное давление  $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$  До какой температуры следует нагреть воздух в цилиндре, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на  $60 \text{ мм}$  при постоянном давлении в цилиндре?

2. Определить среднюю массовую и объемную теплоемкость воздуха при постоянном объеме:

а) в пределах  $250-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 6

1. Определить подъемную силу воздушного шара объемом  $V = 1000 \text{ м}^3$  на высоте  $H = 3 \text{ км}$ , если абсолютное давление водорода, заполняющего шар, равно  $p = 0,071 \text{ МПа}$ , температура водорода равна температуре окружающего воздуха  $T_H = 268 \text{ К}$ , а плотность воздуха на этой высоте  $\rho = 0,91 \text{ кг/м}^3$ .

2. Определить среднюю объемную и массовую теплоемкость метана при постоянном давлении:
- а) в пределах  $150-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.
  - б) считая теплоемкость постоянной.

### Вариант 7

1. Какое количество воды можно вытеснить из цистерны подводной лодки, находящейся на глубине  $h = 40\text{ м}$ , если для этого применяется сжатый воздух из баллона объемом  $V = 40\text{ л}$  при избыточном давлении воздуха  $p_1 = 24,9\text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , если барометрическое давление  $B = 750\text{ мм рт.ст.}$ ?
2. Определить среднюю объемную и массовую теплоемкость метана при постоянном давлении:
- а) в пределах  $300-1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.
  - б) считая теплоемкость постоянной.

### Вариант 8

1. Баллон с воздухом объемом  $40\text{ л}$  имеет избыточное давление  $p_1 = 13,9\text{ МПа}$  при  $t_1 = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить избыточное давление воздуха в баллоне  $p_2$  после того, как температура его стала  $t_2 = +27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также количество воздуха, которое необходимо выпустить, чтобы при температуре  $t_3 = +27\text{ }^{\circ}\text{C}$  давление снова упало до  $p_1$ . Барометрическое давление принять равным  $B = 750\text{ мм рт.ст.}$
2. Определить среднюю массовую и объемную теплоемкость  $\text{SO}_2$  при постоянном объеме:
- а) в пределах  $350-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.
  - б) считая теплоемкость постоянной.

### Вариант 9

1. В воздухоподогреватель котельной установки поступает  $5\text{ м}^3/\text{с}$  воздуха при температуре  $t_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и избыточном давлении  $500\text{ мм вод.ст.}$  Определить скорость воздуха после подогревателя, если площадь поперечного сечения воздухопровода  $F = 4\text{ м}^2$ . Температура подогретого воздуха равна  $t_2 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Барометрическое давление  $B = 750\text{ мм рт.ст.}$
2. Определить среднюю массовую и объемную теплоемкость воздуха при постоянном давлении:

а) в пределах 350-800 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 10

1. Какова будет плотность кислорода при 0 °С и давлении 80 кПа, если при 101,3 кПа и 15 °С она равна 1,31 кг/м<sup>3</sup> ?

2. Определить среднюю массовую и объемную теплоемкости метана при постоянном объеме:

а) в пределах 250-500 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 11

1. Найти массу 5 м<sup>3</sup> водорода, 6 м<sup>3</sup> кислорода и 3 м<sup>3</sup> углекислоты при давлении 0,6 МПа и температуре 100 °С.

2. Определить среднюю объемную и массовую теплоемкости углекислого газа при постоянном объеме:

а) в пределах 350-750 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 12

1. Резервуар объемом 4 м<sup>3</sup> заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если его избыточное давление  $p_1 = 40$  кПа, температура  $t = 80$  °С, а барометрическое давление воздуха  $B = 102,4$  кПа.

2. Определить среднюю объемную и массовую теплоемкость азота при постоянном объеме:

а) в пределах 150 – 900 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

б) считая теплоемкость постоянной.

#### Вариант 13

1. В сосуде объемом 0,5 м<sup>3</sup> находится воздух при давлении 0,2 МПа и температуре 20 °С. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило 56 кПа при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно 102,4 кПа при температуре ртути в нем, равной 18 °С; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути 20 °С.

2. Определить среднюю объемную и массовую теплоемкость угарного газа при постоянном объеме:

а) в пределах 1200-1650 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной

б) считая теплоемкость постоянной.

### **Проверочная работа № 3 «Изопрцессы идеальных газов»**

#### Вариант 1

1. 4 кг углекислого газа с начальным абсолютным давлением  $p_1 = 0,8$  МПа при температуре  $t = 50$  °С расширяются изотермически с подводом тепла в количестве 50 кДж. Определить начальный и конечный объемы газа, а также изменение его энтропии.

2. 2 кг азота с начальной температурой  $t_1 = 300$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,8$  МПа адиабатно расширяются с понижением давления до  $p_2 = 0,5$  МПа. Найти начальный и конечный объемы газа, конечную температуру, работу расширения и изменение энтальпии газа.

#### Вариант 2

1. 5 м<sup>3</sup> кислорода с начальным абсолютным давлением 0,1 МПа при  $t = 20$  °С сжимаются изотермически с отводом тепла в количестве 20 кДж/кг. Определить количество газа, участвующего в процессе, а также его конечный объем и изменение его энтропии.

2. 4 м<sup>3</sup> воздуха, имея начальную температуру  $t_1 = 60$  °С и абсолютное давление  $p_1 = 0,13$  МПа, сжимаются политропно до давления  $p_2 = 0,65$  МПа. Определить количество подведенного тепла, работу сжатия, изменение внутренней энергии и энтропии, если показатель политропы  $n=1,3$ .

#### Вариант 3

1. 3 кг воздуха с начальными температурой  $t_1 = 12$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,9$  МПа нагреваются при постоянном объеме до температуры  $t_2 = 375$  °С. Определить конечное давление газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2. 4 м<sup>3</sup> окиси углерода с начальной температурой  $t_1 = 30$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,2$  МПа адиабатно сжимается так, что внутренняя энергия ка-

ждого килограмма газа увеличивается на  $10 \text{ кДж}$ . Определить количество газа, а также конечные параметры и изменение его энтальпии.

#### Вариант 4

1.  $5 \text{ м}^3$  метана с начальной температурой  $t_1 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечный объем газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

2. 6 кг окиси углерода сжимаются изотермически при температуре  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  так, что его объем уменьшается в 2,3 раза, а давление становится равным  $p_2 = 0,25 \text{ МПа}$ . Определить начальный и конечный объемы газа, количество отводимого от газа тепла и изменение его энтропии

#### Вариант 5

1. 2 кг азота с начальной температурой  $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  нагреваются при постоянном объеме до температуры  $t_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечное давление газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2. 1 кг кислорода с начальной температурой  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  адиабатно сжимаются с повышением давления до  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ . Определить начальный и конечный удельные объемы газа, конечную температуру его, изменение внутренней энергии и изменение энтальпии газа.

#### Вариант 6

1. 3 кг окиси углерода с начальной температурой  $t_1 = 270 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,7 \text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объемы газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

2. Воздух в количестве  $3 \text{ м}^3$  расширяется политропно от  $p_1 = 0,54 \text{ МПа}$  и температуры  $t_1 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$ . Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным  $10 \text{ м}^3$ . Найти показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенной теплоты.

#### Вариант 7

1. 3 кг водорода с начальной температурой  $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  нагреваются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объемы газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2. 2 кг метана с начальной температурой  $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$  адиабатно расширяется так, что внутренняя энергия его

уменьшается на  $50 \text{ кДж}$ . Определить начальный и конечный удельные объемы газа, а также конечные температуру и давление его. Найти также изменение энтальпии газа.

#### Вариант 8

1.  $7 \text{ м}^3$  углекислого газа с начальной температурой  $t_1 = 570^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,7 \text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном объеме так, что его абсолютное давление уменьшается до  $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$ . Определить конечную температуру газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

2.  $3 \text{ м}^3$  азота, имея начальную температуру  $t_1 = 47^\circ\text{C}$  и абсолютное давление  $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ , расширяются политропно до давления  $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$ , при этом объем азота становится равным  $V_2 = 10 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, конечную температуру, работу, участвующее в процессе тепло и изменение энтропии газа.

#### Вариант 9

1.  $6 \text{ кг}$  окиси углерода с начальными температурой  $t_1 = 240^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном объеме до температуры  $t_2 = 130^\circ\text{C}$ . Определить конечное давление газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

2.  $3 \text{ м}^3$  углекислого газа с начальной температурой  $t_1 = 400^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  адиабатно расширяются до объема  $5 \text{ м}^3$ . Определить конечные температуру и давление газа, работу расширения и изменения энтальпии газа.

#### Вариант 10

1.  $4 \text{ м}^3$  кислорода с начальной температурой  $t_1 = 70^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$  нагреваются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 320^\circ\text{C}$ . Определить конечный объем газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2.  $4 \text{ кг}$  воздуха расширяются изотермически при температуре  $t = 50^\circ\text{C}$  так, что его объем возрастает в  $3,5$  раза, а давление становится равным  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Определить начальный и конечный объемы газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

#### Вариант 11

1.  $1 \text{ кг}$  азота с начальной температурой  $t_1 = 130^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$  нагревается при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 350^\circ\text{C}$ .



Определить начальный и конечный объемы газов, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2.  $20 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 18^\circ\text{С}$  сжимают по политропе до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$ , причем показатель политропы равен 1,25. Какую работу надо затратить для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха и какое количество теплоты отводится при сжатии?

### Вариант 12

1. 6 кг окиси углерода сжимаются изотермически при температуре  $t = 60^\circ\text{С}$  так, что его объем уменьшается в 2,3 раза, а давление становится равным  $p_2 = 0,25 \text{ МПа}$ . Определить начальный и конечный объемы газа, количество отводимого от газа тепла и изменение его энтропии.

2.  $5 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 60^\circ\text{С}$  расширяются по политропе до трехкратного объема и давления  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Определить показатель политропы, работу расширения, количество сообщенной извне теплоты и изменение внутренней энергии.

### Вариант 13

1.  $5 \text{ м}^3$  кислорода с начальными температурой  $t_1 = 75^\circ\text{С}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  нагреваются при постоянном объеме так, что его абсолютное давление повышается до  $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$ . Определить конечную температуру газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

2.  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 40^\circ\text{С}$  сжимаются до давления  $p_2 = 1,1 \text{ МПа}$  и объема  $V_2 = 0,5 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенной теплоты.

### Проверочная работа № 4

#### «Циклы двигателей внутреннего сгорания. Расчет компрессора»

#### Вариант 1

1. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ\text{С}$ ;  $\varepsilon = 3,6$ ;  $\lambda = 3,33$ .

Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Компрессор всасывает  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха и при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{С}$  и сжимает его до давления  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую работу компрессора при адиабатном сжатии и температуру воздуха в конце сжатия.

### Вариант 2

1. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v=const$  определить параметры характерных для цикла точек, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД и его полезную работу, если дано:  $p_1 = 100 \text{ кПа}$ ;  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ ;  $\varepsilon = 6$ ;  $\lambda = 1,6$ .

Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Определить мощность идеального компрессора с изотермическим сжатием и часовое количество теплоты, передаваемое охлаждающей водой, если  $p_1 = 101\,325 \text{ Па}$ , а давление сжатого воздуха  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ . Расход всасываемого воздуха  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

### Вариант 3

1. Поршневой двигатель работает на воздухе по циклу с подводом теплоты при  $v=const$ . Начальное состояние воздуха:  $p_1 = 0,785 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 17^\circ \text{C}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,6$ . Количество подведенной теплоты составляет  $100,5 \text{ кДж/кг}$ . Определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД и количество отведенной теплоты.

2. Компрессор всасывает в минуту  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  водорода при температуре  $20^\circ \text{C}$  и давлении  $0,1 \text{ МПа}$  и сжимает его до  $0,8 \text{ МПа}$ .

Определить потребную мощность двигателя для привода компрессора при адиабатном сжатии, если эффективный КПД компрессора  $\eta_K = 0,7$ .

### Вариант 4

1. Двигатель работает по циклу с подводом теплоты в процессе  $v=const$ . Начальная температура рабочего тела, обладающего свойствами воздуха,  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ , давление  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,6$ .

При сгорании выделяется энергия в количестве  $900 \text{ кДж/кг}$ . Определить параметры в характерных точках цикла, термический КПД, полученную работу и количество отведенной теплоты.

2. Производительность компрессора  $V_K = 700 \text{ м}^3$  воздуха в час; начальные параметры воздуха:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ; конечное давление  $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора, если сжатие будет производиться изотермически. На сколько возрастет теоретическая мощность двигателя, если сжатие в компрессоре будет совершаться по адиабате?

## Вариант 5

1. Для идеального цикла с подводом теплоты при  $p = const$  найти параметры в характерных точках, полезную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^0 \text{ С}$ ;  $\varepsilon = 12,7$ .

Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Для двигателя с воспламенением от сжатия необходим трехступенчатый компрессор, подающий  $250 \text{ кг/ч}$  воздуха при давлении  $8 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность компрессора. Сжатие считать адиабатным. В начале сжатия  $p_1 = 0,095 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 17^0 \text{ С}$ .

## Вариант 6

1. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = const$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 100 \text{ кПа}$ ;  $t_1 = 70^0 \text{ С}$ ;  $\varepsilon = 12$ ;  $\rho = 1,67$ .

Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Компрессор сжимает  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха с температурой  $t_1 = 20^0 \text{ С}$  от давления  $p_1 = 0,098 \text{ МПа}$  до  $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ .

Определите мощность, необходимую на привод компрессора, если сжатие происходит: 1) адиабатно; 2) политропно с показателем  $n = 1,3$ ; 3) изотермически.

## Вариант 7

1. Найти давление и объем в характерных точках цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = const$ , а также термический КПД и полезную работу, если дано:  $p_1 = 100 \text{ кПа}$ ;  $\varepsilon = 14$ ;  $\rho = 1,5$ .

Диаметр цилиндра  $d = 0,3 \text{ м}$ , ход поршня  $S = 0,45 \text{ м}$ . Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Идеальный поршневой компрессор сжимает  $450 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха (в пересчете на нормальные условия) с температурой  $t_1 = 30^0 \text{ С}$  от  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  до  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ .

Определить мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если сжатие происходит адиабатно, и температуру газа на выходе из компрессора.

## Вариант 8

1. В цикле с подводом теплоты при  $p=const$  начальное давление воздуха  $p_1 = 0,09$  МПа, температура  $t_1 = 47^0$  С, степень сжатия  $\varepsilon = 12$ , степень предварительного расширения  $\rho = 2$  и  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup>.

Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и его термический КПД. Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Компрессор всасывает воздух при давлении  $0,1$  МПа и температуре  $20^0$  С и сжимает его изотермически до  $0,8$  МПа.

Определить производительность  $V_K$  компрессора в м<sup>3</sup>/ч, если известно, что теоретическая мощность двигателя для привода компрессора равна  $40,6$  кВт. Найти также часовой расход охлаждающей воды, если ее температура при охлаждении цилиндра компрессора повышается на  $10^0$  С. Теплоемкость воды принять равной  $4,19$  кДж/кг.

### Вариант 9

1. Для цикла с подводом теплоты в процессе при  $p=const$  определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и его термический КПД. Известны начальные параметры рабочего тела: давление  $p_1 = 0,098$  МПа, температура  $t_1 = 50^0$  С; и характеристики цикла: степень сжатия  $\varepsilon = 14$ , степень предварительного расширения  $\rho = 1,67$ .

2. Трехступенчатый компрессор всасывает  $60$  м<sup>3</sup>/ч воздуха при  $p_1 = 0,08$  МПа и  $t_1 = 27^0$  С и сжимает его адиабатно до  $10$  МПа.

Определить производительность компрессора по сжатому воздуху  $V_{СЖ}$  и работу, затраченную на сжатие в компрессоре.

### Вариант 10

1. Известно, что в цикле с подводом теплоты при  $p=const$  при начальных параметрах  $p_1 = 0,0833$  МПа и  $t_1 = 25^0$  С подведенная теплота составляет  $773$  кДж/кг;  $\varepsilon = 14$ .

Требуется определить термический КПД, полезную работу за цикл и количество отведенной теплоты. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

2. В двухступенчатом компрессоре воздух адиабатически сжимается от  $0,098$  до  $4,9$  МПа.

Определить производительность компрессора, если мощность его двигателя  $60$  кВт. КПД компрессора  $\eta_K = 0,65$ . Начальная температура воздуха  $27^0$  С.

### Вариант 11

1. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом теплоты начальное давление  $p_1 = 0,085 \text{ МПа}$  и температура  $t_1 = 50^\circ \text{ С}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 8$ , степень предварительного расширения  $\rho = 1,2$  и степень повышения давления  $\lambda = 2$ .

Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и его термический КПД. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

2. Кислородный компрессор сжимает кислород от  $p_1 = 0,098 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 17^\circ \text{ С}$  до давления  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ .

Определите необходимую мощность двигателя, если адиабатный КПД установки  $\eta_{ад} = 0,83$ . Производительность компрессора равна  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$  сжатого газа.

### Вариант 12

1. Двигатель работает по циклу с подводом теплоты в процессе  $v = \text{const}$ . Начальная температура рабочего тела, обладающего свойствами воздуха,  $t_1 = 17^\circ \text{ С}$ , давление  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,2$ .

При сгорании выделяется энергия в количестве  $700 \text{ кДж/кг}$ . Определить параметры в характерных точках цикла, термический КПД, полученную работу и количество отведенной теплоты.

2. Для двигателя с воспламенением от сжатия необходим трехступенчатый компрессор, подающий  $350 \text{ кг/ч}$  водорода при давлении  $9 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность компрессора. Сжатие считать адиабатным. В начале сжатия  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 17^\circ \text{ С}$ .

### Вариант 13

1. Найти давление и объем в характерных точках цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ , а также термический КПД и полезную работу, если дано:  $p_1 = 150 \text{ кПа}$ ;  $\varepsilon = 12$ ;  $\rho = 1,8$ .

Диаметр цилиндра  $d = 0,2 \text{ м}$ , ход поршня  $S = 0,6 \text{ м}$ . Рабочее тело – воздух, теплоемкость принять постоянной.

2. Компрессор всасывает в минуту  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $23^\circ \text{ С}$  и давлении  $0,11 \text{ МПа}$  и сжимает его до  $0,85 \text{ МПа}$ .

Определить потребную мощность двигателя для привода компрессора при адиабатном сжатии, если эффективный КПД компрессора  $\eta_K = 0,75$ .

## Проверочная работа № 5 «Водяной пар»

### Вариант 1

1. Определить состояние водяного пара.
  - а)  $p = 14$  бар;  $v = 0,1208$  м<sup>3</sup>/кг
  - б)  $p = 29$  бар;  $v = 0,0691$  м<sup>3</sup>/кг
2. В сосуде объемом  $V = 500$  см<sup>3</sup> находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды общей массой  $M = 0,05$  кг. Температура внутри сосуда  $t = 310$  °С. Найти степень сухости смеси.
3. Найти количество теплоты, затрачиваемое на получение 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = 1,6$  МПа, если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 30$  °С.

#### Вариант 2

1. Определить состояние водяного пара.
  - а)  $p = 14$  бар;  $v = 0,1625$  м<sup>3</sup>/кг
  - б)  $p = 9$  бар;  $v = 0,2014$  м<sup>3</sup>/кг
2. В сосуде объемом  $V = 1$  л находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды. Найти степень сухости смеси, если ее масса  $M = 0,1$  кг, а температура  $t = 300$  °С.
3. Найти количество теплоты, затрачиваемое на перегрев 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = 3$  МПа до температуры  $t = 550$  °С.

#### Вариант 3

1. Определить состояние водяного пара.
  - а)  $p = 20$  бар,  $v = 0,090$  м<sup>3</sup>/кг
  - б)  $p = 13$  бар,  $t = 185$  °С
2. В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней насыщенный пар. Определить массу пара, если объем барабана  $V = 8$  м<sup>3</sup>, абсолютное давление  $p = 1,5$  МПа и масса воды  $M_B = 6000$  кг. Принять пар, находящийся над водой, сухим насыщенным.
3. Найти количество теплоты, затрачиваемое на получение 1 кг влажного насыщенного пара при давлении  $p = 10$  МПа и степени сухости  $x = 0,98$  до температуры  $t = 480$  °С.

#### Вариант 4

1. Определить состояние водяного пара.
  - а)  $p = 12$  бар  $v = 0,1912$  м<sup>3</sup>/кг
  - б)  $p = 1,8$  МПа  $v = 0,1104$  м<sup>3</sup>/кг
2. Барабан парового котла объемом  $V = 15$  м<sup>3</sup> заполнили на 50% сухим насыщенным паром и на 50% кипящей водой. Определить энтальпию образовавшегося в барабане влажного пара, если давление его  $p = 10$  МПа.

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара при  $p = 2 \text{ МПа}$  и  $t = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Вариант 5

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 11 \text{ бар}$       $v = 0,1670 \text{ м}^3/\text{кг}$

б)  $p = 2,3$       $t = 126 \text{ }^\circ\text{C}$

2. Водяной пар, имея абсолютное давление  $p = 5 \text{ МПа}$  и степень сухости  $x = 0,88$ , течет по трубе со скоростью  $20 \text{ м/с}$ . Определить диаметр трубы, если расход пара  $D = 1,5 \text{ кг/с}$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара из кипящей жидкости при  $p = 4 \text{ МПа}$ , если температура получаемого пара  $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Вариант 6

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 10 \text{ бар}$       $v = 0,272 \text{ м}^3/\text{кг}$

б)  $p = 20 \text{ бар}$       $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

2. В резервуаре объемом  $V = 5 \text{ м}^3$ , находится влажный пар со степенью сухости  $x = 0,3$ . Определить массу влажного пара, объем, занимаемый водой, и объем, занимаемый сухим насыщенным паром. Давление в резервуаре  $p = 19 \text{ МПа}$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара при  $p = 1,5 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,96$ , если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Вариант 7

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 20 \text{ бар}$       $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$

б)  $p = 10 \text{ бар}$       $v = 0,172 \text{ м}^3/\text{кг}$

2. Определить объем резервуара, заполненного влажным паром со степенью сухости  $x = 0,65$ , если масса влажного пара  $M = 160 \text{ кг}$ , а температура в резервуаре  $t = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара при  $p = 1,8 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,9$ , если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Вариант 8

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 13 \text{ бар}$       $v = 0,0011438 \text{ м}^3/\text{кг}$

б)  $p = 16$  бар  $v = 0,1038$  м<sup>3</sup>/кг

2. Найти диаметр паропровода, по которому протекает пар при давлении  $p = 1,2$  МПа и температуре  $t = 260$  °С. Расход пара  $D = 350$  кг/ч, скорость пара  $50$  м/с.

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = 3,5$  МПа, если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 25$  °С.

### Вариант 9

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 7$  бар  $t = 200$  °С

б)  $p = 12$  бар  $v = 0,1605$  м<sup>3</sup>/кг

2. В барабане парового котла находится влажный пар при абсолютном давлении  $p = 20$  МПа и степени сухости  $x = 0,4$ . Определить массу влажного пара, а также объемы воды и сухого насыщенного пара, если объем парового котла  $V = 12$  м<sup>3</sup>.

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на перегрев 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = 5,2$  МПа до температуры  $t = 500$  °С.

### Вариант 10

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 8$  бар  $v = 0,2403$  м<sup>3</sup>/кг

б)  $p = 17$  бар  $v = 0,1067$  м<sup>3</sup>/кг

2. Определить объем 120 кг влажного пара при абсолютном давлении  $p = 10$  МПа и степени сухости  $x = 0,8$ . Насколько увеличится объем пара, если довести степень сухости его до единицы при том же давлении?

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара из кипящей воды. Давление пара  $p = 6,5$  МПа, температура  $t = 400$  °С.

### Вариант 11

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 8$  бар  $v = 0,2403$  м<sup>3</sup>/кг

б)  $p = 17$  бар  $v = 0,1067$  м<sup>3</sup>/кг

2. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию  $6$  м<sup>3</sup> насыщенного водяного пара при давлении  $p = 1,2$  МПа и степени сухости  $x = 0,9$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара при  $p = 2,6$  МПа и степени сухости  $x = 0,98$ , если температура питательной воды  $t_{п.в.} = 35$  °С.



## Вариант 12

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 15$  бар      $v = 0,1502$  м<sup>3</sup>/кг

б)  $p = 9$  бар      $t = 175,35^\circ$  С

1. Определить массу  $9$  м<sup>3</sup> пара при давлении  $p = 0,8$  МПа и степени влажности 10%.

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на перегрев 1 кг пара при  $p = 4,8$  МПа и степени сухости  $x = 0,95$  до температуры  $t = 400^\circ$  С.

## Вариант 13

1. Определить состояние водяного пара.

а)  $p = 7$  бар      $v = 0,2115$  м<sup>3</sup>/кг

б)  $p = 16$  бар      $t = 180^\circ$  С

2. Определить температуру, энтальпию и внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при  $p = 1,3$  МПа и степени сухости  $x = 0,98$ .

3. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = 7$  МПа, если степени сухости пара в первоначальном состоянии  $x = 0,87$ .

## Проверочная работа № 6 «Циклы паротурбинных установок»

### Вариант 1

1. Определить термический к.п.д. и конечную влажность пара для идеального цикла паросиловой установки с промежуточным перегревом пара, если в турбину поступает пар с параметрами  $p_1 = 12$  МПа и  $t_1 = 450^\circ$  С, вторичный перегрев осуществляется при давлении  $p_{III} = 2,4$  МПа до температуры  $t_{III} = 450^\circ$  С и давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить также, какое изменение термического к.п.д. и конечной влажности пара дает вторичный перегрев по сравнению с циклом Ренкина для тех же начальных параметров и конечного давления пара.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

2. Турбина с одним промежуточным отбором пара при давлении  $p_{OT} = 0,4$  МПа работает при начальных параметрах пара  $p_1 = 4$  МПа,  $t_1 = 250^\circ$  С и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4$  кПа.

Определить поверхность охлаждения конденсатора, если известны расход конденсирующегося пара  $D_K = 6$  кг/с, внутренний относительный к.п.д. части

высокого давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,74$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после отбора)  $\eta''_{oi} = 0,76$ , средний температурный напор в конденсаторе  $\Delta t_{CP} = 10^{\circ}\text{C}$  и коэффициент теплопередачи  $k = 4 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

## Вариант 2

1. В идеальном цикле паросиловой установки с промежуточным перегревом пара на выходе из цилиндра высокого давления турбины давление пара  $p_{III} = 0,8 \text{ МПа}$  и степень сухости  $x_{III} = 0,98$ . Вторичный перегрев доводится до такой температуры, что после расширения пара в цилиндре низкого давления до давления  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$  и его степень сухости  $x_2 = 0,93$ . Определить количество тепла, сообщаемое пару во вторичном пароперегревателе. Определить также начальную температуру пара и термический к.п.д. цикла, если давление пара перед турбиной  $p_1 = 12 \text{ МПа}$ .

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

2. Турбина с одним промежуточным отбором пара при давлении  $p_{OT} = 0,3 \text{ МПа}$  работает при начальных параметрах пара  $p_1 = 4 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 425^{\circ}\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4 \text{ кПа}$ .

Определить расход охлаждающей воды для конденсатора турбины, если известны внутренний относительный к.п.д. части высокого давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,73$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после отбора)  $\eta''_{oi} = 0,75$ , расход конденсирующегося пара  $D_K = 7,5 \text{ кг/с}$ , температура охлаждающей воды на входе в конденсатор  $t'_B = 10^{\circ}\text{C}$  и температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора  $t''_B = 22^{\circ}\text{C}$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

## Вариант 3

1. Паросиловая установка работает по регенеративному циклу с отборами при давлениях 1 и 0,16 МПа, параметры пара перед турбиной  $p_1 = 9 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 500^{\circ}\text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ . Определить термический к.п.д. регенеративного цикла и сравнить его с термическим к.п.д. цикла Ренкина, осуществляемого при тех же начальных параметрах и том же конечном давлении пара.

2. Турбина с одним промежуточным отбором пара при давлении  $p_{OT} = 0,2 \text{ МПа}$  работает при начальных параметрах пара  $p_1 = 3,5 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 435^{\circ}\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 3,5 \text{ кПа}$ .

Определить расход охлаждающей воды для конденсатора турбины, если известны расход конденсирующегося пара  $D_K = 7 \text{ кг/с}$ , температура охлаждаю-

щей воды на входе в конденсатор  $t'_B = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температура выходящей воды на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры насыщенного пара в конденсаторе и внутренние относительные к.п.д. части высокого давления (до отбора) и части низкого давления (после отбора)  $\eta'_{oi} = \eta''_{oi} = 0,78$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

#### Вариант 4

1. Параметры пара перед теплофикационной турбиной  $p_1 = 3\text{ МПа}$  и  $t_1 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004\text{ МПа}$ . При давлении  $0,3\text{ МПа}$  часть пара отбирается для нужд производства. С производства возвращается конденсат с температурой  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить теоретическую мощность турбины, если расход пара на нее составляет  $30\text{ кг/с}$ , а отпуск тепла на производство –  $35\text{ МДж/с}$ .

2. Турбина с одним промежуточным отбором пара при давлении  $p_{OT} = 0,2\text{ МПа}$  работает при начальных параметрах пара  $p_1 = 5\text{ МПа}$ ,  $t_1 = 435\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4\text{ кПа}$ .

Определить количество теплоты, отдаваемое конденсирующимся паром в конденсаторе турбины, если известны расход конденсирующегося пара  $D_{OT} = 8,5\text{ кг/с}$  и внутренние относительные к.п.д. части высокого давления (до отбора) и части низкого давления (после отбора)  $\eta'_{oi} = \eta''_{oi} = 0,8$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

#### Вариант 5

1. Определить термический к.п.д. цикла паросиловой установки с регенеративным отбором при давлении  $0,3\text{ МПа}$ , если в турбину поступает пар с параметрами  $p_1 = 6\text{ МПа}$  и  $t_1 = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004\text{ МПа}$ . Определить также относительное количество пара, расходуемое на регенерацию и термический к.п.д. цикла Ренкина при тех же начальных параметрах и конечном давлении пара.

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 4\text{ МПа}$ ,  $t_1 = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4\text{ кПа}$ , имеет один промежуточный отбор пара при давлении  $p_{OT} = 0,4\text{ МПа}$ .

Определить эффективную мощность турбины, если известны расход пара  $D = 8\text{ кг/с}$ , внутренний относительный к.п.д. части высокого давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,74$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после

отбора)  $\eta''_{oi} = 0,76$ , механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$  и доля расхода пара, отбираемого из промежуточного отбора на производство  $\alpha_{OT} = 0,5$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в  $is$ -диаграмме.

## Вариант 6

1. Сравнить термический к.п.д. цикла Ренкина, регенеративного цикла с одним отбором при давлении пара 2,6 МПа и регенеративного цикла с двумя отборами при давлениях пара 2,6 МПа и 0,12 МПа. Для всех трех случаев начальные параметры пара  $p_1 = 18$  МПа и  $t_1 = 550$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа.

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 3$  МПа,  $t_1 = 380$  °С и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 3,5$  кПа, обеспечивает отбор пара  $D_{OT} = 5$  кг/с при давлении  $p_{OT} = 0,4$  МПа.

Определить расход пара на турбину, если известны электрическая мощность турбины  $N_e = 8000$  кВт, внутренние относительные к.п.д. части высокого давления (до отбора) и части низкого давления (после отбора)  $\eta'_{oi} = \eta''_{oi} = 0,79$  и механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в  $is$ -диаграмме.

## Вариант 7

1. Параметры пара перед теплофикационной турбиной  $p_1 = 6$  МПа и  $t_1 = 450$  °С. При давлении 0,6 МПа часть пара отбирается на производство, откуда возвращается конденсат с температурой 50 °С. Остальной пар расширяется в турбине до давления 0,12 МПа и направляется в теплофикационную сеть, откуда возвращается конденсат с температурой 30 °С. Определить теоретическую мощность турбины, если расход тепла на производство составляет 14 МВт, а на отопление – 37 МВт.

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 3,5$  МПа,  $t_1 = 350$  °С и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4$  кПа, обеспечивает отбор пара  $D_{OT} = 4$  кг/с при давлении  $p_{OT} = 0,4$  МПа.

Определить расход пара на турбину, если известны электрическая мощность турбины  $N_e = 6000$  кВт, внутренний относительный к.п.д. части высоко-

го давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,78$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после отбора)  $\eta''_{oi} = 0,79$  и механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

## Вариант 8

1. Турбина мощностью 24 МВт работает при параметрах пара  $p_1 = 2,6$  МПа и  $t_1 = 420$  °С и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4$  кПа. Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при  $p_{OT} = 0,12$  МПа.

Определить термический к.п.д. и удельный расход пара.

Определить также улучшение термического к.п.д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

2. Турбина, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 3$  МПа и  $t_1 = 420$  °С и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 4$  кПа, имеет один промежуточный отбор пара при давлении  $p_{OT} = 0,4$  МПа.

Определить электрическую мощность турбогенератора, если известны расход пара на турбину  $D = 10$  кг/с, внутренние относительные к.п.д. части высокого давления (до отбора) и части низкого давления (после отбора)  $\eta'_{oi} = \eta''_{oi} = 0,78$ , механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,8$ , к.п.д. электрического генератора  $\eta_e = 0,98$  и доля расхода пара, отбираемого из промежуточного отбора на производство  $\alpha_{OT} = 0,4$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

## Вариант 9

1. Паротурбинная установка работает по циклу с промежуточным перегревом пара. Первоначальные параметры пара на входе в турбину  $p_1 = 20$  МПа и  $t_1 = 500$  °С, давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа, промежуточный перегрев пара происходит при давлении  $p_{III} = 4,0$  МПа до температуры  $t_{III} = 450$  °С. Определить термический к.п.д., удельный расход пара, количество теплоты, сообщенной пару в парогенераторе, потерю теплоты в конденсаторе и степень сухости влажного пара.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 4$  МПа,  $t_1 = 425$  °С и давлении пара в

конденсаторе  $p_2 = 3,5 \text{ кПа}$ , обеспечивает отбор пара  $D_{OT} = 6 \text{ кг/с}$  при давлении  $p_{OT} = 0,3 \text{ МПа}$ .

Определить эффективную мощность турбины, если известны расход пара на турбину  $D = 12 \text{ кг/с}$ , внутренний относительный к.п.д. части высокого давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,74$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после отбора)  $\eta''_{oi} = 0,75$  и механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

## Вариант 10

1. Паротурбинная установка работает по регенеративному циклу с начальным давлением пара  $p_1 = 2 \text{ МПа}$ , температурой  $t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлением в конденсаторе  $p_2 = 4 \text{ кПа}$ . Пар для регенеративного подогрева питательной воды отбирается при давлении  $p_{OT} = 0,2 \text{ МПа}$ . Определить удельный расход пара и термический к.п.д. цикла.

2. Турбина с регулируемым производственным отбором пара, работающая при начальных параметрах пара  $p_1 = 3 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении пара в конденсаторе  $p_2 = 3 \text{ кПа}$ , имеет один промежуточный отбор пара при давлении  $p_{OT} = 0,5 \text{ МПа}$ .

Определить количество пара, отбираемого из промежуточного отбора на производство, если известны эффективная мощность турбины  $N_e = 5400 \text{ кВт}$ , внутренний относительный к.п.д. части высокого давления (до отбора)  $\eta'_{oi} = 0,73$ , внутренний относительный к.п.д. части низкого давления (после отбора)  $\eta''_{oi} = 0,75$ , расход пара на турбину  $D = 9 \text{ кг/с}$  и механический к.п.д. турбины  $\eta_m = 0,98$ .

Определить термический к.п.д. цикла, считая, что пар полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата при температуре насыщения.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в  $is$ -диаграмме.

## Вариант 11

1. В паросиловой установке, работающей при начальных параметрах  $p_1 = 11 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении в конденсаторе  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ , введен вторичный перегрев пара при  $p_{III} = 3 \text{ МПа}$  до начальной температуры.

Определить термический к.п.д. цикла со вторичным перегревом пара и термический к.п.д. при отсутствии перегрева.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в  $is$ -диаграмме.

2. Турбогенератор работает при параметрах пара  $p_1 = 9 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 535 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,0035 \text{ МПа}$ . Для подогрева питательной воды имеются два отбора: один при  $p_{OTB1} = 0,7 \text{ МПа}$  и другой при  $p_{OTB2} = 0,12 \text{ МПа}$ .

Определить термический к.п.д. регенеративного цикла и сравнить его с циклом без регенерации.

### Вариант 12

1. Паротурбинная установка мощностью  $N = 200 \text{ МВт}$  работает по циклу Ренкина при начальных параметрах  $p_1 = 13 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 565 \text{ }^\circ\text{C}$ . При давлении  $p_{\text{III}} = 2 \text{ МПа}$  осуществляется промежуточный перегрев пара до первоначальной температуры. Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ . Температура питательной воды  $t_{\text{п.в.}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить часовой расход топлива, если теплота сгорания топлива  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 29,3 \text{ Мдж/кг}$ , а к.п.д. котельной установки  $\eta_{\text{к.в.}} = 0,92$ .

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

2. Из паровой турбины мощностью  $N = 25 \text{ 000 кВт}$ , работающей при  $p_1 = 9 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$  производится два отбора: один при  $p_{\text{ОТБ1}} = 1 \text{ МПа}$  и другой при  $p_{\text{ОТБ2}} = 0,12 \text{ МПа}$ .

Определить термический к.п.д. установки, улучшение термического к.п.д. по сравнению с циклом Ренкина и часовой расход пара через каждый отбор.

### Вариант 13

1. Турбина мощностью  $6000 \text{ кВт}$  работает при параметрах пара  $p_1 = 3,5 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 435 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ . Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при  $p_{\text{ОТБ}} = 0,12 \text{ МПа}$ .

Определить термический к.п.д. установки, удельный расход пара и теплоту. Определить также улучшение термического к.п.д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

2. Проект паротурбинной установки предусматривает следующие условия ее работы:  $p_1 = 30 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . При давлении  $p_{\text{III}} = 7 \text{ МПа}$  вводится вторичный перегрев до температуры  $540 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить конечную степень сухости пара при отсутствии вторичного перегрева и улучшение термического к.п.д. и конечную сухость пара после применения вторичного перегрева.

Изобразить процесс расширения пара в турбине в *is*-диаграмме.

## Проверочная работа № 7 «Циклы холодильных установок»

### Вариант 1

1. В идеальном цикле воздушной холодильной установки параметры воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , давление воздуха после сжатия  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ , температура воздуха, поступающего в детандер,  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, отнимаемого воздухом от охлаждаемого объекта, количество тепла, отдаваемого воздухом в окружающую среду, затрату работы и холодильный коэффициент цикла. Определить также холодильный коэффициент эквивалентного обратного цикла Карно.

2. Парокомпрессионная холодильная установка с редукционным вентилем работает на аммиаке в интервале температур от  $t_1 = -10^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Пар хладагента выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность аммиака, холодильный коэффициент и работу, затраченную на цикл.

## Вариант 2

1. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки, работающей по идеальному циклу,  $Q_0 = 250 \text{ кДж/с}$ , параметры воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , давление воздуха после сжатия  $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$  и температура воздуха, поступающего в детандер,  $t_3 = 15^\circ\text{C}$ . Определить мощность двигателя компрессора, мощность детандера, холодильный коэффициент установки и количество тепла, передаваемое охлаждающей воде.

2. Парокомпрессионная холодильная установка с редукционным вентилем работает на фреоне-12 в интервале температур от  $t_1 = -15^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ . Пар хладагента выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность фреона-12, холодильный коэффициент и работу, затраченную на цикл.

## Вариант 3

1. В идеальном цикле воздушной холодильной установки параметры воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = -5^\circ\text{C}$ , давление воздуха после сжатия  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ , температура воздуха перед детандером  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, отнимаемого воздухом от охлаждаемого объекта, количество тепла, отдаваемого охлаждающей воде, затрату работы и холодильный коэффициент цикла. Определить также холодильный коэффициент эквивалентного обратного цикла Карно.

2. Парокомпрессионная холодильная установка с редукционным вентилем работает на углекислоте в интервале температур от  $t_1 = -20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Пар хладагента выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность углекислоты, холодильный коэффициент и работу, затраченную на цикл.



#### Вариант 4

1. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки  $Q_0 = 230$  кДж/с. Определить ее холодильный коэффициент, мощность двигателя компрессора и мощность детандера, если известно, что параметры воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 0$  °С,  $p_2 = 0,4$  МПа, а температура при выходе из охладителя  $t_3 = 15$  °С. Сжатие и расширение воздуха принять политропным с показателем политропы  $n = 1,3$ .

2. Теоретическая мощность привода компрессора аммиачной холодильной установки с редукционным вентилем равна 50 кВт. Установка работает в интервале температур от  $t_1 = -10$  °С до  $t_2 = 20$  °С, пар аммиака выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность аммиака, холодильный коэффициент цикла, расход хладагента. Определить также секундную производительность установки.

#### Вариант 5

1. Воздушная холодильная установка, работающая в интервале температур между  $t_1 = -10$  °С и  $t_3 = 20$  °С, имеет холодопроизводительность  $Q_0 = 180$  кДж/с. Давление воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1$  МПа, давление после сжатия в компрессоре  $p_2 = 0,5$  МПа. Определить мощность привода компрессора, мощность детандера, количество тепла, передаваемое охлаждающей воде, и расход холодильного агента. Считать, что установка работает по идеальному циклу.

2. Холодопроизводительность парокомпрессионной холодильной установки с редукционным вентилем, работающей на фреоне-12, составляет 140 кДж/с. Установка работает в интервале температур от  $t_1 = -5$  °С до  $t_2 = 20$  °С, пар фреона-12 выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность фреона-12, холодильный коэффициент цикла, а также расход хладагента и теоретическую мощность привода компрессора.

#### Вариант 6

1. Воздушная холодильная установка должна обеспечить в охлаждаемом помещении температуру  $t_1 = -5$  °С при температуре окружающей среды  $t_3 = 20$  °С. Холодопроизводительность установки  $Q_0 = 150$  кДж/с, давление воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1$  МПа, на выходе из компрессора  $p_2 = 0,5$  МПа. Определить расход мощности на установку, расход хладагента, холодильный ко-

эфицент и количество тепла, передаваемое окружающей среде. Считать, что установка работает по идеальному циклу.

2. Холодопроизводительность парокомпрессионной холодильной установки с редукционным вентилем, работающей на углекислоте, составляет  $200 \text{ кДж/с}$ . Установка работает в интервале температур от  $t_1 = -10^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ , пар углекислоты выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность углекислоты, холодильный коэффициент цикла, а также расход хладагента и теоретическую мощность компрессора.

### Вариант 7

1. Определить расход мощности на работу холодильной установки, если температура охлаждаемого помещения  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , окружающей среды  $t_3 = 25^\circ\text{C}$ , холодопроизводительность  $Q_0 = 180 \text{ кДж/с}$ . Давление воздуха перед компрессором  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , за компрессором  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ . Определить также расход хладагента, холодильный коэффициент и количество теплоты, отдаваемое охлаждаемой воде. Считать, что установка работает по идеальному циклу.

2. Парокомпрессионная теплонасосная установка с редукционным вентилем служит для поддержания температуры в помещении  $t_2 = 20^\circ\text{C}$  при температуре наружного воздуха  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ . В качестве рабочего тела используется фреон-12, который выходит из компрессора в виде сухого насыщенного пара. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельное тепло, отдаваемое рабочим телом помещению, отопительный коэффициент цикла и работу, затрачиваемую на цикл.

### Вариант 8

1. Воздушная холодильная установка, работающая по идеальному циклу, производит лед при температуре  $-3^\circ\text{C}$  из воды с температурой  $10^\circ\text{C}$ . Всасываемый в компрессор воздух имеет температуру  $t_1 = -10^\circ\text{C}$  и давление  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , на выходе из компрессора давление  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ . В охладителе температура воздуха понижается до  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ . Расход воздуха равен  $0,3 \text{ кг/с}$ . Определить холодильный коэффициент, мощность привода компрессора, мощность детандера и количество получаемого льда. Теплоту плавления льда принять равной  $220 \text{ кДж/кг}$ , теплоемкость льда  $c_{л} = 2,1 \text{ кДж/кг}$ .

2. Идеальная парокомпрессионная холодильная установка работает по обратному циклу Карно в интервале температур от  $t_1 = -20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Установка работает на фреоне-12, который сжимается в компрессоре до состояния сухого насыщенного пара. Определить удельную холодопроизводительность фреона-12, холодильный коэффициент цикла и работу, затрачиваемую на цикл.

## Вариант 9

1. Воздушная холодильная установка, работающая по идеальному циклу, производит в 1 ч 200 кг льда при температуре  $-6^{\circ}\text{C}$  из воды с температурой  $12^{\circ}\text{C}$ . Воздух в компрессоре сжимается от параметров  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$  до давления  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ . В охладителе температура сжатого воздуха понижается до  $t_3 = 30^{\circ}\text{C}$ . Определить часовую производительность компрессора, мощность его привода и мощность детандера. Теплоту плавления льда принять равной  $330 \text{ кДж/кг}$ , теплоемкость льда  $c_{\text{л}} = 2,1 \text{ кДж/кг}$ .

2. Идеальная парокомпрессионная теплонасосная установка работает по обратному циклу Карно в интервале температур от  $t_1 = 0^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$ . Установка работает на аммиаке, который сжимается в компрессоре до состояния сухого насыщенного пара. Определить удельную холодопроизводительность аммиака, отопительный коэффициент и работу, затрачиваемую на цикл.

## Вариант 10

1. Воздушная холодильная установка, работающая по идеальному циклу, имеет холодопроизводительность  $300 \text{ кДж/с}$ . Параметры воздуха на выходе из холодильной камеры  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = -3^{\circ}\text{C}$ . После сжатия давление воздуха  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ , температура воздуха после охладителя  $t_3 = 20^{\circ}\text{C}$ . Определить температуру воздуха после расширения в детандере, часовую производительность и мощность привода компрессора, мощность детандера, а также холодильный коэффициент цикла и сравнить его с холодильным коэффициентом обратного цикла Карно для того же интервала температур.

2. Парокомпрессионная теплонасосная установка с редукционным вентилем имеет теплопроизводительность  $300 \text{ кДж/с}$  и служит для отопления жилого дома, поддерживая в помещении температуру  $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$  при температуре наружного воздуха  $t_1 = -20^{\circ}\text{C}$ . В качестве рабочего тела используется углекислота, которая выходит из компрессора в виде сухого насыщенного пара. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельное тепло, отдаваемое рабочим телом помещению, отопительный коэффициент цикла и работу, затрачиваемую на цикл. Определить также расход углекислоты и теоретическую мощность привода компрессора.

## Вариант 11

1. Определить мощность привода двигателя холодильной машины, если температура охлаждаемого помещения  $t_1 = -10^{\circ}\text{C}$ , температура окружающей среды  $t_3 = 25^{\circ}\text{C}$  при холодопроизводительности  $600 \text{ МДж/ч}$ . Максимальное давление воздуха на выходе из компрессора  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ , давление в холодильной камере  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ . Определить также холодильный коэффициент цикла, количество тепла, отдаваемое охлаждающей воде и расход хладагента.

2. Холодильная установка, использующая в качестве холодильного агента фреон-12, работает с дроссельным вентилем. В компрессор подается насыщенный пар фреона-12 и сжимается до такого давления, при котором температура насыщения  $t_s = 30^\circ\text{C}$ . В конденсаторе пар изобарно охлаждается и затем конденсируется. После дросселирования пар отбирает теплоту из охлаждаемой камеры при  $t_4 = -15^\circ\text{C}$ . Холодопроизводительность установки  $Q_0 = 500 \text{ МДж/ч}$ . Определить холодильный коэффициент цикла, теоретическую мощность двигателя компрессора и расход хладагента.

### Вариант 12

1. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки  $Q_0 = 83,7 \text{ МДж/ч}$ . Определить ее холодильный коэффициент и потребную теоретическую мощность двигателя компрессора, если известно, что максимальное давление воздуха в установке  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ , минимальное давление  $p_1 = 0,11 \text{ МПа}$ , температура воздуха в начале сжатия  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , а при выходе из охладителя  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ . Определить также расход хладагента. Сжатие и расширение воздуха принять политропным с показателем политропы  $n = 1,28$ .

2. В парокompрессионной холодильной установке в качестве холодильного агента использует аммиак. Пар аммиака при температуре  $t_1 = -10^\circ\text{C}$  поступает в компрессор, где адиабатно сжимается до давления, при котором его температура  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ , а степень сухости  $x_2 = 1$ . Из компрессора аммиак поступает в конденсаторе, где при постоянном давлении обращается в жидкость ( $x_3 = 0$ ), после чего адиабатно расширяется в детандере до температуры  $t_4 = -10^\circ\text{C}$ . При этой же температуре аммиак поступает в охлаждаемое помещение, где испаряется и образует влажный пар. Определить холодопроизводительность установки, холодильный коэффициент цикла, работу, затраченную в цикле, и количество теплоты, отдаваемой охлаждающей воде.

## 5. МАТЕРИАЛЫ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

### *ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕПЛОМАССООБМЕН.*

#### **Методические указания по организации контроля знаний студентов**

Важнейшей составляющей изучения дисциплины является контроль знаний студентов, в том числе тестовый контроль качества освоения профессиональной образовательной программы (проверка остаточных знаний). Приведенные ниже комплекты заданий позволяют оценить степень усвоения теоретического материала и практических навыков и умений по термодинамике в рамках учебной программы для энергетических специальностей вузов.

Предусмотрены следующие виды контроля знаний студентов:

### ***Входной контроль***

Входной контроль по дисциплине представляет собой задания, позволяющие оценить знание понятий, определений и закономерностей, используемых в данной дисциплине и изучаемых ранее в других курсах (физика, химия, математика), т.е. подготовленность студентов для освоения данной дисциплины.

### ***Межсессионный контроль***

Межсессионный контроль включает теоретические задания по изучаемым темам, выполнение проверочных работ, выполнение и защиту лабораторных работ, выполнение и защиту курсовой работы. Текущий контроль осуществляется систематически в течение семестра (см. график самостоятельной работы п. 5.2), по результатам контроля выставляется промежуточная аттестация (контрольные точки), экзаменационная оценка по дисциплине выставляется с учетом результатов межсессионного контроля.

### ***Экзаменационный контроль***

Итоговой формой контроля знаний студентов является экзамен. В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по четырехбалльной системе. Опрос студентов осуществляется в письменно-устной форме. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса по изученному курсу и задачу (каждый вопрос и задача – по разным темам дисциплины). Для подготовки ответа на вопросы и решения задачи дается 40 мин.

### ***Контроль остаточных знаний***

Проверка качества освоения профессиональной образовательной программы осуществляется после изучения дисциплины в виде тестирования.

## **Критерии оценки знаний студентов**

### ***Входной контроль, межсессионный контроль (теоретические задания) и контроль остаточных знаний***

Знания оцениваются по четырехбалльной шкале.

*Отлично* – не менее 85% правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 75% правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50% правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50% правильно выполненных заданий.

### ***Межсессионный контроль (проверочные работы)***

Каждая проверочная работа включает две задачи. Практические умения решения задач оцениваются по четырех балльной шкале.

*Отлично* – правильно решены обе задачи. *Хорошо* – одна задача решена правильно, при решении второй задачи допущены ошибки (задача не решена до

конца, неправильно найдены некоторые величины) или решение обеих задач содержит ошибки принципиального характера. *Удовлетворительно* – правильно решена одна задача или решение обеих задач содержит принципиальные ошибки. *Неудовлетворительно* – обе задачи решены неверно.

### ***Экзаменационный контроль***

Итоговая аттестация по дисциплине включает рейтингово-модульную систему оценки знаний студентов в следующем соотношении: промежуточный контроль знаний студентов составляет 30 %, остальные 70 % определяются результатами итогового экзамена.

В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по четырехбалльной шкале.

Оценка *«отлично»* ставится в случае правильных и полных ответов на оба теоретические вопросы билета и правильного решения задачи.

Оценка *«хорошо»* ставится в случае:

- правильного, но неполного ответа на один из теоретических вопросов билета, требующего уточняющих дополнительных вопросов со стороны преподавателя или ответа, содержащего ошибки принципиального характера, которые студент исправляет после замечаний (дополнительных вопросов) преподавателя; правильного решения задачи;

- правильных и полных ответа на оба теоретических вопроса билета; затруднений при решении задачи, с которыми студент справляется после помощи преподавателя.

Оценка *«удовлетворительно»* ставится в случае:

- ответов, содержащего ошибки принципиального характера на теоретические вопросы билета; правильного решения задачи;

- неверного ответа (отсутствия ответа) на один из теоретических вопросов билета; решения задачи после незначительной помощи преподавателя;

- правильных и полных ответов на оба теоретических вопроса билета; неверного решения задачи (не справился с задачей после помощи преподавателя).

Оценка *«неудовлетворительно»* ставится в случае:

неверных ответов (отсутствия ответов) на оба теоретических вопроса билета;

неверного ответа (отсутствия ответов) на один из теоретических вопросов билета и неверного решения задачи.

## **Фонды тестовых заданий**

### ***Входной контроль***

1. Какие способы передачи теплоты существуют? Дайте их краткую характеристику.
2. Что такое тепловой поток?
3. Что такое температурное поле? Изотермическая поверхность?

4. Какие тела – твердые или жидкие – лучше проводят тепло?
5. Как возникает свободная поверхность?
6. По какой величине классифицируют электромагнитные волны? Назовите виды излучения?
7. Что такое теплообменный аппарат?
8. Какие теплообменные аппараты имеются в технологической схеме ТЭС?

### ***Межсессионный контроль***

#### Задания для текущей проверки знаний

#### *По темам 1 и 2*

1. Можно ли электрическую мощность и поток теплоты выражать в одноименных единицах?
2. Теплопроводность характерна для:
  - а) твердых тел; б) жидкостей; в) газов.
3. Какое утверждение является справедливыми:
  - а)  $\text{grad } t \perp$  изотерме; б)  $\text{grad } t //$  изотерме?
4. Верно ли, что градиент температуры и вектор плотности теплового потока направлены в противоположные стороны?
5. Что такое температурный градиент, в чем он измеряется?
6. Коэффициент теплопроводности зависит:
  - а) от температуры; б) от геометрических размеров; в) от материала; г) от давления; д) от величины теплового потока,
7. Можно ли коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  выразить в одинаковых единицах? В каких?
8. Верно ли, что при стационарном режиме теплообмена перепад температур на стенке прямо пропорционален ее термическому сопротивлению?
9. Запишите закон Фурье; укажите величины, входящие в уравнение и единицы их измерения.

#### *По темам 3, 4, 5, 6*

1. Число Рейнольдса является определяющим при:
  - а) свободной конвекции; б) вынужденной конвекции.
2. Верно ли, что зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от температуры представлена в таблицах теплофизических свойств наряду с  $\lambda$ ,  $\nu$  и другими величинами?
3. Конвекция возможна:
  - а) в твердых телах; б) в жидкостях; в) в газах.
4. Верно ли, что  $Nu_{жх}$  при турбулентном течении вдоль пластины увеличивается с увеличением скорости обтекания?
5. Тепловой пограничный слой – это...
6. При обтекании одиночного цилиндра при изменении угла атаки от  $0^0$  до  $90^0$  интенсивность теплообмена:

- а) уменьшается; б) увеличивается.
7. Интенсивность переноса теплоты от поверхности твердого тела к обтекающей его жидкости зависит от:
- а) физических свойств жидкости; б) физических свойств твердого тела;  
 в) температуры жидкости; г) температуры твердого тела; д) разности температур твердого тела и жидкости; е) скорости движения жидкости;
8. Запишите закон теплоотдачи Ньютона-Рихмана, укажите величины, входящие в уравнение и единицы их измерения.
9. Всегда ли на участке ламинарной свободной конвекции местный коэффициент теплоотдачи уменьшается по мере перемещения жидкости вдоль вертикальной стенки?
10. Возможна ли свободная конвекция вдоль вертикальной стенки без участка с турбулентным движением?
11. Конденсация – это ...
12. Бывают следующие режимы кипения  
 Возникновение того или иного режима зависит от ...

*По темам 7 и 8*

1. Теплообмен между жидкими телами через разделяющую их стенку – это:  
 а) теплоотдача; б) теплопроводность; в) теплопередача.
2. Верно ли, что между стенками, разделенными слоем газа, может существовать как конвективный теплообмен, так и обмен излучением?
3. Является ли перенос теплоты через стекло примером сложного теплообмена?
4. Лучистый теплообмен – это...
5. Какое тело называется абсолютно белым? Существуют ли такие тела в природе?
6. Укажите особенности излучения твердых тел и газов
7. Эффективное излучение тела:  
 а) больше собственного излучения на величину ...  
 б) меньше собственного излучения на величину ...  
 в) равно собственному излучению тела
8. Может ли собственное излучение тела быть меньше отраженного этим телом излучения?
9. Может ли серое тело излучать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой же окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?
10. Верно ли, что с помощью экранов можно как уменьшить, так и увеличить лучистый теплообмен?
11. Для защиты тела от излучения в качестве экрана следует использовать материал, у которого:  
 а) большое значение  $\varepsilon_n$ ; б) малое значение  $\varepsilon_n$ .
12. Степень черноты изменяется в интервале ...



Для черного тела она равна...

13. Запишите закон Вина, укажите величины, входящие в это уравнение и единицы их измерения.

14. Закон для черного тела Стефана-Больцмана записывается:

Укажите величины, входящие в это уравнение и единицы их измерения.

### *По теме 16*

1. Контактные теплообменные аппараты – такие, ...

2. Виды теплового расчета теплообменных аппаратов

Результатом расчета является определение...

3. Уравнение теплопередачи

Укажите величины, входящие в уравнение и единицы их измерения

4. Какие преимущества имеет противоточная схема по сравнению с прямоточной?

5. Как изменяются температуры горячего и холодного теплоносителей по длине канала для прямотока и противотока? (зарисовать)

Примеры заданий для проверочных работ приведены в п. 5.5.

### ***Экзаменационный контроль***

#### Вопросы к экзамену

Основные понятия и определения теплопередачи (способы переноса тепла, тепловой поток).

2. Температурное поле. Закон Фурье, коэффициент теплопроводности.

3. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

4. Условия однозначности для процессов теплопроводности.

5. Уравнение для стационарной теплопроводности.

6. Теплопроводность плоской стенки.

7. Теплопередача через плоскую стенку.

8. Теплопроводность цилиндрической стенки.

9. Теплопередача через цилиндрической стенку.

10. Теплопроводность и теплопередача через шаровую стенку.

11. Критический диаметр цилиндрической стенки.

12. Тепловая изоляция.

14. Пути интенсификации теплопередачи. Теплопередача через ребристую стенку.

15. Теплопроводность в стержне постоянного сечения.

16. Аналитическое описание нестационарных процессов теплопроводности.

22. Охлаждение неограниченной пластины.

23. Анализ решения Охлаждение неограниченной пластины

20. Определение количества теплоты, отданного пластиной в процессе охлаждения.

- 21.охлаждение и нагревание тел конечных размеров.
- 22.Зависимость процесса охлаждения (нагрева) от Формы тела.
- 23.Регулярный режим охлаждения (нагрева) тела.
- 24.Основные понятия и определения конвективного теплообмена.
- 25.Основные физические свойства жидкости.
- 26.Дифференциальные уравнения неразрывности к движения для однородной жидкости,
- 27.Дифференциальное уравнение теплообмена.
- 28.Краевые условия, используемые для решения задач конвективного теплообмена.
- 28.основные понятия и определения конвективного теплообмена
- 29.Основные Физические свойства жидкости
- 30.Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена
- 31.Краевые условия
- 32.Гидравлический и тепловой пограничные слои
- 33.Основные положения теории подобия, условия гидродинамического и теплового подобия. Физический смысл основных чисел подобия.
- 34.Обработка и обобщение результатов опытов.
- 35.Эмпирические формулы в критериальном виде
- 36.Теплоотдача при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве.
- 37.Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве.
- 38.Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности
- 39.Особенности движения и теплообмена в трубах.
- 40.Теплоотдача, при ламинарном и турбулентном движении жидкости в горизонтальных трубах.
41. Теплоотдача при течении жидкости в трубах некруглого сечения изогнутых и шероховатых трубах.
- 42.Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании одиночной трубы.
- 43.Теплоотдача при поперечном вынужденном обтекании пучков труб.
- 44.Теплообмен при конденсации чистого пара: основные положения, виды конденсации.
45. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного газа.
46. Зависимость конденсации от перегрева пара, состояния поверхности, содержания в паре неконденсирующихся газов, скорости и направления течения пара, влияние компоновки поверхности нагрева.
- 47.Теплоотдача при конденсации пара в трубах.
2. Основные понятия и определения из теории кипения, режимы кипения.
- 49.Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме,
50. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в условиях вынужденной конвекции в трубах.

51. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена.
52. Тепло - и массообмен.
53. Аналогия процессов теплообмена и массообмена.
54. Тепло- и массообмен при конденсации пара из газовой смеси.
55. Тепло- и массообмен при испарении в парогазовую среду.
56. Основные сведения о тепло и массообмене при химических превращениях.
57. Описание процесса излучением. Основные понятия и определения.
58. Основные законы теплового излучения
59. Теплообмен излучением между телами.
60. Теплообмен излучением при наличии экранов.
61. Тепловое излучение газов.
62. Теплообмен излучением между газом и оболочкой.
63. Закон Бугера.
64. Классификация теплообменных аппаратов.
65. Основные положения и уравнения теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов.
66. Средняя разность температур и методы ее вычисления.
67. Расчет конечных температур рабочих жидкостей.
68. Общие сведения о тепловом расчете регенеративных теплообменных аппаратов.
69. Задачи гидромеханического расчета теплообменных аппаратов.
70. Гидравлическое сопротивление элементов теплообменного аппарата. Расчет мощности, необходимой для перемещения теплоносителей.

### ***Контроль остаточных знаний***

Тестовые задания для проверки остаточных знаний  
по дисциплине «Тепломассообмен» для специальности 140101  
25 заданий  
время тестирования 40 минут

*Инструкция:* При ответе следует выбрать один ответ из предложенных (задания 1 (вар.1), 2 (вар. 2), 6, 8 (вар.1), 16 (вар.2) содержат несколько правильных ответов).

Результаты тестирования оценивают по 4-х балльной шкале (*отлично* – не менее 85 % правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 70 % правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50 % правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50 % правильно выполненных заданий)

### Вариант 1

1. Теплопроводность возможна:

а) в твердых телах; б) в жидкостях; в) в газах.

2. Градиент температуры – это ...  
Он измеряется:
3. Изобразите изменение температуры по толщине цилиндрической стенки. Укажите на рисунке направление теплового потока и направление градиента температуры.
4. Для материалов, в которых температура по толщине стенки изменяется указанным образом справедливо следующее соотношение:
- а)  $\lambda_1 > \lambda_2$ ; б)  $\lambda_1 < \lambda_2$ .
5. Распределением температуры на поверхности тела для любого момента времени задается граничное условие:
- а) первого рода; б) второго рода; в) третьего рода.
6. Основными числами подобия, определяемыми при нестационарном режиме, являются:
- а) Gr; б) Nu; в) Fo; г) Ar; д) Bi; е) Fr.
7. Теплообмен между твердой поверхностью и окружающей средой – это:
- а) теплоотдача; б) теплопроводность; в) теплопередача.
8. Интенсивность переноса теплоты от поверхности твердого тела к обтекающей его жидкости зависит от:
- а) физических свойств жидкости; б) физических свойств твердого тела; в) температуры жидкости; г) температуры твердого тела; д) разности температур твердого тела и жидкости; е) скорости движения жидкости;
9. Динамический пограничный слой – это...
10. Существуют такие режимы движения жидкостей и газов:
11. При свободной конвекции функциональная зависимость определяемых критериев подобия от определяющих имеет следующий вид:  
где коэффициент и показатель степени зависят от ...
12. Возможна ли свободная конвекция вдоль вертикальной стенки без участка с ламинарным движением?
13. При обтекании одиночного цилиндра при изменении угла атаки от  $0^0$  до  $90^0$  интенсивность теплообмена:
- а) уменьшается; б) увеличивается.
14. При движении жидкости через пучок труб степень турбулизации от ряда к ряду:
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не зависит от количества рядов труб.
15. При кипении жидкости возможны следующие режимы:
- а) пленочный; б) капельный; в) пузырьковый.  
Наиболее интенсивным теплообменом характеризуется ... режим.
16. Возникновение того или иного режима зависит от:
- а) состояния поверхности; б) физических свойств вещества; в) величины температурного напора; д) значения поверхностной плотности теплового потока.
17. Может ли собственное излучение тела быть больше поглощенного этим телом излучения?

18. Может ли серое тело поглощать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой же окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?
19. Из закона Кирхгофа следует, что если тело обладает малым коэффициентом поглощения, то оно обладает:
- а) малым коэффициентом излучения; б) большим коэффициентом излучения; в) малым коэффициентом отражения; г) большим коэффициентом отражения.
20. Степень черноты изменяется в интервале ...  
Для абсолютно белого тела она равна...
21. Теплообменные аппараты, в которых одна и та же поверхность попеременно омывается то одним, то другим теплоносителем относятся к:
- а) рекуперативным; б) барботажным; в) регенеративным; г) смешительным.
22. Запишите уравнение теплового баланса для теплообменного аппарата. Укажите величины, входящие в уравнение и единицы их измерения.
23. Какие преимущества имеет противоточная схема движения теплоносителей по сравнению с прямоточной?
24. Как изменяются температуры горячего и холодного теплоносителей по длине теплообменного аппарата для прямотока и противотока? (зарисовать)
25. Задачей поверочного теплового расчета теплообменных аппаратов является:
- а) определение температур теплоносителей на выходе из теплообменника; б) определение коэффициента теплопередачи; в) определение площади поверхности и длины труб; г) определение количества передаваемого тепла.

## Вариант 2

1. Температурное поле – это ...
2. Коэффициент теплопроводности зависит от:
- а) температуры; б) геометрических размеров; в) материала; г) давления; д) величины теплового потока; е) влажности.
3. Изобразите изменение температуры по толщине плоской стенке. Укажите на рисунке направление теплового потока и направление градиента температуры.
4. Для материалов, в которых температура по толщине стенки изменяется указанным образом справедливо следующее соотношение:
- а)  $\lambda_1 > \lambda_2$ ; б)  $\lambda_1 < \lambda_2$ .
5. Поверхностной плотностью теплового потока в каждой точке поверхности тела для любого момента времени задается граничное условие:
- а) первого рода; б) второго рода; в) третьего рода.
6. Перенос теплоты от одной подвижной среды к другой через стенку – это:
- а) теплоотдача; б) теплопроводность; в) теплопередача.
7. Физический смысл коэффициента теплоотдачи – ...
8. Существуют такие режимы движения жидкостей и газов:

9. При вынужденной конвекции функциональная зависимость определяемых критериев подобия от определяющих имеет следующий вид:  
где коэффициент и показатель степени зависят от ...
10. Тепловой пограничный слой – это...
11. При увеличении толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи:  
а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется;  
г) изменение коэффициента теплоотдачи зависит от режима движения.
12. Возможна ли свободная конвекция вдоль вертикальной стенки без участка с турбулентным движением?
13. При обтекании одиночного цилиндра при изменении угла атаки от  $90^0$  до  $0^0$  интенсивность теплообмена:  
а) уменьшается; б) увеличивается.
14. В случае поперечного омывания пучка труб при одинаковых условиях коэффициент теплоотдачи выше при:  
а) шахматном расположении труб; б) коридорном расположении труб.
15. При конденсации пара возможны следующие режимы:  
а) пленочный; б) капельный; в) пузырьковый.  
Наиболее интенсивным теплообменом характеризуется ... режим.
16. Возникновение того или иного режима зависит от:  
а) состояния поверхности; б) физических свойств вещества; в) величины температурного напора; д) значения поверхностной плотности теплового потока.
17. Укажите основные особенности излучения твердых тел и газов.
18. Может ли собственное излучение тела быть меньше отраженного этим телом излучения?
19. Может ли серое тело излучать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой же окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?
20. Из закона Вина следует, что при увеличении температуры тела:  
а) максимум интенсивности смещается в сторону коротких волн; б) максимум интенсивности смещается в сторону длинных волн; в) излучение носит дискретный характер.
21. Степень черноты изменяется в интервале ...  
Для абсолютно черного тела она равна...
22. Теплообменные аппараты, в которых одна сторона поверхности все время омывается горячим теплоносителем, а другая – холодным, относятся к:  
а) рекуперативным; б) барботажным; в) регенеративным; г) смешительным.
23. Запишите уравнение теплопередачи.  
Укажите величины, входящие в уравнение и единицы их измерения.
24. Как изменяются температуры горячего и холодного теплоносителей по длине теплообменного аппарата для прямотока и противотока? (зарисовать)
25. Задачей конструкторского теплового расчета теплообменных аппаратов является:

- а) определение температур теплоносителей на выходе из теплообменника; б) определение коэффициента теплопередачи; в) определение площади поверхности и длины труб; г) определение количества передаваемого тепла
- ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ. ТЕРМОДИНАМИКА.*

### **Методические указания по организации контроля знаний студентов**

Важнейшей составляющей изучения дисциплины является контроль знаний студентов, в том числе тестовый контроль качества освоения профессиональной образовательной программы (проверка остаточных знаний). Приведенные ниже комплекты заданий позволяют оценить степень усвоения теоретического материала и практических навыков и умений по термодинамике в рамках учебной программы для энергетических специальностей вузов.

Предусмотрены следующие виды контроля знаний студентов:

#### ***Входной контроль***

Входной контроль по дисциплине представляет собой задания, позволяющие оценить знание понятий, определений и закономерностей, используемых в данной дисциплине и изучаемых ранее в других курсах (физика, химия, математика), т.е. подготовленность студентов для освоения данной дисциплины.

#### ***Межсессионный контроль***

Межсессионный контроль включает теоретические задания по изучаемым темам, выполнение проверочных работ, выполнение домашних расчетных заданий, выполнение и защиту курсовой работы. Текущий контроль осуществляется систематически в течение семестра (см. график самостоятельной работы п. 5.2), по результатам контроля выставляется промежуточная аттестация (контрольные точки), экзаменационная оценка по дисциплине выставляется с учетом результатов межсессионного контроля.

#### ***Экзаменационный контроль***

Итоговой формой контроля знаний студентов является экзамен. В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по пятибалльной системе. Опрос студентов осуществляется в письменно-устной форме. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса по изученному курсу и задачу (каждый вопрос и задача – по разным темам дисциплины). Для подготовки ответа на вопросы и решения задачи дается 40 мин.

#### ***Контроль остаточных знаний***

Проверка качества освоения профессиональной образовательной программы осуществляется после изучения дисциплины в виде тестирования.

### **Критерии оценки знаний студентов**

### ***Входной контроль, межсессионный контроль (теоретические задания) и контроль остаточных знаний***

Знания оцениваются по четырехбалльной шкале.

*Отлично* – не менее 85% правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 75% правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50% правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50% правильно выполненных заданий.

### ***Межсессионный контроль (проверочные работы)***

Каждая проверочная работа включает две задачи. Практические умения решения задач оцениваются по четырех балльной шкале.

*Отлично* – правильно решены обе задачи. *Хорошо* – одна задача решена правильно, при решении второй задачи допущены ошибки (задача не решена до конца, неправильно найдены некоторые величины) или решение обеих задач содержит ошибки непринципиального характера. *Удовлетворительно* – правильно решена одна задача или решение обеих задач содержит принципиальные ошибки. *Неудовлетворительно* – обе задачи решены неверно.

### ***Экзаменационный контроль***

Итоговая аттестация по дисциплине включает рейтингово-модульную систему оценки знаний студентов в следующем соотношении: промежуточный контроль знаний студентов составляет 30 %, остальные 70 % определяются результатами итогового экзамена.

В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по четырехбалльной шкале.

Оценка «*отлично*» ставится в случае правильных и полных ответов на оба теоретические вопросы билета и правильного решения задачи.

Оценка «*хорошо*» ставится в случае:

- правильного, но неполного ответа на один из теоретических вопросов билета, требующего уточняющих дополнительных вопросов со стороны преподавателя или ответа, содержащего ошибки непринципиального характера, которые студент исправляет после замечаний (дополнительных вопросов) преподавателя; правильного решения задачи;

- правильных и полных ответа на оба теоретических вопроса билета; затруднений при решении задачи, с которыми студент справляется после помощи преподавателя.

Оценка «*удовлетворительно*» ставится в случае:

- ответов, содержащего ошибки принципиального характера на теоретические вопросы билета; правильного решения задачи;

- неверного ответа (отсутствия ответа) на один из теоретических вопросов билета; решения задачи после незначительной помощи преподавателя;



- правильных и полных ответов на оба теоретических вопроса билета; неверного решения задачи (не справился с задачей после помощи преподавателя).

Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае:

неверных ответов (отсутствия ответов) на оба теоретических вопроса билета;

неверного ответа (отсутствия ответов) на один из теоретических вопросов билета и неверного решения задачи.

## **Фонды тестовых заданий**

### ***Входной контроль***

Идеальный газ – это ...

Термическое уравнение состояние идеального газа записывается ...

Первый закон термодинамики устанавливает зависимость между ...

По циклу Карно работают ....

Термический КПД цикла определяется ...

Второй закон термодинамики устанавливает зависимость между ...

### ***Межсессионный контроль***

#### Задания для текущей проверки знаний

##### *По теме 1*

1. Термодинамика изучает ...

2. Закрытая термодинамическая система – такая, ...

3. Основными параметрами состояния являются ..., единицы их измерения следующие ...

4. Если известно  $V$  и  $p_{ВАК}$ , то  $p_{АВС}$  можно определить ...

5. Термодинамическое равновесие – ...

6. Экстенсивные параметры состояния – такие ... (приведите пример)

7. Идеальный газ – это ...

Можно ли считать воздух, азот, водород идеальными газами? При каких условиях?

8. Термическое уравнение состояние идеального газа для 1 кг газа записывается ...

##### *По теме 2*

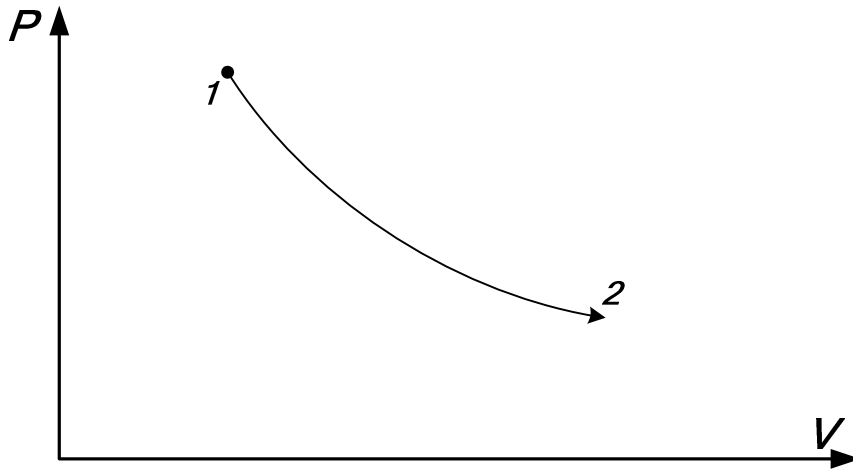
4. Укажите способы передачи энергии от одного тела к другому.

5. Работа – это ...,

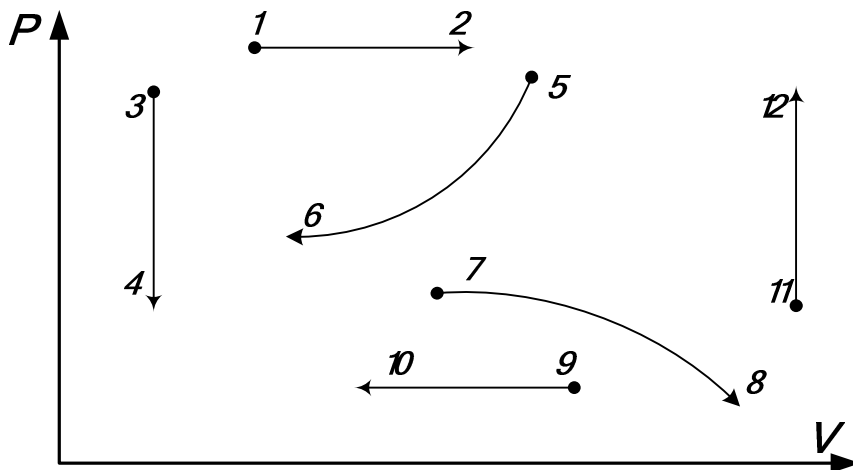
Полная работа обозначается..., единица измерения...

Удельная работа обозначается..., единица измерения...

6. Укажите графически работу расширения, чему она равна?



4. Укажите процесс, в котором работа:
- отрицательна;
  - равна нулю.



5. Понятие «внутренняя энергия» включает в себя ...
6. Какое утверждение является верным, что это означает?
- а) теплота является функцией процесса;
  - б) теплота является функцией состояния.
7. Какое утверждение является верным, что это означает?
- а) работа является аддитивным параметром;
  - б) работа является интенсивным параметром.
8. Какое утверждение является справедливым для реальных газов:  
 $u=f_1(p,T)$ ;  $u=f_2(v,T)$ ;  $u=f_3(p,v)$ ;  $u=f_4(T)$
9. Запишите первый закон термодинамики:
- а) для закрытой системы;
  - б) для потока.

По теме 4

1. Дайте определение удельной теплоемкости тела в процессе с постоянным объемом.
2.  $\tilde{c}$  – это...  
единица измерения ...
3. Если известна  $\tilde{c}$ ,  $c'$  можно определить...
4. В процессе при постоянном давлении и при  $c_p = const$  количество теплоты определяется ...
5. Для любого процесса при  $c = const$  изменение внутренней энергии можно определить...
6. Согласно молекулярно-кинетической теории теплоемкость газов зависит от ..., т.е. учитывается...
7. Для идеального газа справедливо следующее соотношение:  
а)  $c_p - c_v = R$ ; б)  $R - c_v = c_p$ ; в)  $c_p + c_v = R$ ; г)  $R - c_p = c_v$ .
8. Средней теплоемкостью в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  называется...
9. Определить среднюю массовую теплоемкость водорода в процессе с постоянным давлением в интервале температур от  $150^0\text{C}$  до  $500^0\text{C}$ .
10. Если газовая смесь задана объемными долями, то молярная теплоемкость смеси определяется...

#### *По темам 5 и 6*

1. Запишите соотношения между параметрами для изобарного процесса.
2. Процесс, в котором изменение внутренней энергии равно нулю – ...
3. Изобразите изохорный процесс в  $PV$ - диаграмме.
4. II закон термодинамики записывается ...
5. Прямым циклом называется такой цикл, ...

#### *По теме 10*

- 1.1. Цикл ДВС с подводом тепла при постоянном давлении  $Ts$ -координатах изображается...
- 1.2. Укажите, в каких процессах осуществляется подвод и отвод теплоты.
- 1.3. Процессы 1-2 и 4-1 – это процессы ...
- 1.4. Укажите теплоту, полезно используемую в цикле.
- 1.5. Как определяется термический КПД цикла?
2. Как определяется количество отведенного тепла в цикле Отто?
3. Укажите основные характеристики цикла ДВС со смешанным подводом тепла.

Задания для проверочных работ и домашних расчетных заданий приведены в пп. 5.4. и 5.5.

### ***Экзаменационный контроль***

#### Вопросы к экзамену

85. Предмет и метод термодинамики. Основные понятия и определения: термодинамическая система (открытая, закрытая; адиабатная; замкнутая), равновесное и неравновесное состояние т/д системы, гомогенная, гетерогенная т/д система; термодинамический процесс; окружающая среда, рабочее тело.
86. Идеальный газ, основные параметры состояния. Термическое уравнение состояния идеального газа.
87. Энергия, ее виды. Теплота и работа как способы передачи энергии.
88. Первый закон термодинамики для неподвижного газа. Энтальпия, ее свойства.
89. Теплоемкость газов; массовая, молярная, объемная теплоемкости, связь между ними; изохорная, изобарная; истинная и средняя теплоемкости; способы определения теплоемкости.
90. Смеси идеальных газов. Способы задания смесей. Расчет газовой постоянной и теплоемкости смеси.
91. Термодинамические процессы идеальных газов (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, политропный).
92. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.
93. Энтропия, диаграмма  $T, s$ . Расчет изменения энтропии.
94. Понятие цикла, прямой, обратный цикл. Порядок исследования циклов тепловых двигателей.
95. Цикл Карно. Понятие термического КПД.
96. Обобщенный цикл Карно.
97. Элементы термодинамики движущегося газа. Массовый и объемный расходы. Уравнение неразрывности.
98. Первый закон термодинамики для движущегося газа.
99. Основные закономерности соплового и диффузорного течений. Режимы течения.
100. Расчет скорости истечения. Критический режим течения, критические параметры.
101. Определение расхода. Максимальный расход.
102. Сверхкритический режим истечения. Сопло Лаваля.
103. Действительный процесс истечения газов. Коэффициент скорости, коэффициент расхода.
104. Дросселирование идеальных газов.
105. Циклы ДВС с подводом тепла при постоянном объеме, при постоянном давлении. Цикл ДВС со смешанным подводом тепла.
106. ГТУ с подводом тепла при постоянном давлении. Цикл ГТУ с регенерацией тепла.
107. Цикл ГТУ со ступенчатым сжиганием топлива и ступенчатым расширением.
108. Фазовые переходы. Правило фаз Гиббса.

109. Реальные газы, их свойства. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.
110. Водяной пар. Основные понятия и определения.
111.  $P, v$ -диаграмма водяного пара. Основные параметры жидкости, насыщенного и перегретого пара.
112.  $T, s$ - и  $i, s$ - диаграммы водяного пара. Таблицы водяного пара.
113. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный).
114. Истечение водяного пара.
115. Дросселирование водяного пара. Эффект Джоуля-Томсона.
116. Цикл Карно для водяного пара.
117. Цикл Ренкина, его термический КПД.
118. Влияние основных параметров на КПД цикла Ренкина.
119. Цикл со вторичным перегревом пара.
120. Регенеративный цикл паротурбинной установки.
121. Теплофикационный цикл. Принципиальная схема ТЭЦ.
122. Циклы атомных электростанций.
123. Бинарные циклы.
124. Циклы парогазовых установок.
125. Циклы установок с магнетогидродинамическими генераторами.
126. Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок. Анализ обратимых циклов.
127. Внутренний относительный КПД паровой турбины. Эффективный КПД паротурбинной установки. Анализ необратимых циклов методом КПД.
128. Энтропийный метод анализа эффективности необратимых циклов.
129. Работоспособность термодинамической системы. Эксергетический метод анализа эффективности циклов.
130. Основные понятия о работе холодильных установок. Обратный цикл Карно.
131. Цикл воздушной холодильной установки.
132. Цикл паровой компрессорной холодильной установки.
133. Циклы парожеткторных и абсорбционных холодильных установок.
134. Тепловой насос.
135. Влажный воздух. Основные понятия и определения.
136.  $I, d$ - диаграмма влажного воздуха.
137. Химическая термодинамика. Закон Гесса и его следствия.
138. Тепловой закон Нернста.

### Образцы экзаменационных билетов

*I семестр*

## АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры		Кафедра энергетики
ки		
от	протокол №	Факультет энергетический
Зав. кафедрой	Н.В. Савина	Курс второй
		Специальность
140101		
УТВЕРЖДАЮ		Дисциплина
		Термодинамика

### Билет № 4

1. Первый закон термодинамики для неподвижного газа. Энтальпия, ее свойства.
2. Цикл ГТУ со ступенчатым сжиганием топлива и ступенчатым расширением.

### 3. Задача

Определить скорость истечения, конечные параметры и массовый расход углекислого газа через суживающееся сопло с диаметром выходного отверстия  $d_2 = 8 \text{ мм}$ , если начальные параметры его  $p_1 = 8 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 30^\circ \text{C}$ , а давление среды, в которую происходит истечение,  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Потерями, теплообменом со стенками и начальной скоростью газа пренебречь.

### 2 семестр

## АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры		Кафедра энергетики
ки		
от	протокол №	Факультет энергетический
Зав. кафедрой	Н.В. Савина	Курс второй
		Специальность
140101		
УТВЕРЖДАЮ		Дисциплина
		Термодинамика

### Билет № 5

1. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара (изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный).

## 2. Цикл ПСУ со вторичным перегревом пара.

### 3. Задача

Холодопроизводительность парокомпрессионной холодильной установки с редуционным вентилем, работающей на фреоне-12, составляет  $140 \text{ кДж/с}$ . Установка работает в интервале температур от  $t_1 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , пар фреона-12 выходит из компрессора сухим насыщенным. Рассчитать идеальный цикл установки, определив удельную холодопроизводительность фреона-12, холодильный коэффициент цикла, а также расход хладагента и теоретическую мощность привода компрессора.

### ***Контроль остаточных знаний***

#### Тестовые задания для проверки остаточных знаний

по дисциплине «Термодинамика» для специальности 140101

20 заданий

время тестирования 40 минут

*Инструкция:* При ответе следует выбрать один ответ из предложенных (задания 8, 10 содержат несколько правильных ответов). Ответ на задания 15,16, 20,21 следует проиллюстрировать на диаграмме.

Результаты тестирования оценивают по 4-х балльной шкале (*отлично* – не менее 85 % правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 70 % правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50 % правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50 % правильно выполненных заданий)

1. Термодинамическая система, которая не обменивается с окружающей средой веществом, называется:

- а) открытой;                                      б) закрытой;                                      в) замкнутой.

2. Если известны вакууметрическое и атмосферное давления, то абсолютное давление можно определить:

а)  $P_{абс} = P_{вак} - P_{атм}$  ;

б)  $P_{абс} = P_{атм} - P_{вак}$  ;

в)  $P_{абс} = P_{вак} + P_{атм}$  .

3. Какое утверждение является верным, что это означает?

- а) внутренняя энергия является функцией процесса;  
б) внутренняя энергия является функцией состояния.

4. На рис. 1 укажите процессы, в которых работа:

- а) положительна;                              б) равна нулю.

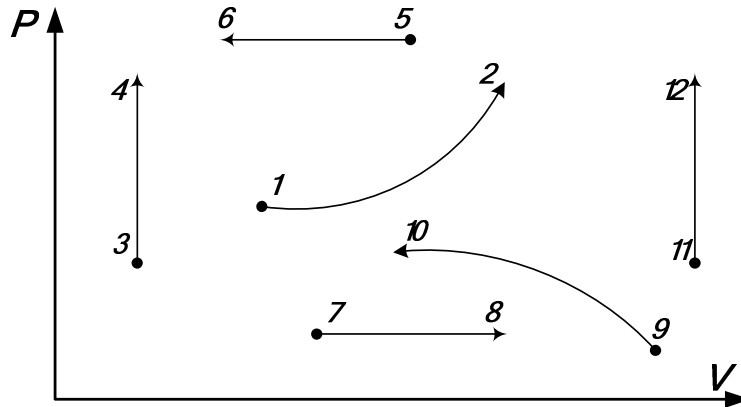


Рис. 1

5. В изохорном процессе и при постоянной теплоемкости количество теплоты определяется:
- а)  $q_V = c_V(t_2 - t_1)$ ;      б)  $q_V = c_n(t_2 - t_1)$ ;      в)  $q_V = c_p(t_2 - t_1)$ .
6. Первый закон термодинамики для изотермического процесса записывается:
- а)  $Q = \Delta U + L$ ;      б)  $Q = L$ ;      в)  $Q = \Delta U$ ;      г)  $\Delta U = -L$ .
7. В цикле теплового двигателя рабочим телом совершается работа, равная 250 кДж, термический КПД – 42 %. Количество теплоты, отведенное в цикле:
- а) 595 кДж;      б) 105 кДж;      в) 345 кДж.
8. Многоступенчатое сжатие в компрессоре осуществляют с целью:
- а) уменьшения общей работы, затрачиваемой на сжатие;
- б) повышения конечной температуры сжатия;
- в) понижения конечной температуры сжатия;
- г) уменьшения габаритов компрессора.
9. На рис. 2 изображен цикл:
- а) газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном давлении;
- б) двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном давлении;
- в) двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном объеме;
- г) газотурбинной установки с подводом тепла при постоянном объеме;
- д) двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом тепла.

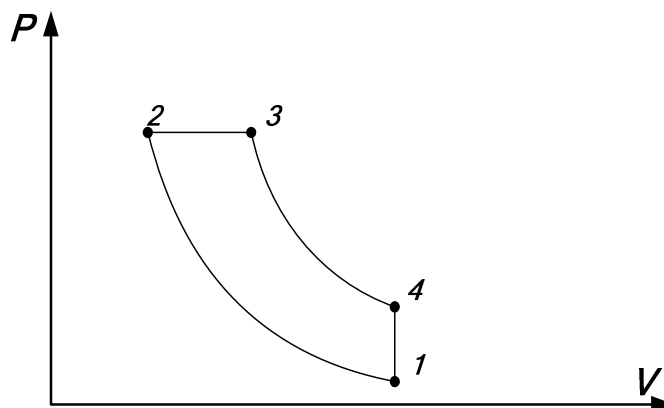


Рис. 2



10. Укажите, в каких процессах (рис. 2) осуществляется:  
 а) адиабатное сжатие рабочего тела; б) отвод тепла.
11. При истечении газа через сопло режим истечения зависит от:  
 а) формы сопла; б) свойств газа; в) начальных параметров газа;  
 г) конечной температуры; д) атомности газа; е) конечного давления.
12. Определите теоретический массовый расход при истечении газа из сопла, если действительный расход равен  $3,2 \cdot 10^{-3}$  кг/с, а коэффициент расхода  $\mu = 0,9$ .
13. В цикле двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном давлении (цикл Дизеля) в такте сжатия рабочим телом является:  
 а) смесь паров топлива с воздухом; б) чистый воздух.
14. Для циклов ДВС при одинаковых наивысших температурах цикла справедливо следующее соотношение:  
 а)  $\eta_t^{Диз} > \eta_t^{смеш} > \eta_t^{Отто}$ ; б)  $\eta_t^{Диз} < \eta_t^{смеш} < \eta_t^{Отто}$ .
15. Замкнутый цикл газотурбинной установки позволяет:  
 а) использовать начальное давление, значительно меньшее, чем атмосферное;  
 б) применять рабочее тело, имеющее максимальное значение показателя адиабаты; в) использовать теплоту отработавших газов.
16. Укажите на  $p, v$ -диаграмме (рис. 3) область влажного насыщенного пара, область перегретого пара, кривую, где жидкость находится в кипящем состоянии, и кривую, где тело находится в состоянии сухого насыщенного пара.

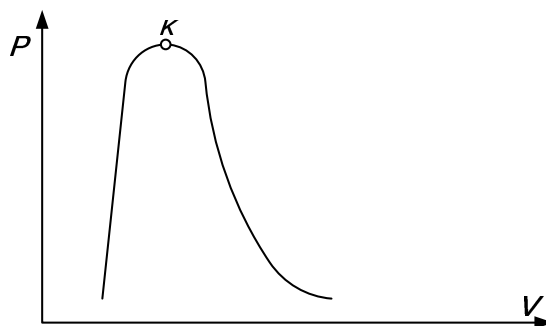


Рис. 3

17. На рис. 4 в  $T, s$ -диаграмме изображен цикл:  
 а) Карно; б) Ренкина; в) Ренкина на перегретом паре.

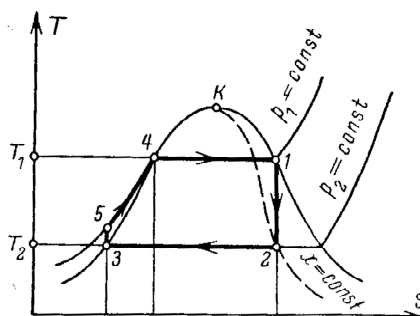


Рис. 4

18. Укажите на рис. 4 процессы, в которых происходит:

- а) нагрев рабочего тела в котле до состояния сухого насыщенного пара;
- б) отвод тепла в конденсаторе.

19. Внутренний относительный КПД цикла паротурбинной установки учитывает потери в:

- а) паропроводе; б) конденсаторе; в) электрогенераторе; г) происходящие в турбине, вследствие необратимости; д) происходящие в насосе, вследствие необратимости;

20. Наибольшие потери тепла в цикле Ренкина имеют место в:

- а) котлоагрегате; б) паропроводе; в) турбине; г) конденсаторе.

21. Цикл с промежуточным перегревом пара осуществляется для ... и заключается в том, что ...

22. На рис. 5 изображена схема холодильной установки:

- а) воздушной; б) парокомпрессионной.

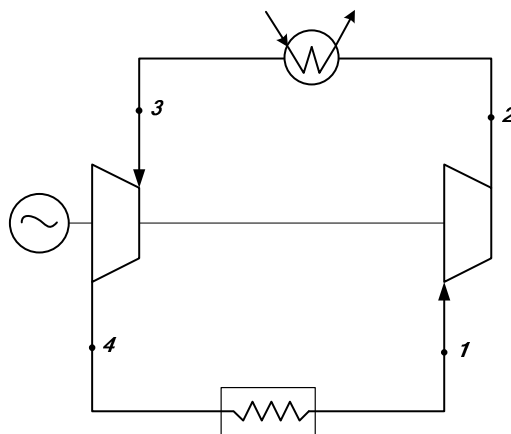


Рис. 5

23. Укажите основные элементы данной схемы

- 1 –
- 2 –
- 3 –
- 4 –

24. Укажите соответствующее данной схеме изображение цикла в  $T,s$ -диаграмме и расставьте характерные точки.