

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего про-  
фессионального образования  
«Казанский государственный технологический университет»**

**Теплотехника.  
Техническая термодинамика.  
Теплопередача.**

**(Методические указания)**

Составители: ст.преп. И.З.Вафин,  
доц. М.С.Курбангалеев,  
доц. А.А.Мухамадиев,  
доц. И.Х.Хайруллин

Теплотехника. Техническая термодинамика. Теплопередача. Ме-  
тод. указания/ Казан. гос. технол. ун-т; Сост. И.З.Вафин,  
М.С.Курбангалеев, А.А.Мухамадиев, И.Х.Хайруллин. Казань, 2006.  
54 с.

Содержат контрольные задания и тематику теоретических раз-  
делов рабочих программ по дисциплинам: «Теплотехника», «Техни-  
ческая термодинамика», «Теплопередача».

Составлены с учетом требований ГОС ВПО второго поколения  
(2000 г.) по направлениям подготовки дипломированных специали-  
стов: 651100, 655400, 655800, 656300, 657300, 657400.

Представлена необходимая справочная информация – таблицы  
термодинамических и теплофизических свойств газов и жидкостей и  
соответствующие диаграммы.

Предназначены для студентов заочной формы обучения меха-  
нического профиля.

Имеется электронная версия пособия, помещенная на сайте  
КГТУ ([www.kstu.ru](http://www.kstu.ru))

Подготовлены на кафедре «Теоретические основы теплотехни-  
ки».

Печатаются по решению методической комиссии института  
химического и нефтяного машиностроения.

Рецензенты: доц. П.И.Бударин,  
доц. Д.И.Сагдеев

Казань 2006

Дисциплина «Теплотехника» относится к блоку общепрофессиональных дисциплин (ОПД), которая изучает способы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, принципы работы тепловых и холодильных машин, тепло- и парогенераторов и теплообменных аппаратов.

Теоретическими основами теплотехники являются техническая термодинамика и теория тепло- и массообмена, или теплопередача.

Термодинамика – наука о закономерностях превращения энергии. Ее основы заложены в XIX в., когда в связи с развитием тепловых двигателей возникла необходимость изучения закономерностей превращения теплоты в работу. В основу термодинамики положены два основных закона, установленных опытным путем. Первый закон термодинамики характеризует количественную сторону процессов превращения энергии, а второй закон устанавливает качественную сторону (направленность) процессов, происходящих в физических системах.

Теплопередача – учение о процессах распространения тепла, осуществляемого тремя различными элементарными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Часто процессы теплообмена происходят между различными средами, разделенными твердой стенкой. Процесс передачи тепла от горячей среды к холодной через разделяющую их стенку называется теплопередачей. Процесс теплопередачи осуществляется различными способами теплопереноса, протекающими одновременно.

Основная задача изучаемого курса – дать необходимую теплотехническую подготовку будущему инженеру, который должен уметь грамотно и эффективно использовать тепловое оборудование, применяемое в данной отрасли, совершенствовать его, выявлять и использовать вторичные энергоресурсы (ВЭР).

## Теплотехника

### 1. Техническая термодинамика

Энергетика и её значение в народном хозяйстве. Тепловые установки и их роль в энергетике страны. Топливные ресурсы России как база отечественной теплоэнергетики. Атомная энергетика и перспективы её развития.

#### 1.1. Основные понятия и определения

Предмет, задачи и метод термодинамики. Термодинамическая система (закрытая и открытая). Рабочее тело (идеальный газ и реальные газы). Термодинамические параметры состояния, термодинамический процесс. Равновесный параметр, равновесный процесс.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Чем отличается идеальный газ от реальных газов?
2. Размерности термодинамических параметров  $p$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $u$ ,  $h$ ,  $s$  и их физический смысл.

#### 1.2. Идеальный газ

Уравнение состояния идеального газа. Газовая постоянная. Универсальная газовая постоянная. Смеси идеальных газов. Способы задания состава газовых смесей. Определение средней (кажущейся) молекулярной массы газовой постоянной смеси и парциального давления её компонентов.

Уравнения состояния реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Приведенные уравнения состояния реальных газов.  $z$ - $p$ -диаграмма. Элементы теории ассоциации. Вириальные коэффициенты и их физическое содержание.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Уравнение состояния идеального газа (Клапейрона-Менделеева).
2. Уравнение состояния реальных газов.

3. *Определение газовой постоянной  $R$ , газовых смесей  $R_{см}$ . Универсальная газовая постоянная  $\mu R$ . Размерности.*

### 1.2.1. Первый закон термодинамики

Закон сохранения и превращения энергии. Теплота и работа как различные формы передачи энергии. Понятие о внутренней энергии.

Аналитическое выражение работы в процессе.  $pV$ -диаграмма и её свойства.

Аналитические выражения и формулировки Первого закона термодинамики.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Что такое теплота, работа, внутренняя энергия?*
2. *Первый закон термодинамики, формулировка. Аналитические выражения Первого закона термодинамики.*
3. *Аналитическое выражение работы. Представление работы в  $pV$ -диаграмме.*

### 1.2.2. Теплоемкость газов

Физическая сущность теплоемкости. Удельные теплоемкости, их размерности.

Температурная зависимость теплоемкости. Средняя и истинная теплоемкости.

Элементы молекулярно-кинетической теории теплоемкости идеальных газов. Зависимость теплоемкости от характера процесса подвода тепла. Изохорная и изобарная теплоемкости. Уравнение Майера.

Теплоемкость смеси идеальных газов.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Массовая, объемная и мольная удельные теплоемкости и их размерности.*
2. *Определение средних теплоемкостей.*
3. *Теплоемкость смеси идеальных газов.*

### 1.2.3. Термодинамические процессы изменения состояния идеального газа

Изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный и политропный процессы. Уравнение процессов. Теплота и работа в процессах. Изображение процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Свойство  $Ts$ -диаграмма.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Уравнение изохорного ( $v=const$ ), изобарного ( $p=const$ ), изотермического ( $T=const$ ), адиабатного ( $dq=0$ ) и политропного процессов и их изображение на  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.*
2. *Расчетные соотношения для определения  $q$ ,  $l$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  и  $\Delta s$  в этих процессах.*

### 1.2.4. Второй закон термодинамики

Несимметричность взаимопревращения теплоты и работы. Принцип работы периодически действующей тепловой установки. Выводы (постулаты) Карно об условиях преобразования теплоты в работу. Круговые термодинамические процессы или циклы. Прямой и обратный циклы. Термический коэффициент полезного действия (к.п.д.).

Обратимый цикл Карно и его к.п.д. Условия проведения обратимых циклов. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно.

Необратимый цикл Карно и его к.п.д. Сущность Второго закона термодинамики и его формулировки.

Общие математические свойства произвольных обратимых и необратимых циклов. Аналитическое выражение Второго закона термодинамики – интегралы Клаузиуса.

Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах. Статистическое толкование Второго закона термодинамики, физический смысл энтропии.

Понятие о качестве энергии. Потеря работоспособности вследствие необратимости. Максимальная работа и понятие об эксергии. Выражение Первого и Второго законов термодинамики с использованием эксергии. Эксергетический к.п.д.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Основные постулаты Карно. Формулировка Второго закона термодинамики Карно.
2. Понятие о круговых процессах – циклах. Термический к.п.д. цикла.
3. Обратимый цикл Карно и его к.п.д. Необратимый цикл Карно и его к.п.д.
4. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.
5. Что такое эксергия? Понятие о качестве энергии.

### 1.2.5. Дифференциальные уравнения термодинамики

Значение дифференциальных уравнений термодинамики. Дифференциальное уравнение состояния. Дифференциальные выражения для теплоты, внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Дифференциальные соотношения для теплоемкостей. Применение дифференциальных уравнений к идеальным газам.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Понятие о термических и калорических параметрах.
2. Понятие о коэффициентах изобарного расширения, изохорной упругости и изотермической сжимаемости.

## 1.3. Реальные газы

### 1.3.1. Водяной пар, состояния и параметры

Опыт Эндрюса. Процессы парообразования в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах. Термодинамические параметры кипящей жидкости, влажного и сухого насыщенного пара. Теплота парообразования. Параметры перегретого пара. Таблицы термодинамических свойств водяного пара (ТСВП) на линии насыщения и перегретого пара.

$h$ - $s$ -диаграмма водяного пара. Расчет теплоты и работы в основных термодинамических процессах с помощью  $h$ - $s$ -диаграммы и таблиц ТСВП.

*Вопросы для самоконтроля:*

1.  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммы водяного пара. Состояние водяного пара. Сухой насыщенный пар, влажный насыщенный пар, кипящая жидкость и перегретый пар.
2. Таблицы термодинамических свойств водяного пара.
3.  $h$ - $s$ -диаграмма. Основные термодинамические процессы с водяным паром. Расчет  $q$ ,  $l$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta h$  и  $\Delta s$  по  $h$ - $s$ -диаграмме.

### 1.3.2. Влажный воздух

Определение влажного воздуха. Абсолютная и относительная влажности воздуха, влагосодержание. Психрометр. Температура точки росы. Определение энтальпии и влагосодержания влажного воздуха по  $h$ - $d$ -диаграмме, сушка воздухом.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Относительная влажность и влагосодержание воздуха.
2. Температура точки росы.
3.  $h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха.
4. Сушка воздухом влажных материалов.

## 1.4. Сжатие газов в компрессорах

Назначение и классификация компрессоров. Принцип работы компрессора. Работа идеального одноступенчатого поршневого компрессора и изображение ее в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие. Многоступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением. Определение мощности, затрачиваемой на привод компрессора.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Работа одноступенчатого идеального поршневого компрессора.

2. *Многоступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением.*

## **1.5. Термодинамика открытых систем**

### **1.5.1. Течение идеальных и реальных газов**

Уравнение Первого закона термодинамики для движущегося газа – потока. Адиабатное истечение из сосуда неограниченных размеров. Скорость истечения. Критическое отношение давлений. Расчет скорости истечения и секундного массового расхода для критического режима.

Воздействие на поток геометрии канала. Сопло, диффузор. Сопло Лаваля.

Скорость истечения водяного пара. Влияние потерь на скорость истечения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Уравнение Первого закона термодинамики для газового потока.*
2. *Истечение газа из сосуда. Скорость истечения и секундный расход.*
3. *Воздействие на параметры потока геометрии канала. Сопло. Диффузор.*

### **1.5.2. Дросселирование газов и паров**

Изменение параметров рабочего тела при дросселировании. Понятие об эффекте Джоуля-Томсона. Температура инверсии, кривая инверсии. Техническое применение процесса дросселирования. Условное изображение процесса дросселирования водяного пара в  $hs$ -диаграмме. Потеря работоспособности водяного пара при дросселировании.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Дросселирование газов и паров. Эффект Джоуля-Томсона.*

2. *Характер изменения температуры газов при дросселировании.*

## **1.6. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)**

Изображение циклов ДВС в  $pV$  – и  $Ts$ -диаграммах. Анализ и сравнение поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v=const$ ,  $p=const$  и смешанным подводом теплоты. Определение термического к.п.д. циклов и влияние параметров цикла ДВС на величину к.п.д.

Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Преимущества ГТУ по сравнению с поршневыми ДВС. Изображение циклов ГТУ в  $pV$  – и  $Ts$ -диаграммах. Анализ цикла ГТУ с подводом теплоты при  $p=const$  и регенеративного цикла. Определение термического к.п.д. и методы его повышения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Преобразование тепловой энергии в механическую.*
2. *Циклы ДВС с подводом тепла при  $v=const$ ,  $p=const$  и смешанным подводом тепла.*
3. *Циклы ГТУ. Преимущества перед поршневым ДВС.*

## **1.7. Циклы паросиловых установок (ПСУ)**

Цикл Карно и его недостатки. Основной цикл ПСУ – цикл Ренкина. Принципиальная схема ПСУ. Изображение идеального цикла Ренкина в  $pV$ -,  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах. Определение термического к.п.д. цикла Ренкина. Способы повышения экономичности ПСУ. Цикл с вторичным перегревом пара, регенеративный цикл и парогазовые циклы. Основы теплофикации. Понятие о внутреннем, относительном и эффективном к.п.д. ПСУ.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. *Циклы паросиловых установок. Циклы Карно и Ренкина. Их достоинства и недостатки.*
2. *Способы повышения к.п.д. циклов ПСУ.*

## 1.8. Циклы холодильных машин

Обратные циклы. Принципы работы холодильных установок и тепловых насосов. Понятия о холодильном коэффициенте и холодопроизводительности. Циклы воздушной холодильной машины и абсорбционной холодильной установки.

Цикл паровой компрессионной холодильной установки, принципиальная схема и изображение цикла в  $p\nu$ -,  $Ts$ -диаграммах.

Принципиальная схема работы «теплового насоса». Понятие о коэффициенте трансформации. Использование тепловых насосов для утилизации тепловых вторичных энергоресурсов (ВЭР).

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Принцип работы холодильных установок. Холодильный коэффициент.
2. Принцип работы «теплового насоса». Коэффициент трансформации.

## 1.9. Парогенерирующие устройства – котельные установки, схемы

Паровой котел и вспомогательное оборудование (топка, барабан, пароперегреватель, экономайзер, воздухоподогреватель).

Понятие о топливе, виды топлива. Состав топлива. Теплота сгорания. Условное топливо. Характеристика твердого, жидкого и газообразного топлив. Проблема экономии топлива.

Основы теории горения топлива. Определение теоретически необходимого количества воздуха. Стехиометрические уравнения химических реакций. Коэффициент избытка воздуха. Определение объема продуктов сгорания. Теоретическая температура продуктов сгорания.  $Ht$ -диаграмма продуктов сгорания.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Котельные установки. Назначение топki, барабана пароперегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя.

2. Состав топлива. Теплота сгорания.
3. Основы теории горения. Химические реакции горения. Расход воздуха на горение.

## 1.10. Термодинамика необратимых процессов

Предмет и метод термодинамически необратимых процессов. Основные феноменологические соотношения. Уравнение Гиббса. Поток энтропии. Обобщенные потоки и обобщенные силы. Скорость изменения энергии Гиббса и энергии Гельмгольца. Минимум производства энтропии в стационарном состоянии. Феноменологические соотношения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Понятие о равновесных и неравновесных, обратимых и необратимых процессах.
2. Понятие об энтропии, как термодинамическом параметре, характеризующем протекание необратимых процессов (переноса теплоты, массы, количества движения).

## 1.11. Вторичные энергоресурсы (ВЭР)

Виды ВЭР. Источники ВЭР. Экономическая эффективность использования ВЭР. Утилизационные установки, котлы утилизаторы. Методы утилизации низкопотенциальных ВЭР. Принципы экономии энергоресурсов.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Понятие ВЭР. Виды ВЭР.
2. Методы утилизации ВЭР. Котлы-утилизаторы.

## 2. Теория теплообмена

Роль процессов переноса теплоты и массы. Понятия о теплопроводности, конвективном теплообмене, теплообмене излучением. Понятие о массообмене.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Теплопроводность, физическая сущность и механизм переноса теплоты в жидкостях и газах, в твердых телах и металлах.
2. Конвективный перенос тепла, механизм
3. Перенос теплоты излучением, механизм.
4. Физическая сущность и механизм массообменных процессов.

## **2.1. Теплопроводность**

Основные понятия: температурное поле, температурный градиент, тепловой поток, плотность теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности: геометрические, физические, временные и граничные условия I, II и III рода.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Закон теплопроводности Фурье. Физическое содержание и размерности величин, входящих в закон Фурье.
2. Коэффициент теплопроводности жидкостей и газов, металлов и изоляционных материалов.

**2.1.1. Стационарная теплопроводность:** через одно- и многослойную плоские стенки, через одно- и многослойную цилиндрические стенки (при граничных условиях I рода).

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Уравнения теплопроводности через плоские и цилиндрические стенки. Однослойная стенка.
2. Уравнения теплопроводности через многослойные плоские и цилиндрические стенки.

## **2.2. Конвективный теплообмен**

Основные факторы, определяющие интенсивность конвективного теплообмена. Закон Ньютона-Рихмана.

Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена. Условия однозначности.

Основы теории подобия. Масштабные преобразования. Дифференциальные уравнения в безразмерном виде. Числа подобия. Теоремы подобия. Уравнения подобия. Моделирование.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Коэффициент теплоотдачи, его зависимость от параметров процесса.
2. Что характеризуют числа подобия?
3. Обобщение опытных данных, установление явного вида зависимости между числами подобия. Уравнение подобия.
4. Выбор уравнений подобия при расчете коэффициента теплоотдачи.

### **2.2.1. Теплоотдача при свободном движении среды вдоль вертикальной плоской стенки**

Ламинарный и турбулентный режимы движения среды. Расчетные соотношения. Теплоотдача при вынужденном движении среды вдоль плоской стенки. Ламинарный и турбулентный режимы движения среды. Расчетные соотношения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Понятия о тепловом и гидродинамическом пограничных слоях. Их роль в процессе теплообмена.
2. Влияние режимов движения среды на теплообмен.

### **2.2.2. Теплоотдача при вынужденном движении среды в каналах цилиндрической формы (в трубах)**

Ламинарный, переходный и турбулентный режимы движения. Расчетные соотношения.

Теплоотдача при поперечном омывании одиночной трубы и пучков труб. Расчетные соотношения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от характера формирования пограничного слоя.

### **2.2.3. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества. Кипение. Конденсация**

Механизм процесса кипения, условия зарождения паровых пузырьков и их влияние на интенсивность теплообмена. Режимы кипения (пузырьковый, пленочный). Расчетные соотношения для определения для расчета коэффициента теплоотдачи.

Теплоотдача при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Факторы, определяющие интенсивность теплообмена при конденсации. Расчет коэффициентов теплоотдачи.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Роль паровых пузырьков в интенсивности теплоотдачи при кипении.
2. Влияние пленки конденсата на интенсивность теплоотдачи при конденсации.
3. Влияние неконденсирующегося газа на теплообмен.

### **2.3. Теплообмен излучением**

Основные законы черного излучения. Степень черноты.

Теплообмен излучением между плоскопараллельными твердыми стенками.

Снижение тепловых потерь излучением. Свойство экранов.

Теплообмен излучением между твердыми телами произвольной формы. Особенности теплового излучения газов.

Теплообмен излучением в котельных топках. Расчетные соотношения.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Понятия о собственном, эффективном и результирующем излучении.
2. Теплообмен излучением между телами.

### **2.4. Теплопередача**

Теплопередача через одно- и многослойную плоские стенки.

Теплопередача через плоские и цилиндрические стенки (при граничных условиях III рода).

Критический диаметр изоляции цилиндрической стенки.

Интенсификация теплопередачи.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Основное уравнение теплопередачи. Коэффициент теплопередачи.
2. Уравнения теплопередачи через плоские и цилиндрические стенки.
3. Тепловая изоляция труб.
4. Интенсификация теплопередачи оребрением.

### **2.5. Теплообменные аппараты**

Классификация. Основные уравнения теплового расчета теплообменных аппаратов. Средняя разность температур между теплоносителями.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Уравнение теплового баланса.
2. Уравнение теплопередачи.
3. Понятие о поверочном и проектном тепловых расчетах теплообменных аппаратов.

### **2.6. Основы массообмена**

Определение потоков массы и энергии. Уравнения переноса, коэффициенты переноса. Аналогия процессов переноса.

Концентрационная диффузия. Термо- и бародиффузия. Конвективная диффузия. Дифференциальные уравнения тепло-массообмена. Диффузионные числа подобия. Уравнения подобия массообменных процессов. Массообменные аппараты.

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Аналогия процессов переноса теплоты, массы, количества движения.
2. Движущая сила массообменных процессов.
3. Числа подобия и уравнения подобия массообменных процессов.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Количество контрольных работ, выполняемых заданий и набор задач выбираются из приложения (таблица П1) в соответствии с требованиями ГОС направления обучения. В той же таблице указаны разделы учебной программы для самостоятельной проработки.

Варианты условий задач определяются по двум последним цифрам шифра (номера зачетной книжки). Работы, выполненные не по своему варианту, рассматриваться не будут.

При выполнении контрольных работ необходимо:

- выписать условие задачи;
- решение сопровождать краткими пояснениями, в которых показать, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (например, из условия задачи, из справочника, определены ранее);
- проставить размерности (в системе СИ (SI – system international));
- задачи сопровождать соответствующими схемами или диаграммами;
- сформулировать краткие выводы по результатам расчетов.

Выполненные задания должны быть сданы на проверку до начала сессии.

Контрольная работа принимается, если она не содержит ошибок принципиального характера, и защищается при личной беседе с преподавателем. Если работа выполнена неверно, она возвращается с указаниями для исправления. Не разрешается вносить исправления в первоначальный текст. Новое решение прилагается к выполненному ранее.

## Контрольное задание № 1–ТД

### Задача № ТД – 1

Определить газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу, плотность и удельный объем при нормальных условиях для смеси идеальных газов, объемное содержание которых задано.

Найти также средние массовые теплоемкости этой смеси при постоянном давлении  $p_1$  в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  и определить количество теплоты для изобарного нагревания  $m$  кг газовой смеси от  $t_1$  до  $t_2$ , если задан общий начальный объем этой смеси  $V_{см}$ . Данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	$p_1$ , бар	$V_{см}$ , м <sup>3</sup>	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	Предпоследняя цифра шифра	Объемный состав газовой смеси			
						N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	1	50	100	500	0	70	20	10	
1	3	60	200	600	1	70		10	20
2	5	70	300	700	2	60	10		30
3	7	80	400	600	3	50		10	40
4	9	90	100	400	4	40	5		55
5	2	40	200	500	5	30	20		50
6	4	30	300	600	6	20	10		70
7	6	20	400	700	7	50		5	45
8	8	10	100	500	8	45	5	50	
9	10	100	200	600	9	10		20	70

Задачу следует решать с учетом нелинейной зависимости теплоемкости газов от температуры  $c = f(T)$ . Значения  $c_m$  приведены в приложении (табл.П.1).

Напоминаем, что  $c'_{см} = \sum r_i c'_i$ ,

$$c_{см} = c'_{см} / \rho_{см.(н.у.)}, \quad \rho_{см} = 1/v_{см}, \quad p v_{см} = R_{см} T,$$

$$R_{см} = \mu R / \mu_{см}, \quad \mu R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль К}), \quad \mu_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i,$$

$\rho_{см(н.у.)}$  - плотность смеси при нормальных условиях ( $T_{ну}=273 \text{ К}$ ,  $p_{ну}=1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ )

### Задача № ТД – 2

$m$  кг газа расширяется политропно с показателем политропы  $n$  от начального состояния с параметрами  $p_1$  и  $t_1$  до конечного давления  $p_2$ . Определить теплоту  $Q$ , работу  $L$ , изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , энтальпии  $\Delta H$  и энтропии  $\Delta S$ . Считать, что  $c = const$ .

Изобразить процесс на  $p\nu$ -диаграмме без соблюдения масштаба. Данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Последняя цифра шифра	Газ	$m$ , кг	$n$	Предпоследняя цифра шифра	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$p_2$ , МПа
0	$N_2$	10	1,0	0	0,2	10	0,8
1	$O_2$	20	1,1	1	0,4	15	2,0
2	$H_2$	30	1,2	2	0,6	20	3,0
3	$CO_2$	40	1,3	3	0,8	25	6,4
4	$N_2$	50	1,4	4	1,0	30	8,0
5	$O_2$	60	1,0	5	1,2	50	12,0
6	$H_2$	70	1,1	6	1,4	70	14,0
7	$CO_2$	80	1,2	7	1,6	100	16,0
8	$N_2$	90	1,3	8	1,8	120	18,0
9	$O_2$	100	1,4	9	2,0	140	20,0

### Задача № ТД – 3

Сжатие воздуха в компрессоре происходит: а) по изотерме; б) по адиабате; в) по политропе с показателем  $1 < n < k$ . Мас-

совый расход сжимаемого воздуха  $\dot{m}$ , кг/с, начальное давление  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , начальная температура  $t_1$ , конечное давление  $p_2$ .

Определить величины работ сжатия, теоретическую работу компрессора и мощность привода компрессора ( $N = l_{компр} \dot{m}$ , кВт).

Изобразить процессы на  $p\nu$ -диаграмме. Объяснить полученные результаты расчетов.

Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	$n$	$\dot{m}$ , кг/с	Предпоследняя цифра шифра	$t_1$ , °C	$p_2$ , МПа
0	1,1	5	0	10	0,5
1	1,15	10	1	15	0,6
2	1,2	15	2	20	0,7
3	1,25	20	3	25	0,8
4	1,3	25	4	30	0,9
5	1,1	30	5	40	1,0
6	1,15	35	6	50	0,5
7	1,2	40	7	60	0,6
8	1,25	45	8	70	0,7
9	1,3	50	9	80	0,8

Напоминаем, что  $l_{компр} = l_{вс} + l_{сж} + l_{нагн}$ .

### Задача № ТД – 4

Водяной пар при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  дросселируется до давления  $p_2$ . Определить неизвестные параметры пара  $h$ ,  $\nu$ ,  $s$  в начале и в конце дросселирования и потерю работоспособности  $D_h = T_0 \cdot \Delta s$ .

Принять температуру окружающей среды равной  $t_0$ . Изобразить процессы на  $hs$ -диаграмме (см. в приложении).

Данные для расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{МПа}$	Предпоследняя цифра шифра	$p_2, \text{МПа}$	$t_0, ^\circ\text{C}$
0	700	50	0	0,5	10
1	600	30	1	0,3	15
2	500	20	2	0,2	20
3	400	10	3	0,1	25
4	300	5	4	0,05	30
5	650	50	5	0,5	10
6	550	30	6	0,3	15
7	450	20	7	0,2	20
8	350	10	8	0,1	25
9	500	30	9	0,3	30

**Задача № ТД – 5.**

1 кг воздуха совершает работу в обратимом цикле Карно при температурах верхнего  $t_I$  и нижнего  $t_{II}$  источника тепла. Наивысшее давление составляет  $p_1$ , а наинизшее –  $p_3$ . Определить параметры в характерных точках цикла, работу цикла  $l_{ц}$ , количество подведенной  $q_1$  и отведенной  $q_2$  теплоты и термический к.п.д.  $\eta_t$  цикла. Показатель адиабаты для воздуха принять равным  $k=1,41$ . Изобразить цикл на  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Данные для расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	$t_I, ^\circ\text{C}$	$t_{II}, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	$p_1, \text{МПа}$	$p_3, \text{МПа}$
1	2	3	4	5	6
0	600	250	0	5	0,10
1	700	240	1	6	0,11
2	800	230	2	7	0,12

3	900	220	3	8	0,13
1	2	3	4	5	6
4	1000	210	4	9	0,12
5	1100	200	5	10	0,11
6	1200	190	6	11	0,10
7	1300	180	7	12	0,12
8	1400	170	8	13	0,11
9	1500	160	9	14	0,10

**Задача № ТД – 6**

Определить холодильный коэффициент  $\varepsilon'$  парокомпрессионной аммиачной холодильной установки (с дросселем), массовый расход аммиака  $\dot{m}$ , кг/с и теоретическую мощность привода компрессора  $N_{компр.}$  по заданным значениям температуры влажного насыщенного пара  $NH_3$  на входе в компрессор  $t_1$  и температуре сухого насыщенного пара за компрессором  $t_2$  и холодопроизводительности установки  $Q$ .

Изобразить схему установки и цикл на  $Ts$ -диаграмме. Данные для расчета приведены в табл. 6.

Таблица 6

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	$Q, \text{кВт}$
0	-10	40	0	150
1	-15	35	1	180
2	-20	30	2	200
3	-25	25	3	220
4	-20	15	4	250
5	-25	20	5	280
6	-20	25	6	300
7	-15	20	7	160
8	-10	25	8	190

9	-15	30	9	200
---	-----	----	---	-----

Напомним:  $\varepsilon' = \frac{q_2}{l_u}$ ,  $q_2 = h_1 - h_4$ ,  $l_u = q_1 - q_2 = h_2 - h_1$ ,

$q_1 = h_2 - h_3 = h_2 - h_4$  (3-4 – процесс дросселирования). При адиабатном сжатии  $s_1 = s_2 = const$ , поэтому степень сухости в т. 1

$$\text{можно рассчитать как } x = \frac{s''(t_2) - s'(t_1)}{s''(t_1) - s'(t_1)},$$

где  $s(t)$  – соответственно значения энтропии при указанных температурах, из приложения (табл. П2).

### Задача № ТД – 7

Газ в сосуде неограниченного объема имеет постоянные параметры: давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ .

Определить скорость адиабатного истечения и расход, критическую скорость истечения и максимальный расход для простого суживающего сопла, если давление за сужением  $p_2$ . Объяснить полученные результаты. Данные для расчета приведены в табл. 7. Принять площадь сечения устья  $f = 0,001 \text{ м}^2$ .

Таблица 7

Последняя цифра шифра	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	Предпоследняя цифра шифра	$p_2$ , МПа	Газ
0	1,0	300	0	0,1	$N_2$
1	1,2	320	1	0,15	$O_2$
2	1,4	340	2	0,2	$H_2$
3	1,6	360	3	0,25	$CO_2$
4	1,8	380	4	0,3	$N_2$
5	2,0	400	5	0,35	$O_2$
6	2,2	280	6	0,4	$H_2$
7	2,4	260	7	0,45	$CO_2$
8	2,6	240	8	0,5	$N_2$
9	2,8	220	9	0,55	$O_2$

Напомним, что скорость адиабатного истечения в соответствии с уравнением I-го закона термодинамики для движущегося газа

$$\dot{W}_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_1 v_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с, а макси-}$$

мальный расход  $\dot{m} = f \cdot \dot{W}_2 / v_2$ , кг/с.

Физика процессов при истечении такова, что  $\dot{W}_2$  и  $\dot{m}$  не могут превысить определенные критические значения  $\dot{W}_{2кр}$  и  $\dot{m}_{кр}$ .

### Задача № ТД – 8

Сравнить значение термического к.п.д. идеальных циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (д.в.с.) с изобарным (цикл Дизеля) и изохорным (цикл Отто) подводом теплоты, если в начальном состоянии (точка 1) известны давление  $p_1$  и температура  $t_1$ ; степень сжатия  $\varepsilon = v_1 / v_2$  и в каждом из этих циклов подводится  $q_{1x}$  теплоты. Рабочее тело – воздух (считать его идеальным газом, полагая теплоемкость его постоянной).

Рассчитать параметры  $p, v, T, h, u$  в характерных точках цикла циклов, значения  $\Delta h, \Delta u, l, q$  в соответствующих процессах и свести их в таблицы. Определить также  $\eta_t$  цикла Карно, осуществляемого в том же интервале минимальных и максимальных температур  $t_1 - t_4$ , что и данные циклы.

Изобразить циклы д.в.с. в  $p-v$ - и  $Ts$ -диаграммах.

Для решения задачи использовать данные табл. 8.

Таблица 8

Последняя цифра шифра	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$\varepsilon$	Предпоследняя цифра шифра	$q_{1x}$ , кДж/кг
0	0,10	0	6	0	400
1	0,11	5	7	1	450
2	0,12	10	8	2	500
3	0,13	15	9	3	550
4	0,14	20	10	4	600
5	0,10	25	7	5	650
6	0,11	30	8	6	700
7	0,12	35	9	7	750
8	0,13	40	10	8	800
9	0,14	45	11	9	850

**Задача № ТД – 9**

Путем сравнительного расчета показать целесообразность применения пара высоких начальных параметров и низкого конечного давления на примере паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина. Для этого определить предполагаемое теплопадение, термический КПД цикла и удельный расход пара для двух вариантов значений начальных и конечных параметров пара. Указать конечное значение степени сухости  $x_2$  (при давлении  $p_2$ ) на  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах.

Изобразить схему простейшей паросиловой установки и дать краткое описание ее работы. Данные для решения задачи взять из табл. 9.

Таблица 9

Последняя цифра шифра	Параметры пара I варианта			Предпоследняя цифра шифра	Параметры пара II варианта		
	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , кПа		$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , кПа
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,5	250	80	0	8,0	480	3
1	2,0	300	70	1	9,0	480	4

1	2	3	4	5	6	7	8
2	2,5	325	90	2	10,0	500	4
3	2,0	350	100	3	11,0	520	4
4	2,5	375	110	4	12,0	530	5
5	3,0	350	90	5	12,0	540	3
6	3,5	370	80	6	13,0	550	4
7	3,0	400	70	7	14,0	560	4
8	4,0	425	90	8	14,0	580	5
9	4,5	400	100	9	15,0	600	5

**Задача № ТД – 10**

В топке сжигается газообразное топливо заданного состава с объемным расходом  $\dot{V}_{ну}$ . Окислителем является атмосферный воздух. Определить низшую и высшую теплоты сгорания этого топлива, теоретический и действительный объемы воздуха, необходимые для его полного сгорания.

Данные для решения задачи взять из табл. 10а, где  $\dot{V}_{ну}$  – объемный расход при нормальных условиях;  $d_m$ ,  $d_{ок}$  – влажностное содержание топлива и окислителя соответственно (г влаги/нм<sup>3</sup> сух. топлива);  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Низшая теплота сгорания компонентов топлива  $Q_n$  приведена в табл. 10б.

Таблица 10а

Последняя цифра шифра	$\dot{V}_{ну}$ , м <sup>3</sup> /с	$d_m$ , г/нм <sup>3</sup>	$d_{ок}$ , г/нм <sup>3</sup>	$\alpha$	Предпоследняя цифра шифра	$r_i$ , % объемные						
						$CH_4$ метан	$C_2H_6$ этан	$C_3H_8$ пропан	$C_4H_{10}$ бутан	$H_2$ водород	$H_2S$ сероводород	$N_2$ азот
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0,3	12	10	1,15	0	22	14	12	6	28	0,2	17,8
1	0,4	14	12	1,2	1	28	22	10	8	24	0,4	7,8
2	0,5	16	14	1,25	2	32	26	8	6	20	0,6	7,8
3	0,6	18	16	1,3	3	38	30	6	8	14	0,8	3,2

4	0,7	20	18	1,1	4	46	32	4	4	12	1,0	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	0,8	22	20	1,15	5	58	14	10	8	6	0,8	3,2
6	0,9	24	22	1,2	6	68	16	8	6	1	0,6	0,4
7	1,0	26	24	1,25	7	74	10	6	4	2	0,4	3,6
8	1,1	28	26	1,3	8	80	6	4	2	4	0,2	3,8
9	1,2	30	28	1,35	9	84	4	2	2	4	0,6	3,4

Таблица 10б

Газ	$CH_4$ метан	$C_2H_6$ этан	$C_3H_8$ пропан	$C_4H_{10}$ бутан	$H_2$ водород	$H_2S$ се- роро- дород
$Q_{H_2}$ , кДж/нм <sup>3</sup>	35820	63750	91400	118000	10800	23650

## Контрольное задание № 2 –ТП

### Задача № ТП – 1

Определить плотность теплового потока  $\dot{q}$ , передаваемого теплопроводностью:

1. через однослойную плоскую металлическую стенку толщиной  $\delta_c$ ;
2. через двухслойную плоскую стенку: первая стенка покрыта плоским слоем изоляции толщиной  $\delta_u$ .

Температуры внешних поверхностей  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  в обоих случаях одинаковы.

Данные для решения задачи взять из табл. 1.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	Материал стенки	Толщина стенки $\delta_c$ , мм	$t_{c1}$ , °C	$t_{c2}$ , °C	Предпоследняя цифра шифра	Материал изоляции	Толщина изоляции $\delta_u$ , мм
0	Медь	2	190	50	0	Асбест	20
1	Алюминий	3	180	40	1	Накипь	10
2	Сталь	4	170	50	2	Пенопласт	40
3	Нерж. сталь	2	160	60	3	Накипь	10
4	Чугун	5	150	40	4	Резина	50
5	латунь	3	180	50	5	Асбест	10
6	Медь	2	170	60	6	Резина	40
7	Алюминий	3	160	50	7	Накипь	10
8	Сталь	4	150	60	8	Пенопласт	50
9	Чугун	4	140	70	9	Асбест	10

### Задача № ТП – 2

По трубе длиной  $l = 3$  м и внутренним диаметром  $d$ , м движется жидкость со скоростью  $W$ , м/с. Средние по длине температуры стенки трубы  $t_c$ , °С, и жидкости  $t_{жс}$ , °С.

Рассчитать средний коэффициент конвективной теплоотдачи к жидкости или от нее к стенке.

Данные для решения задачи взять из табл. 2.

Таблица 2

Последняя цифра шифра	$d$ , м	$W$ , м/с	Предпоследняя цифра шифра	$t_c$ , °С	$t_{жс}$ , °С	Жидкость
0	0,010	0,1	0	20	120	Транс. масло
1	0,012	0,5	1	30	110	Глицерин
2	0,014	0,8	2	40	100	Вода
3	0,016	1,0	3	50	90	Транс. масло
4	0,018	1,5	4	60	80	Глицерин
5	0,020	2,0	5	70	50	Вода
6	0,013	2,5	6	80	50	Транс. масло
7	0,015	2,0	7	90	40	Глицерин
8	0,017	1,5	8	100	30	Вода
9	0,020	1,0	9	120	20	Транс. масло

### Задача № ТП – 3.

Определить плотность лучистого потока тепла  $\dot{q}_л$  между двумя параллельными плоскостями, имеющими температуры  $t_1$  и  $t_2$  и степени черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Как изменится  $\dot{q}_л$ , если между плоскостями установить тонкий листовой экран со степенью черноты  $\varepsilon_3$ ?

Данные для решения задачи взять из табл. 3.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	Предпоследняя цифра шифра	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С
0	0,62	0,35	0,22	0	380	30
1	0,65	0,42	0,42	1	450	40
2	0,72	0,68	0,16	2	500	50
3	0,75	0,35	0,42	3	550	60
4	0,82	0,65	0,35	4	600	20
5	0,35	0,82	0,15	5	650	70
6	0,42	0,62	0,42	6	700	65
7	0,22	0,32	0,65	7	750	35
8	0,18	0,75	0,45	8	680	75
9	0,88	0,82	0,25	9	570	45

### Задача № ТП – 4

Плоская стальная стенка толщиной  $\delta_c$  омывается с одной стороны горячим газом с температурой  $t_{жс1}$ , а с другой стороны – водой с температурой  $t_{жс2}$ . Определить коэффициент теплопередачи  $k$  от газов к воде, плотность теплового потока и температуру обеих поверхностей стенки, если известны коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке  $\alpha_1$  и от стенки к воде  $\alpha_2$ , а коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_c = 50$  Вт/(м·град). Определить также все указанные выше величины для случая, если стенка, омываемая водой, покрывается слоем накипи толщиной  $\delta_n$ ; коэффициент теплопроводности накипи  $\lambda_n = 0,5$  Вт/(м·град). Показать, как изменится характер зависимости температур от  $t_{жс1}$  до  $t_{жс2}$  по толщине слоя. Объяснить влияние отложения накипи на теплопередачу.

Данные для решения задачи взять из табл. 4.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	$\delta_c$ , мм	$\delta_n$ , мм	$\alpha_1$	$\alpha_2$	Предпоследняя цифра шифра	$t_{ж1}$ , °С	$t_{ж2}$ , °С
			Вт/(м <sup>2</sup> ·град)				
0	14	1,0	32	1200	0	300	50
1	16	1,5	35	1400	1	350	60
2	18	2,0	38	1600	2	400	70
3	20	2,5	40	1800	3	450	80
4	22	3,0	42	2000	4	500	90
5	15	1,0	45	1200	5	300	50
6	17	1,5	50	1400	6	350	60
7	19	2,0	55	1600	7	400	70
8	21	2,5	60	1800	8	450	80
9	23	3,0	65	2000	9	500	90

**Задача № ТП – 5**

Для утилизации теплоты отходящих дымовых газов (вторичных энергоресурсов – ВЭР) используется газотрубный теплообменник, в котором нагревается вода. Температура газов до подогревателя  $t'_1$  и после него  $t''_1$ , температура воды, поступающей в подогреватель  $t'_2$ , а выходящей из него  $t''_2$ . Определить площадь теплопередающей поверхности подогревателя  $F$ , м<sup>2</sup>, при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если расход воды составляет  $\dot{m}$ , кг/с. Коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воде  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup> К).

Изобразить схематично характер изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.

Данные для расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	$t'_1$ , °С	$t''_1$ , °С	$t'_2$ , °С	$t''_2$ , °С	Предпоследняя цифра шифра	$\dot{m}$ , кг/с	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·град)
0	300	150	5	70	0	5	15
1	350	180	10	80	1	10	17
2	400	200	15	90	2	15	19
3	450	220	20	75	3	20	21
4	500	350	25	85	4	25	23
5	250	120	30	95	5	30	25
6	200	100	35	70	6	35	27
7	220	120	40	75	7	40	29
8	240	140	45	80	8	45	31
9	260	160	50	85	9	50	33

**Задача № ТП – 6**

Найти поток массы водяного пара  $\dot{M}$  (кг/с) в процессе высушивания влажного материала поверхностью  $F$  воздухом, движущимся со скоростью  $\dot{W}$  над поверхностью испарения длиной  $l$ .

Данные для решения задачи взять из табл. 6.

Барометрическое давление воздуха принять равным 760 мм рт. ст., коэффициент диффузии водяного пара в воздухе  $D_0=21,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при нормальных условиях. Температура поверхности влажного материала  $t_{вл.м.}=12$  °С, давление насыщения водяного пара при этой температуре  $p_{нас}=2336,8$  Па.

Таблица 6

Последняя цифра шифра	$F$ , м <sup>2</sup>	$\dot{W}$ , м/с	$l$ , м	Предпоследняя цифра шифра	$t_c$ , °С	$t_m$ , °С
0	2.4	1.5	1.2	0	20	15
1	2.6	2.0	1.4	1	22	16
2	2.8	2.5	1.6	2	24	17
3	3.0	3.0	1.8	3	23	18
4	3.2	3.5	2.0	4	25	19
5	3.4	1.5	2.2	5	20	15
6	3.6	2.0	2.4	6	23	16
7	3.8	2.5	2.6	7	22	17
8	4.0	3.0	2.8	8	24	18
9	4.2	3.5	3.0	9	26	19

Напоминаем, что теплообмен вызывается разностью температур, массообмен – разностью концентраций вещества.

Массообмен чаще всего сопровождается теплообменом, например, при испарении жидкости и сушке. Между процессами тепло- и массообмена наблюдается аналогия. Теплопроводности соответствует диффузия, массообмену – конвективный теплообмен.

Поэтому можно дать описание массообменным процессам с помощью аналогичных (диффузионных) чисел подобия. Например, коэффициент массоотдачи  $\beta$  при испарении воды при движении над ее поверхностью воздуха можно рассчитать из уравнения подобия:

$$Nu_{\varnothing} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr_{\varnothing}^{1/3},$$

$Re = \frac{\dot{W} \cdot l}{\nu}$ , где  $\dot{W}$  – скорость воздуха над поверхностью испарения, м/с;  $l$  – длина поверхности в направлении движения воздуха, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$Pr_{\varnothing} = \frac{\nu}{D}$ , где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в воздухе, м<sup>2</sup>/с;

$Nu_{\varnothing} = \frac{\beta \cdot l}{D}$ , где  $\beta$  – коэффициент массообмена, м/с.

Количество переданной массы при сушке можно рассчитать по формуле

$$\dot{M} = \frac{\beta}{R \cdot T} \cdot (p_1 - p_2), \text{ кг/с,}$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – парциальные давления водяного пара над поверхностью испарения и вдали от нее, Па. (В данном случае они пропорциональны концентрациям водяного пара в воздухе). Парциальное давление  $p_2$  определяется по  $Hd$ -диаграмме влажного воздуха (рис.П2) с помощью найденного по табл.П4 значения относительной влажности и температуры воздуха  $t_c$ .

## Курсовая работа

### Тепловой расчет теплообменного аппарата типа «труба в трубе»

В теплообменном аппарате типа «труба в трубе» нагреваемая жидкость – вода с расходом  $\dot{m}_2$ , кг/с, – движется по внутренней трубе 1 (рис. 1), изготовленной из стали ( $\lambda_{cm} = 60$  Вт/(м·К), с наружным диаметром  $d_n$  и толщиной стенки  $\delta_c$ . В межтрубное пространство 2 подается сухой насыщенный пар воды, который конденсируется при температуре  $t_n = const$ . При этом выделяется теплота  $r$  (кДж/кг), которая передается нагреваемой жидкости (воде).

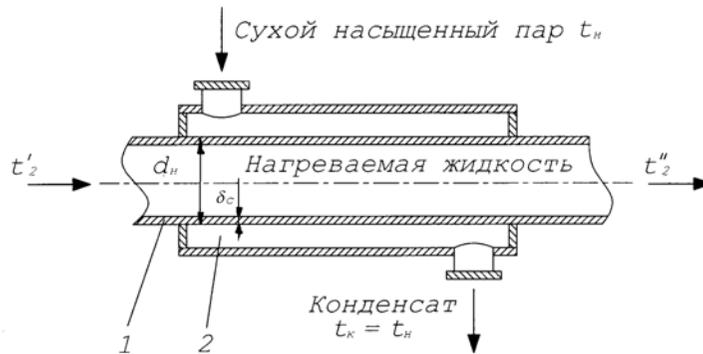


Рис.1

Требуется рассчитать поверхность теплообмена  $F$ , м<sup>2</sup> и расход греющего пара  $\dot{m}_n = \dot{m}_1$ , кг/с, если заданы температуры нагреваемой жидкости на входе  $t'_2$  и выходе  $t''_2$ , °С.

Данные для расчета приведены в табл. 1.

Длину  $l$  или высоту  $H$  секции теплообменника принять равной 2 м.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	$\dot{m}_2$ , кг/с	$d_n \times \delta_c$ , мм·мм	$t_n$ , °С	Пред-последняя цифра шифра	$t'_2$ , °С	$t''_2$ , °С	Расположение теплообменника
0	0,5	40×2	220	0	10	60	Гориз.
1	1,0	50×3	230	1	15	70	Вертик.
2	1,5	60×4	240	2	20	80	Гориз.
3	2,0	40×2	250	3	25	60	Вертик.
4	2,5	50×3	160	4	30	70	Гориз.
5	3,0	60×4	170	5	40	80	Вертик.
6	3,5	40×2	180	6	45	60	Гориз.
7	4,0	50×3	190	7	20	70	Вертик.
8	4,5	60×4	200	8	25	80	Гориз.
9	5,0	40×2	210	9	30	90	Вертик.

Как известно, тепловой расчет теплообменных аппаратов сводится к совместному решению уравнений теплового баланса:

$$\dot{Q}_{подв} = \dot{Q}_{отв} \text{ или } \dot{m}_1(h''_1 - h'_1) = \dot{m}_2 c_2 (t''_2 - t'_2), \quad (1)$$

и теплопередачи:

$$Q = k \cdot \bar{\Delta t} \cdot F, \quad (2)$$

где  $h''_1 - h'_1 = r$  – теплота парообразования (см. табл. 1а), Дж/кг;

$c_2$  – средняя массовая теплоемкость воды, определяется из табл. Пб при средней температуре  $\bar{t}_2 = 0,5(t'_2 + t''_2)$ ;

$k$  – коэффициент теплопередачи через плоскую стенку.

В рассматриваемом теплообменнике с тонкостенными трубами допустим расчет как для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \quad (3)$$

$\overline{\Delta t}$  – средняя разность температур между теплоносителями:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mathcal{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mathcal{M}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{\delta} = t_n - t_2', \quad \Delta t_{\mathcal{M}} = t_n - t_2'' \quad (4)$$

Значение коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке  $\alpha_1$  определяется из уравнения подобия.

Выбор расчетного уравнения при конденсации на вертикальной стенке начинается с установления режима движения пленки конденсата – ламинарного или турбулентного. Характер движения конденсата определяется по значению относительной длины:

$$z_n = H(t_n - \bar{t}_{c_1}) \cdot A_n, \quad (5)$$

где  $A_n = \left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda}{r \cdot \rho \cdot \nu}$ , 1/(м·К) – из табл. 1а – все теплофизические величины в комплексе  $A_n$  относятся к конденсату при  $t_n$ .

При значении  $z_n < 2300$  режим течения конденсата будет ламинарным, и среднее значение коэффициента  $\alpha_1$  можно определить по формуле

$$\text{Re}_n = 3,8 \cdot z_n^{0,78} \left(\text{Pr}_n / \text{Pr}_{c_1}\right)^{0,25}, \quad (6)$$

где  $\text{Re}_n = \alpha_1 \cdot (t_n - t_c) \cdot H \cdot B_n$ ;  $(7)$

$$B_n = \frac{4}{r \cdot \rho \cdot \nu}, \text{ м/Вт} - \text{комплекс теплофизических свойств}$$

конденсата при  $t_n$  – из табл. 1а.

Таблица 1а

$t_n, \text{ } ^\circ\text{C}$	$A_n, \text{ 1/(м К)}$	$B_n, \text{ м/Вт}$	$r, \text{ кДж/кг}$
120	70,3	0,00765	2202,8
130	82	0,00847	2174,3
140	94	0,00929	2145,0
150	107	0,01015	2114,3
160	122	0,01109	2092,6
170	130	0,01204	2049,5
180	150	0,0129	2015,2
190	167	0,01402	1978,8
200	182	0,01505	1940,7
210	197	0,01608	1900,5

При смешанном течении конденсата на вертикальной стенке  $z_n > 2300$ :

$$\text{Re}_n = \left[253 + 0,069(\text{Pr}_n / \text{Pr}_{c_1})^{0,25} \cdot \text{Pr}_n^{0,5} (z_n - 2300)\right]^{1/3}, \quad (8)$$

где  $\text{Pr}_n$  и  $\text{Pr}_{c_1}$  – числа подобия Прандтля – для конденсата рассчитываются при  $t_n$  и  $t_{c_1}$ ;

$t_{c_1}$  – средняя температура стенки со стороны пара – в первом приближении принимается равной  $t_{c_1} = t_n - 0,5(t_n - \bar{t}_2)$ ,  $^\circ\text{C}$ .

При горизонтальном расположении теплообменника ламинарное течение конденсата ( $z_n < 3900$ )

$$\text{Re}_n = 3,25 z_n^{0,75}, \quad (9)$$

где  $\text{Re}_n = \alpha_1 (t_n - t_{c_1}) \pi \cdot R \cdot B_n$ ;  $(10)$

$$R = 0,5 d_n, \text{ м} - \text{радиус трубы, на которой происходит конденса}$$

ция.

Значение коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости (воде)  $\alpha_2$  рассчитывается из уравнений подобия:

– при ламинарном режиме движения ( $Re < 2300$ ):

$$Nu_{жcd} = 0,15 Re_{жcd}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,33} (Gr \cdot Pr)_{жcd}^{0,1} (Pr_{жс} / Pr_{с2})^{0,25}; \quad (11)$$

– при турбулентном режиме движения ( $Re > 10^4$ ):

$$Nu_{жcd} = 0,021 Re_{жcd}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс} / Pr_{с2})^{0,25}; \quad (12)$$

– при переходном режиме ( $2300 < Re < 10^4$ ):

$$Nu_{жcd} = k_0 Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс} / Pr_{с2})^{0,25}, \quad (13)$$

где  $k_0$  – определяется из табл. 16, а значение  $Pr_{с2}$  устанавливается при  $t_{с2} \cong t_{с1}$ .

Таблица 16

$Re_{жс} \cdot 10^{-3}$	2,4	2,7	3	4	5	6	8	10
$k_0$	3,8	4,4	6,0	10,3	15,5	19,5	27,0	33,3

В уравнениях (11) – (13):

число Нуссельта  $Nu_{жcd} = \frac{\alpha_2 d_{вн}}{\lambda};$

число Рейнольдса  $Re_{жcd} = \frac{\dot{W} d_{вн}}{\nu};$

число Грасгофа  $Gr_{жcd} = \frac{g d_{вн}^3 \beta \cdot \Delta t}{\nu^2};$

$$\Delta t = t_{с2} - t_2;$$

число Прандтля  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – из таблиц при  $\bar{t}_2$  или  $t_{с2}$ .

Из рассчитанных по одному из уравнений (11) – (13) значений числа Нуссельта  $Nu_{жcd}$  определяется коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{жcd} \cdot \lambda}{d_{вжс}}, \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)} \quad (14)$$

В проведенном расчете температура стенки со стороны пара  $t_{с1}$  определялась в первом приближении. Ее можно уточнить, если учесть, что при стационарном режиме работы теплообменного аппарата плотности теплового потока, определенные из уравнений:

теплоотдачи  $q = \bar{\alpha}_1 (t_n - t_{с1}^*), \text{ Вт/м}^2,$  (15)

и теплопередачи  $q = k \cdot \Delta \bar{t}, \text{ Вт/м}^2,$  (16)

должны иметь одно и то же значение, т.е.

$$\bar{\alpha}_1 (t_n - t_{с1}^*) = k \cdot \Delta \bar{t},$$

откуда уточненное значение этой температуры стенки

$$t_{с1}^* = t_n - \frac{k \cdot \Delta \bar{t}}{\bar{\alpha}_1}, \text{ }^\circ\text{C.} \quad (17)$$

Если ранее принятая температура  $t_{с1}$  и найденная из (17)  $t_{с1}^*$  отличаются более чем на  $\pm 5^\circ$ , нужно задаться новым значением  $t_{с1} = t_{с1}^*$  и снова произвести расчет с последующей проверкой. При этом в уравнениях (11) – (13) теперь число  $Pr_{с2}$  устанавливается при более точном значении  $t_{с2}$ :

из уравнения теплопроводности  $q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{с1} - t_{с2})$  (18)

$$t_{с2} = t_{с1} - q \cdot \frac{\delta}{\lambda}, \text{ }^\circ\text{C} \quad (19)$$

Расчет теплообменного аппарата завершается определением расхода греющего пара  $\dot{m}_1$  из уравнения (1) и поверхности теплообмена  $F$ , м<sup>2</sup> из уравнения (2).

Обычно теплообменник изготавливается в виде секций высотой  $H$  (в нашем случае  $H = 2$  м) или для горизонтальных теплообменников длиной  $l$ , м (в нашем случае  $l = 2$  м). Тогда

число секций: 
$$n = \frac{F}{F'}, \quad (20)$$

где  $F'$  – поверхность теплообмена одной секции высотой  $H$  или длиной  $l$ , м:

$$F' = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot H = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot l, \text{ м}^2. \quad (21)$$

**Теплотехника.  
Техническая термодинамика.  
Теплопередача.**

(Методические указания)

Составители:  
И.З.Вафин,  
М.С.Курбангалеев,  
А.А.Мухамадиев,  
И.Х.Хайруллин

Редактор Л.И.Жадан  
Корректор Ю.Е.Стрыхарь