

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Кафедра теоретических  
тепло- и хладотехники

ОСНОВ

# **ТЕРМОДИНАМИКА ТЕПЛОМАССОБМЕН ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Рабочая программа и контрольные работы  
для студентов специальностей  
140401, 140504, 190603 факультета  
заочного обучения и экстерната,  
в том числе сокращенной формы обучения

Санкт-Петербург 2006

УДК 621.565

**Клецкий А.В.** Термодинамика. Тепломассообмен. Теплопередача: Раб. программа и контрольные работы для студентов спец. 140401, 140504, 190603 факультета заочного обучения и экстерната, в том числе сокращенной формы обучения / Под ред. О.Б. Цветкова.. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 25 с.

Приведены рабочая программа, задачи контрольных работ по термодинамике, тепломассообмену, теплопередаче, список рекомендуемой учебной литературы.

Рецензент  
Доктор техн. наук, проф. А.Я. Эглит

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный  
университет низкотемпературных  
и пищевых технологий, 2006

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ КУРСОВ

Курсы «Термодинамика», «Тепломассообмен» и «Теплопередача» изучаются студентами заочной формы обучения самостоятельно по рекомендованным в списке учебной литературы учебникам, учебным пособиям, методическим указаниям и закрепляются выполнением контрольной работы. В период лабораторно-экзаменационной сессии для студентов проводятся обзорные лекции по основным вопросам курсов и лабораторные работы. В процессе освоения дисциплины студенты получают консультации на кафедре ТОТХТ.

Изучение курсов рекомендуется вести в следующем порядке: внимательно ознакомиться с содержанием соответствующего раздела рабочей программы и методическими указаниями; прочитать по учебнику материал, рекомендуемый в программе для изучения данной темы. Изучение курса полезно начинать с уяснения принципиальных положений, затем переходить к разбору его конкретных особенностей. Усвоив смысл изучаемого раздела и разобравшись в ходе математических выкладок, важно самостоятельно повторить вывод той или иной зависимости. Такой метод способствует лучшему усвоению идей и методов, положенных в основу математических выводов. При изучении материала полезно составлять конспекты по каждой теме изучаемых курсов.

Для закрепления пройденного материала студент в процессе изучения дисциплин выполняет контрольные и лабораторные работы.

Для положительной аттестации по дисциплине от студента требуется знание теоретических положений курсов, понимание физической сущности изучаемых явлений и процессов, умение применять теоретические положения к решению практических задач и выполнению лабораторных работ.

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

## Курс I. Термодинамика

### Содержание программы

#### **Введение.**

Предмет термодинамики, этапы ее развития. Значение тепловых процессов в холодильной технике и теплоэнергетике. Рабочее вещество. Параметры состояния.

#### **Тема 1.** Идеальные газы и их смеси.

Термическое уравнение состояния идеального газа. Универсальная и удельная газовые постоянные. Смеси идеальных газов.

Единицы измерения параметров состояния. Расчет неизвестных параметров по уравнению состояния для чистого идеального газа и смесей.

#### **Тема 2.** Первый закон термодинамики.

##### 2.1. Первый закон термодинамики.

Классификация термодинамических систем. Работа и теплота, как формы энергетического обмена. Формулировка и аналитическое выражение первого закона термодинамики.

Формулы для расчета теплоты и работы. Функции состояния и функции процесса. Применение рабочей диаграммы.

##### 2.2. Молекулярно-кинетическая теория теплоемкости газов. Энтальпия. Энтропия. Характеристические функции.

Классификация теплоемкости. Связь теплоемкости с атомностью газа. Функции состояния – энтальпия и энтропия. Термодинамические диаграммы  $\ln p-h$  и  $T-s$ . Основные дифференциальные уравнения термодинамики.

#### **Тема 3.** Термодинамические процессы идеальных газов.

##### 3.1. Классификация термодинамических процессов.

Квазистатические или равновесные процессы. Причины и условия необратимости процессов. Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы.

Определение параметров рабочего тела в начальной и конечной точках процесса. Расчет характеристик процесса. Изображение на диаграммах.

3.2. Политропный процесс. Процессы в газовых компрессорах.

Общий анализ процессов на основе сравнения показателей политропы. Изображение в диаграммах. Процессы газового компрессора.

**Тема 4.** Реальные газы. Пары.

4.1. Фазовая диаграмма  $p-T$ .

Диаграмма  $p-T$  для идеального и реального газа. Правило фаз Гиббса. Тройная и критические точки. Нормальная температура кипения. Обозначение хладагентов.

Измерение зависимости между температурой насыщения и давлением. Аппроксимация опытных данных.

4.2. Диаграмма  $p-v$  для пара.

Изотермическое сжатие реального газа. Процесс парообразования при постоянном давлении. Параметры влажного пара. Широкодиапазонная диаграмма  $p-v$ .

4.3. Уравнение состояния реального газа. Термодинамические таблицы и диаграммы. Паровые процессы.

Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния. Уравнение состояния Боголюбова–Майера. Структура таблиц термодинамических свойств. Термодинамические диаграммы. Процессы реального газа.

Изучение формы представления данных в различных термодинамических таблицах и диаграммах.

**Тема 5.** Второй закон термодинамики.

5.1. Сущность и формулировки второго закона термодинамики.

Условия получения работы в тепловом двигателе и переноса теплоты от горячего источника к холодному. Прямые и обратные циклы. Цикл Карно. Теорема Карно. МТШ-90.

5.2. Основные положения второго закона термодинамики.

Общие свойства обратимых и необратимых циклов. Интеграл Клаузиуса. Потеря работоспособности системы из-за необратимости протекающих в ней процессов.

**Тема 6.** Процессы истечения и дросселирования газов и паров.

6.1. Первый закон термодинамики для потока. Процессы истечения.

Процессы течения газов и паров. Уравнение энергии или первого закона термодинамики для потока. Сопла и диффузоры. Скорость и расход газа при истечении. Условие перехода к сверхзвуковым скоростям.

Расчет скорости и расхода газа при истечении с помощью термодинамических диаграмм и таблиц.

Исследование адиабатного процесса истечения воздуха через суживающееся сопло. Построение графика зависимости расхода от отношения давлений.

## 6.2. Процесс дросселирования. Эффект Джоуля–Томсона.

Закономерности процесса адиабатного дросселирования газов и паров. Дифференциальный и интегральный эффект Джоуля–Томсона. Кривая инверсии.

Определение энтальпии водяного пара при помощи адиабатического дросселирования.

## **Тема 7.** Циклы паросиловых установок.

### 7.1. Циклы Карно и Ренкина.

Схемы установок реализации циклов Карно и Ренкина. Изображение циклов в диаграммах. Расчет работы, подведенной и отведенной теплоты, термический КПД. Расчет цикла Ренкина для перегретого пара.

7.2. Методы повышения эффективности паросиловых установок. Теплофикация.

Влияние параметров пара на термический КПД. Способы его повышения. Теплофикация.

**Тема 8.** Циклы паровых холодильных машин и тепловых насосов.

8.1. Обратный цикл Карно. Цикл холодильной машины с дроссельным вентилем.

Схема холодильной машины, реализующей цикл Карно в области влажного пара. Недостатки машины. Холодильная машина с дроссельным вентилем. Схема машины. Изображение цикла в диаграммах.

8.2. Анализ циклов паровой холодильной машины. Цикл теплового насоса.

Термический анализ замены расширительного цилиндра дроссельным вентилем. Цикл теплового насоса. Схема установки.

## **Тема 9.** Циклы газовых машин.

### 9.1. Прямые газовые циклы.

Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей. Термический КПД.

9.2. Цикл воздушной холодильной машины.

Схема машины. Расчет характеристик цикла. Достоинства и недостатки воздушной холодильной машины.

**Тема 10.** Основы термодинамики влажного воздуха.

10.1. Параметры влажного воздуха.

Применение воздуха в технологических процессах. Состав атмосферного воздуха. Параметры влажного воздуха. Таблицы свойств влажного воздуха. Диаграмма  $h-d$ .

10.2. Процессы влажного воздуха.

Процессы охлаждения и нагревания влажного воздуха. Процессы смешения двух потоков влажного воздуха. Подмешивание к воздуху воды и водяного пара.

## **Курс II. Теплообмен. Теплопередача**

### Содержание программы

#### **Введение.**

Развитие техники искусственного холода. Задачи дисциплины. Русская школа теплофизиков. Основные способы переноса теплоты и массы.

**Тема 1.** Теплопроводность и теплопередача.

1.1. Теория теплопроводности.

Стационарный тепловой поток в неподвижной среде. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Коэффициент теплопроводности.

1.2. Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме.

Передача теплоты через плоскую и цилиндрическую стенки.

Закон Ньютона–Рихмана. Граничные условия. Критический диаметр изоляции.

Расчет передачи теплоты через плоскую и цилиндрическую стенки при граничных условиях первого и третьего рода.

Определение коэффициента теплопроводности методом шара. Определение коэффициента теплопроводности жидкости методом коаксиальных цилиндров.

## **Тема 2. Конвективный теплообмен.**

### **2.1. Основные понятия и определения.**

Математическое описание и методы решения задач конвективного теплообмена в однофазной среде.

Дифференциальные уравнения энергии, движения, сплошности.

### **2.2. Подобие и моделирование процессов конвективного теплообмена.**

Подобие физических процессов. Анализ размерностей.

Теоремы подобия. Фундаментальные критерии подобия. Моделирование. Уравнения подобия. Обобщение экспериментальных данных методом подобия.

### **2.3. Теплоотдача при продольном обтекании плоской поверхности вынужденным потоком несжимаемой жидкости.**

Гидродинамика течения. Ламинарный и турбулентный пограничные слои. Аналитическое описание теплоотдачи.

### **2.4. Теплоотдача при вынужденном движении среды в трубах и каналах.**

Стабилизированное ламинарное и турбулентное течения. Аналогия Рейнольдса.

Теплоотдача в каналах некруглого сечения и в изогнутых каналах.

### **2.5. Теплоотдача при внешнем обтекании вынужденным потоком одиночных цилиндров и трубных пучков.**

Поперечное обтекание одиночной трубы и пучков труб. Расчет теплообмена при вынужденном движении среды.

### **2.6. Теплообмен при естественной конвекции.**

Естественная конвекция вдоль вертикальной пластины и горизонтальных труб. Ламинарный и турбулентный пограничные слои. Конвекция в замкнутом объеме. Определение коэффициента теплоотдачи при естественном движении воздуха. Определение коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении.

### **2.7. Теплообмен при фазовых превращениях.**

Кипение. Режимы кипения в большом объеме. Кризисы кипения. Конденсация. Решение Нуссельта. Факторы, не учитываемые теорией Нуссельта. Конденсация внутри труб. Капельная конденсация.

Теплообмен при кипении и конденсации. Определение коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости. Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации.

### **Тема 3.** Теплообмен излучением.

Законы излучения. Излучение серых тел. Излучение газов. Расчет теплообмена между плоскопараллельными серыми поверхностями. Диффузное излучение. Экраны. Сложный теплообмен.

### **Тема 4.** Передача теплоты через ребренные поверхности.

Интенсификация теплопередачи. Прямое ребро постоянного сечения. Эффективность ребрения. Приведенные коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи. Передача теплоты через ребренные поверхности. Лучистый и сложный теплообмен.

### **Тема 5.** Основы расчета теплообменных аппаратов.

#### 5.1. Классификация аппаратов

Назначение теплообменников. Виды теплового расчета. Схемы движения сред в аппарате. Исследование теплообменного аппарата.

5.2. Расчет теплопередачи в аппаратах рекуперативного типа энергетических установок.

Тепловой баланс. Средняя разность температур. Итеративный метод расчета. Интенсификация теплопередачи. Расчет теплообменного аппарата.

### **Тема 6.** Нестационарные задачи теплопроводности.

Аналитическое описание. Фундаментальные критерии подобия. Графики для расчета. Температурное поле тел в процессе их охлаждения (нагревания). Регулярный тепловой режим. Метод конечных разностей. Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов.

### **Тема 7.** Совместные процессы тепло- и массообмена.

7.1. Молекулярная и конвективная диффузия. Массоотдача. Массоперенос. Законы Фика. Дифференциальные уравнения. Критерии подобия. Тройная аналогия.

7.2. Тепло- и массоперенос между водой и влажным воздухом

Закон Льюиса. Коэффициент влаговываждения. Тепло- и массообмен между водой и влажным воздухом.

## КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### Требования к выполнению контрольных работ

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих правил:

- номер варианта (от 0 до 9) выбирать по последней цифре зачетной книжки;
- условия задач переписывать полностью;
- в процессе решения сначала приводить формулы, затем подставлять в них соответствующие численные значения, размерность приводить только для результата вычисления;
- вычисления проводить **только** в международной системе СИ;
- решения иллюстрировать схемами и графиками (если требуется по условию);
- в тексте работы приводить ссылки на использованную литературу, а в конце контрольной работы – список использованной литературы.

Таблицы и диаграммы свойств рабочих веществ, указанных в задачах, приведены в [1–4].

Контрольная работа подписывается студентом. Прием контрольных работ на рецензию прекращается за 10 дней до начала лабораторно-экзаменационной сессии.

### I. Контрольные работы по термодинамике

#### ВНИМАНИЕ!

Студенты 4-го курса специальности 140401 «Физика и техника низких температур» выполняют по дисциплине «Термодинамика» **одну** контрольную работу, состоящую из **первой** задачи контрольной работы **№ 1** и **всех** задач контрольной работы **№ 2**.

## Контрольная работа № 1

**Задача 1.** Газ сжимается в компрессоре по политропе с показателем  $n$ . В начальном состоянии давление газа  $p_1$  и температура  $t_1$ , в конечном состоянии давление  $p_2$ . Масса газа  $M = 10$  кг.

Определить параметры газа в начальном и конечном состояниях, работу и теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Найти работу компрессора в адиабатном, политропном и изотермическом процессах.

Принять показатель адиабаты  $k = 1,4$ ; среднюю массовую изохорную теплоемкость  $C_v = 0,723$  кДж/(кг·К). Для определения удельной газовой постоянной использовать уравнение Майера.

Изобразить процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ -координатах (без масштаба). На этих же диаграммах показать также изобарный, изотермический, адиабатный и изохорный процессы, имеющие начальное состояние в точке 1.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n$	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
$p_1$ , бар	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$t_1$ , °С	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40
$p_2$ , бар	1,5	1,8	1,9	2,0	2,1	2,4	2,8	2,9	3,1	3,2

**Задача 2.** На диаграмме  $T$ - $s$  изображен цикл воздушной холодильной машины (ВХМ). Температура воздуха, поступающего в компрессор,  $t_1$ ; давление  $p_1$ . Давление воздуха, поступающего в детандер,  $p_2$ , температура  $t_3$ . Массовый расход воздуха  $M = 0,1$  кг/с.

Определить параметры узловых точек цикла, теплоту и работу каждого процесса, а также цикла в целом, холодильный коэффициент и холодопроизводительность ВХМ, холодопроизводительность воздухоохладителя. Сравнить цикл ВХМ с обратным обратимым циклом Карно, осуществляемым в том же интервале температур источников  $t_1$  и  $t_3$ , определив его холодильный коэффициент.

Изобразить схему установки и цикл ВХМ в диаграммах  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$ . Совместно с циклом ВХМ изобразить цикл Карно.

Для расчета показателя адиабаты  $k$  использовать уравнение Майера. Средняя массовая изохорная теплоемкость воздуха  $C_v = 0,723$  кДж/(кг·К), удельная газовая постоянная  $R = 287$  Дж/(кг·К).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	0	-5	-10
$p_1, \text{бар}$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1
$p_2, \text{бар}$	2,5	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,4	3,2	3,0
$t_3, ^\circ\text{C}$	6	8	10	12	14	16	14	12	10	8

Задача 3. Рабочее вещество – реальный газ. В начальном состоянии заданы параметры: давление  $p_1$  и удельный объем  $v_1$ . В результате термодинамического процесса давление в конечном состоянии стало  $p_2$ .

Определить термодинамическое состояние рабочего вещества в начале и конце процесса, а также его параметры: 1) с помощью таблиц (или расчетом); 2) независимо – с помощью диаграмм для данного вещества.

Изобразить процесс в диаграммах  $p-v$ ,  $T-s$ ,  $\ln p-h$ . Рассчитать и показать, где возможно, на диаграммах удельную теплоту, работу и изменение внутренней энергии в процессе.

Данные о параметрах свести в таблицу:

№ точки	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$x$
1	*	$p_1$	$v_1$	*	*	*
	**			**	**	**
2 и т. д.	*	$p_2$	*	*	*	*
	**		**	**	**	**

\* Параметры, определенные по диаграмме.

\*\* Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре номера зачетной книжки:

№ варианта	Рабочее вещество	$p_1$ , МПа	$v_1$ , м <sup>3</sup> /кг	Процесс	$p_2$ , МПа
0	Вода	0,20	0,15	Изотермический	0,05
1	Вода	0,25	0,14	Изотермический	0,10
2	Вода	0,30	0,12	Изохорный	2,00
3	Аммиак	0,05	0,20	Изотермический	0,02
4	Аммиак	0,08	0,15	Адиабатный	0,04
5	Аммиак	0,12	0,12	Изохорный	1,20
6	R22	0,10	0,03	Изотермический	0,04
7	R22	0,12	0,12	Адиабатный	0,80
8	R22	0,15	0,05	Изохорный	0,60
9	R22	0,06	0,30	Адиабатный	2,00

## Контрольная работа № 2

Задача 1. Паросиловая установка (ПСУ) работает по циклу Ренкина. В турбину поступает водяной пар с температурой  $t_1$  и давлением  $p_1$ . На выходе из турбины давление  $p_2$ , расход пара  $M = 10$  кг/с.

Определить параметры ( $p, t, v, h, s, x$ ) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу цикла, термический коэффициент полезного действия и мощность установки.

Изобразить схему установки и цикл в диаграммах  $p-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$ ; показать графически теплоту и работу цикла. Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо).

Параметры точек цикла свести в таблицу:

№ точки	$t$ , °С	$p$ , МПа	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
1	*	*	*	*	*	*
	**	**	**	**	**	**
2 и т. д.	*	*	*	*	*	*
	**	**	**	**	**	**

\* Параметры, определенные по диаграмме.

\*\*Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре номера зачетной книжки:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	2,0	2,0	3,0	5,0	5,0	5,0	1,5	1,5	1,5	1,5
$t_1$ , °С	350	400	400	400	500	550	350	450	500	600
$p_2$ , МПа	0,1	0,1	0,05	0,1	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01

Задача 2. Паровая компрессионная холодильная машина работает по циклу с дросселированием, перегревом перед компрессором и переохлаждением после конденсатора. Температура кипения хладагента в испарителе  $t_0$ . В компрессор поступает перегретый пар с температурой  $t_1$ . Температура конденсации хладагента в конденсаторе  $t_k$ . Хладагент перед дросселированием (регулирующим вентилем) охлаждается до температуры  $t_5$ .

Определить параметры: давление, температуру, удельный объем, удельную энтальпию, удельную энтропию, степень сухости ( $p$ ,  $t$ ,  $v$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $x$ ) узловых точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу, теоретическую мощность привода компрессора, полную холодопроизводительность и холодильный коэффициент, если массовый расход циркулирующего хладагента  $M = 0,2$  кг/с.

Изобразить схему установки, представить цикл в координатах  $p-v$ ,  $T-s$  и  $\ln p-h$ . Параметры узловых точек определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы; 2) по таблицам термодинамических свойств холодильного агента (или путем расчета, когда это необходимо). Параметры ненасыщенной переохлажденной жидкости после конденсатора (кроме давления) определить условно по таблицам для насыщенной жидкости по температуре переохлаждения  $t_5$  [5–7].

Параметры точек цикла свести в таблицу:

№ точки	$t$ , °С	$p$ , МПа	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$x$
1	*	*	*	*	*	*
	**	**	**	**	**	**
2 и т. д.	*	*	*	*	*	*
	**	**	**	**	**	**

\*Параметры, определенные по диаграмме.

\*\*Параметры, определенные по таблицам или полученные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

№ варианта	Агент	Параметры, °С			
		$t_0$	$t_k$	$t_1$	$t_5$
0	Аммиак	-30	10	-20	5
1	Аммиак	-20	20	-10	15
2	Аммиак	-10	30	0	25
3	Аммиак	0	40	10	35
4	Аммиак	-10	20	-5	15
5	Хладагент R22	-40	10	-30	5
6	Хладагент R22	-30	20	-20	15
7	Хладагент R22	-20	30	-10	25
8	Хладагент R22	-10	40	0	35
9	Хладагент R22	0	50	10	45

Задача 3. Влажный воздух состояния 1 и массой сухого воздуха  $M$  охлаждается сначала до температуры точки росы (состояние 2), затем до температуры  $t_3$  (состояние 3). Далее (после отвода конденсата) насыщенный влажный воздух состояния 3 нагревается до первоначальной температуры  $t_1$  (состояние 4).

Определить параметры влажного воздуха: парциальное давление водяного пара, давление насыщения при заданной температуре, относительную влажность, влагосодержание, удельную энтальпию, степень насыщения ( $p_p, p_n, \phi, d, h, \psi$ ) всех названных состояний, также теплоту, подведенную к воздуху при нагревании и отведенную при охлаждении.

Параметры воздуха определить двумя способами: 1) с помощью диаграммы  $h-d$ ; 2) расчетом по формулам для влажного воздуха с использованием таблиц термодинамических свойств водяного пара и насыщенного влажного воздуха. Решение сопроводить пояснениями. Процессы нагревания и охлаждения изобразить в диаграмме  $h-d$  (без масштаба). Давление атмосферного воздуха принять равным давлению, для которого построена диаграмма  $h-d$ .

Параметры влажного воздуха свести в таблицу:

№ точки	$t$ , °С	$p_{п}$ , Па	$p_{н}$ , Па	$\varphi$ , %	$d$ , кг/кг с.в.	$h$ , кДж/кг	$\psi$
1		*			*	*	
		**	**		**	**	
2 и т. д.		*	*	*	*	*	
		**	**	**	**	**	

\* Параметры, определенные по диаграмме.

\*\* Параметры, определенные расчетом.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1$ , °С	35	30	30	25	25	20	20	18	18	35
$\varphi_1$ , %	70	50	70	55	75	70	85	60	85	60
$t_3$ , °С	18	14	20	10	18	10	12	5	6	22
$M$ , кг	50	5	10	15	20	25	30	35	40	45

## II. Контрольные работы по теплопередаче

### ВНИМАНИЕ!

Студенты 4-го курса специальности 190603 «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования» и 2-го курса специальности 140401 «Физика и техника низких температур» (сокращенная форма обучения) выполняют по дисциплине «Теплопередача» **одну** контрольную работу, состоящую из **первой и второй** задач контрольной работы № 1 и **второй и четвертой** задач контрольной работы № 2.

### Контрольная работа № 1

Задача 1. Стена камеры холодильника, выполненная из слоя кирпича толщиной  $\delta_2$  и слоя изоляции толщиной  $\delta_3$ , с двух сторон покрыта слоем штукатурки толщиной  $\delta_1 = \delta_4 = 20$  мм.

Температура наружного воздуха  $t_{в1}$ , в камере  $t_{в2}$ . Коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности стены  $\alpha_1$ , от внутренней поверхности стены к воздуху в камере  $\alpha_2$ .

Определить общее и частные термические сопротивления, коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока и количество теплоты, проходящее через стенку высотой 4 м и длиной 8 м в течение суток. Определить также температуры поверхностей всех слоев и построить график распределения температур по толщине стенки (без масштаба).

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  [Вт/(м·К)] материалов стенки приведены в таблице:

Кирпич	Штукатурка	Пробковая плита	Стекловойлок	Минераловатная плита	Войлок шерстяной	Асбовермикулитовая плита (АВП)
0,640	0,750	0,050	0,040	0,093	0,058	0,080

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре номера зачетной книжки:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta_2$ , мм	500	380	250	500	380	250	500	380	250	500
$\delta_3$ , мм	150	200	250	300	150	200	250	150	200	250
$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	20	18	15	12	20	18	15	12	20	18
$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7
Тип изоляции	Пробковая плита		Стекловойлок		Минераловатная плита		Войлок шерстяной		АВП	
$t_{в1}$ , °С	5	7	10	12	15	17	20	22	25	30
$t_{в2}$ , °С	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-10	-12	-14	-16

**Задача 2.** Внутри стального трубопровода, наружный диаметр которого  $d_{нар}$ , а толщина стенки  $\delta_{ст}$ , движется жидкость (хладоноситель) с температурой  $t_{ж1}$ . Трубопровод покрыт изоляцией толщиной  $\delta_{из}$ . Снаружи находится воздух, температура которого  $t_{ж2}$ . Коэффициенты теплоотдачи: от воздуха к поверхности изоляции  $\alpha_2$ , от внутренней поверхности трубопровода к хладоносителю  $\alpha_1$ .

Определить: линейный коэффициент теплопередачи; плотность теплового потока от воздуха к хладоносителю, отнесенную к 1 м длины трубопровода и к 1 м<sup>2</sup> наружной поверхности изоляции; температуры на наружной и внутренней поверхностях изоляции. Вычислить теплоприток от воздуха к хладоносителю за время  $\tau$ , если длина трубопровода  $L$ .

Коэффициенты теплопроводности стали  $\lambda_{ст} = 45$  Вт/(м·К), изоляции  $\lambda_{из}$ .

Изобразить распределение температур в трубопроводе (без масштаба).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

№ варианта	$d_{нар}$ , мм	$\delta_{ст}$ , мм	$t_{ж1}$ , °С	$\delta_{из}$ , мм	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_{ж2}$ , °С	$\lambda_{из}$ , Вт/(м·К)	$L$ , м	$\tau$ , ч
0	30	1,5	-5	10	1000	5	5	0,035	4	2
1	36	1,5	-10	15	1500	8	10	0,029	5	3
2	42	2,0	-15	20	2000	10	15	0,047	6	4
3	52	2,0	-20	25	1500	10	20	0,064	7	5
4	56	2,5	-25	30	1000	8	25	0,076	8	2
5	30	1,5	-5	10	800	6	20	0,035	7	3
6	36	1,5	-10	15	1000	5	15	0,029	6	2
7	42	2,0	-15	20	1500	10	10	0,047	5	3
8	52	2,0	-20	25	2000	8	5	0,064	4	2
9	56	2,5	-25	30	1000	10	25	0,076	3	1

**Задача 3.** Внутри стальной трубы, наружный диаметр которой  $d_{нар}$  и толщина стенки  $\delta_{ст}$ , движется трансформаторное масло с температурой  $t_{ж1}$ . Труба расположена в помещении с температурой  $t_{ж2}$ . Коэффициент теплоотдачи от масла к внутренней поверхности трубы  $\alpha_1$ , от поверхности трубы к воздуху  $\alpha_2$ . Для снижения тепловых потерь трубу покрывают слоем бетона  $\delta_б$ .

Определить линейную плотность теплового потока через трубу без бетона и при его наличии. Найти максимальное значение коэффициента теплопроводности такой изоляции, накладываемой на трубу, чтобы при любой ее толщине теплопотери были меньше, чем для неизолированной трубы.

Коэффициенты теплопроводности: стали  $\lambda_{ст} = 45$  Вт/(м·К), бетона  $\lambda_б = 1,3$  Вт/(м·К). Значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  считать постоянным.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

№ варианта	$d_{нар}$ , мм	$\delta_{ст}$ , мм	$\delta_б$ , мм	$t_{ж1}$ , °С	$t_{ж2}$ , °С	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
0	30	1,5	30	60	10	500	5
1	36	1,5	40	80	15	600	6
2	42	2,0	50	100	20	700	7
3	52	2,0	60	120	25	800	8
4	56	2,5	40	100	10	900	10
5	30	1,5	50	60	10	1000	5
6	36	1,5	60	80	15	1100	6
7	42	2,0	60	100	20	1200	7
8	52	2,0	80	120	25	1300	8
9	56	2,5	80	100	10	1400	10

**Задача 4.** Стальную пластину ( $\lambda_{ст} = 12$  Вт/(м·К),  $a_{ст} = 3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>) толщиной  $\delta$  с начальной температурой  $t_{нач}$  опускают в ванну с жидким азотом, имеющим постоянную температуру  $t_ж = -196$  °С. Коэффициент теплоотдачи от пластины к азоту  $\alpha = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Считая, что температура пластины изменяется только по толщине, определить температуры поверхности пластины  $t_{пов}$  и ее центральной плоскости  $t_{ц}$  через время  $\tau$  после начала охлаждения. Найти количество теплоты, которое передаст пластина азоту за это время при массе пластины 1000 кг.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{нач}$ , °С	20	50	70	100	150	200	20	50	100	150
$\delta$ , мм	80	90	100	120	150	200	80	100	150	200
$\tau$ , с	1000	1200	1500	1300	1500	1700	1200	1500	1800	2000

## Контрольная работа № 2

Задача 1. Для увеличения теплового потока от воздуха к движущемуся внутри труб хладоносителю воздухоохладитель сконструирован из оребренных горизонтальных труб, наружный диаметр которых  $d_{нар} = 20$  мм, толщина стенки  $\delta_{ст} = 1,5$  мм.

Ребра прямые круглые высотой  $h_p$  и толщиной  $\delta_p$ , шаг ребер  $S_p$ . Коэффициент теплопроводности материала труб и ребер  $\lambda_{ст}$ . Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности ребер и межреберных участков  $\alpha_p$ , а от внутренней поверхности трубы к хладоносителю  $\alpha_1$ .

Определить коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, приведенные к полной (оребренной) поверхности. Найти, во сколько раз увеличится тепловой поток через оребренную трубу по сравнению с неоребренной.

При определении коэффициента эффективности ребра по формуле  $E = th(mh'_p)/(mh'_p)$  условную (приведенную) высоту ребра рассчитать по формуле  $h'_p = h_p[1+0,35 \ln(D/d_o)]$ , где  $D$  – диаметр ребра.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

№ варианта	$h_p$ , мм	$\delta_p$ , мм	$S_p$ , мм	$\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К)	$\alpha_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
0	10	0,5	4	40	6	500
1	12	0,6	5	45	7	600
2	14	0,7	6	108	8	700
3	16	0,8	7	200	9	800
4	18	1,0	8	390	10	900
5	10	1,0	4	390	30	900
6	12	0,8	5	200	40	500
7	14	0,7	6	108	50	600
8	16	0,6	7	45	60	700
9	18	0,5	8	40	70	600

Задача 2. Для обогрева воздуха в помещении используется настенный нагреватель высотой  $h$  и длиной  $l$ . Температура воздуха в помещении  $t_{ж}$ , температура наружной поверхности нагревателя  $t_{ст}$ .

Нагреватель изготовлен из чугуна, степень черноты поверхности нагревателя  $\varepsilon = 0,64$ .

Определить конвективный  $Q_k$ , лучистый  $Q_{л}$ , а также полный  $Q$  тепловые потоки от поверхности нагревателя к воздуху.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре номера зачетной книжки:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h$ , м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$L$ , м	1,2	1,0	0,8	1,2	1,0	0,8	1,2	1,0	0,8	1,2
$T_{ж}$ , °C	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
$T_{ст}$ , °C	70	65	60	55	50	70	65	60	55	50

Задача 3. Теплообменник, предназначенный для охлаждения жидкого холодильного агента после конденсации, выполнен в виде двухтрубного аппарата (труба в трубе). Размеры внутренней трубы  $d \times \delta$ , наружной  $d_n \times \delta_n$ . По внутренней трубе со скоростью  $W_B$  движется охлаждающая вода, в межтрубном кольцевом пространстве со скоростью  $W_a$  – холодильный агент. Средняя температура воды  $t_B$ , хладагента  $t_a$ .

Определить коэффициент теплопередачи от хладагента к воде, применив формулу для плоской стенки.

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре номера зачетной книжки:

№ варианта	Хладагент	$d_n \times \delta_n$ , мм	$d \times \delta$ , мм	$W_a$ , м/с	$t_a$ , °C	$t_B$ , °C	$W_B$ , м/с
0	NH <sub>3</sub>	50×2,5	30×2,5	0,5	10	5	1,0
1	R22	36×2,0	20×2,0	0,6	15	7	1,1
2	R125	36×2,0	16×2,0	0,7	20	10	1,2
3	NH <sub>3</sub>	26×1,5	14×1,5	0,8	25	15	1,3
4	R22	20×1,5	11×1,0	0,5	30	15	1,4
5	R125	50×2,5	30×2,5	0,6	35	20	1,0
6	NH <sub>3</sub>	36×2,0	20×2,0	0,7	40	25	1,1
7	R22	32×2,0	16×2,0	0,7	45	25	1,2
8	R125	14×1,5	14×1,5	0,5	50	30	1,3

9	NH <sub>3</sub>	20×1,5	11×1,0	0,4	30	15	1,4
---	-----------------	--------	--------	-----	----	----	-----

**Задача 4.** Холодильный агент кипит (конденсируется) при температуре насыщения  $t_n$  на трубах теплообменных аппаратов. Внутри трубы испарителя (конденсатора) движется хладоноситель – водный раствор NaCl или CaCl<sub>2</sub> (вода) со скоростью  $W$ . Температура хладоносителя (воды) на входе в аппарат  $t_1$ , на выходе  $t_2$ . Тепловая нагрузка аппарата  $Q = 0,3$  МВт.

Определить средний логарифмический температурный напор, коэффициенты теплоотдачи со стороны холодильного агента и хладоносителя (воды в конденсаторе), плотность теплового потока, коэффициент теплопередачи и площадь теплопередающей поверхности испарителя (конденсатора).

Номер варианта и исходные данные для расчета определяют по последней цифре шифра:

Параметры	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип аппарата	Конденсатор					Испаритель				
Хладоноситель	Вода					Раствор NaCl		Раствор CaCl <sub>2</sub>		
$W$ , м/с	2,2	1,7	1,4	1,5	1,3	2,2	1,6	2,2	2,5	3,2
$t_1$ , °С	22	32	12	22	30	-12	-2	-23	-13	-3
$t_2$ , °С	24	34	14	24	34	-15	-5	-25	-15	-5
Холодильный агент	Аммиак		R22					Аммиак		
$T_n$ , °С	30	40	20	30	40	-20	-10	-30	-20	-10
Материал труб	Сталь		Медь		Сталь	Медь		Сталь		
$d \times \delta$ , мм	20×2		16×1		22×2	15×1,5		30×2,5		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная

1. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова; Под ред. С.Н. Богданова – СПб.: СПбГУНиПТ, 1999. – 308 с.

2. **Цветков О.Б.** Термодинамика. Теплопередача: Справ. материал к контрольным работам для студентов заочного факультета. – Л.: ЛТИХП, 1987. – 45 с.

3. **Цветков О.Б., Клецкий А.В., Лаптев Ю.А.** Практикум по термодинамике и теплопередаче. Часть I. Свойства рабочих веществ и материалов холодильной и криогенной техники и систем кондиционирования воздуха: Метод. указания для самостоятельной работы студентов всех спец. – СПб.: СПбТИХП, 1993. – 98 с.

4. **Цветков О.Б., Клецкий А.В., Лаптев Ю.А.** Теплофизические свойства и диаграммы альтернативных холодильных агентов: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГАХиПТ, 1997. – 96 с.

5. Теоретические основы хладотехники. Часть I. Термодинамика / С.Н. Богданов, Э.И. Гуйго, Г.Н. Данилова, О.П. Иванов, А.В. Клецкий, В.Т. Плотников, В.Н. Филаткин, О.Б. Цветков; Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 288 с.

6. **Богданов С.Н., Клецкий А.В., Куприянова А.В.** Сборник задач по технической термодинамике. – СПб.: СПбГАХиПТ, 1996. – 189 с.

7. **Цветков О.Б.** Термодинамика. Теплопередача: Метод. указания к контрольным работам для студентов заочного факультета. – Л.: ЛТИХП, 1987. – 23 с.

### Дополнительная

Теоретические основы хладотехники. Часть II. Тепломассообмен / С.Н. Богданов, Н.А. Бучко, Э.И. Гуйго, Г.Н. Данилова, В.Т. Плотников, В.Н. Филаткин, О.Б. Цветков; Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 368 с.

Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, Н.А. Бучко. – М.: Колос, 1995.

Теплотехника: Учеб. для втузов / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев и др.; Под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: Изд-во МГУ им. Баумана, 2004. – 712 с.

Лабораторный практикум по теплопередаче / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.Б. Цветков и др.; Под общ. ред. Э.И. Гуйго, Ю.Н. Ширяева. – СПб.: СПбТИХП, 1992. – 26 с.

**Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Термодинамика. Теплопередача: Метод. указания. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. – 43 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ КУРСОВ.....	3
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	6
Курс I. Термодинамика.....	6
Курс II. Тепломассообмен. Теплопередача .....	9
КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ.....	13
I. Контрольные работы по термодинамике.....	13
Контрольная работа № 1 .....	14
Контрольная работа № 2 .....	16
II. Контрольные работы по теплопередаче .....	19
Контрольная работа № 1 .....	19
Контрольная работа 2 .....	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	26

Клецкий Александр Владимирович

## **ТЕРМОДИНАМИКА ТЕПЛОМАССОБМЕН ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Рабочая программа и контрольные работы  
для студентов специальностей  
140401, 140504, 190603 факультета  
заочного обучения и экстерната,  
в том числе сокращенной формы обучения

*Редактор*  
Е.О. Трусова

*Компьютерная верстка*  
Н.В. Гуральник

---

Подписано в печать 27.12.2006. Формат 60×84 1/16  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,63. Печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,56  
Тираж 300 экз. Заказ № С 100

---

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9  
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9