

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Программа, методические указания и контрольные задания  
для студентов заочного обучения  
специальности 1–70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция  
и охрана воздушного бассейна»

М и н с к 2 0 0 4

УДК 621.184.64

Материалы составлены согласно типовой программе курса «Техническая термодинамика», утвержденной учебно-методическим объединением по инженерно-строительным материалам. В них включены программа курса, перечень основных и дополнительных учебников и учебных пособий, методические указания по изучению отдельных разделов и тем, вопросы и задачи для двух контрольных работ,  $h-d$ -диаграмма влажного воздуха,  $h-s$ -диаграмма водяного пара, табл. П1...П3.

Составители:

И.И. Станецкая, В.Д. Акельев, Е.С. Калиниченко

Рецензент А.П. Несенчук

© Станецкая И.И.,  
Акельев В.Д.,  
Калиниченко Е.С.,  
составление, 2004

## 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Согласно учебному плану для изучения курса «Техническая термодинамика» отводится 58 часов, из них 10 часов лекционных, 32 лабораторных и 16 часов практических занятий, которые проводятся в период экзаменационной сессии.

Программа и методические указания составлены таким образом, чтобы помочь студенту самостоятельно освоить данный курс. Весь курс технической термодинамики разделен на отдельные темы, в конце которых приводятся контрольные вопросы с указанием глав и параграфов основной литературы.

Методические указания содержат перечень основных вопросов курса и две контрольные работы.

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие требования:

1. На титульном листе указать фамилию и инициалы автора, шифр зачетной книжки, специальность, наименование дисциплины, вариант и домашний адрес.

2. Вариант работы должен соответствовать номеру шифра зачетной книжки студента.

3. Условия задач и вопросы должны быть приведены полностью.

4. Решения задач должны сопровождаться кратким текстом со ссылкой на используемую литературу.

5. Графики должны быть выполнены на кальке или миллиметровой бумаге и подклеены в соответствующих местах пояснительной записки.

6. Пояснительная записка должна иметь поля для заметок.

Выполнив и защитив контрольные и лабораторные работы, студент допускается к сдаче экзамена по программе дисциплины.

На экзамене студент должен показать знание теории и понимание физической сущности изучаемых вопросов, а также умение применять основные теоретические положения курса к решению практических задач.

## Литература

### Основная

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика: Учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Кушнырев В.И., Лебедев В.И., Павленко В.А. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебник. – М.: Стройиздат, 1986.
3. Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высш. школа, 1991.
4. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под. ред. В.И. Крутова, Г.Б. Петражицкого. – М.: Высш. школа, 1986.
5. Теплотехника: Учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2000.

### Дополнительная

1. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1988.
2. Новиков И.И. Термодинамика: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1984.
3. Базаров И.П. Термодинамика: Учебник. – М.: Высш. школа, 1991.
4. Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1971. – 264 с.

## 2. ПРОГРАММА КУРСА

### 2.1. Цели и задачи курса

Техническая термодинамика – базовая общеинженерная дисциплина для подготовки инженера-строителя по специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна».

Целью изучения курса является формирование фундаментальных знаний у студентов в области технической термодинамики, создание базы для усвоения профилирующих дисциплин специальности, развитие навыков и умения применять основные закономерности термодинамики для решения задач в области теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования.

Освоение дисциплины «Техническая термодинамика» базируется на знаниях студентов, полученных из общенаучных и общеинженерных дисциплин учебного плана специальности 1-70 04 02, таких как «Высшая математика», «Физика», «Численные методы и программирование для ЭВМ» и др. Изучение технической термодинамики входит в общеинженерную базовую подготовку, необходимую для усвоения основных дисциплин специальности: строительной теплофизики, отопления, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха.

При изучении дисциплины студент должен получить фундаментальные знания в области теоретических основ теплотехники, овладеть умением ставить и решать задачи по рациональному использованию тепловой энергии при проектировании систем теплогазоснабжения и вентиляции, приобрести навыки работы со справочной литературой по теплофизическим свойствам рабочих тел.

## 2.2. Содержание дисциплины

### *Основные понятия и определения*

#### *2.2.1. Первый закон термодинамики*

Основные понятия и определения. Термодинамическая система, виды систем. Рабочее тело. Параметры состояния. Уравнение состояния. Термодинамические диаграммы. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые процессы.

Теплота и работа как функции процесса. Внутренняя энергия и энтальпия как функции состояния термодинамической системы. Закон сохранения энергии. Аналитические выражения первого закона термодинамики.

#### *2.2.2. Термодинамика идеального газа. Газовые смеси*

Идеальный газ как простейшая модель рабочего вещества. Уравнения состояния идеального газа. Универсальная газовая постоянная. Удельная газовая постоянная. Законы идеальных газов.

Понятие о теплоемкости. Истинная и средняя теплоемкость. Свойства теплоемкостей идеального газа. Связь между изохорной и изобарной теплоемкостью идеального газа. Таблицы значений истинной и средней теплоемкости идеального газа.

Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы изменения состояния идеального газа, уравнения процессов, изображение их в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах, расчетные выражения для теплоты и работы. Политропный процесс. Теплоемкость газа и показатель политропы.

Газовые смеси. Способы задания состава газовой смеси. Параметры состояния газовой смеси, газовая постоянная, кажущаяся молекулярная масса. Теплоемкость газовых смесей.

### *2.2.3. Второй закон термодинамики*

Прямые и обратные циклы. Цикл Карно и его термический КПД. Холодильный коэффициент. Теорема Карно. Понятие о термодинамической шкале температур. Второй закон термодинамики.

Основные формулировки второго закона, их физический смысл.

Интеграл Клаузиуса. Энтропия. Анализ термодинамических циклов с использованием T-s-диаграммы.

Аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Обобщенное уравнение первого и второго законов термодинамики.

Энергия как мера работоспособности. Эксергия теплоты. Потери эксергии в необратимых процессах. Принципы эксергетического анализа.

### *2.2.4. Реальные газы и пары*

Термодинамические свойства реальных газов, изотермы в p-v-диаграмме, критические параметры. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Коэффициент сжимаемости и диаграмма Бойля, связь с потенциалом межмолекулярного взаимодействия. Уравнение состояния реальных газов.

Условия термодинамического равновесия. Понятие о термодинамических потенциалах, химический потенциал. Условия равновесия фаз, правило Гиббса, фазовые превращения, уравнение Клапейрона-Клаузиуса, теплота фазового перехода. Фазовая диаграмма. Тройная точка.

Процесс парообразования в p-v- и T-s-координатах. Жидкость в состоянии насыщения и сухой насыщенный пар. Влажный пар, степень сухости. Перегретый пар. Связь между давлением и температурой насыщенного пара. Критические параметры водяного пара.

Принцип построения и характерные особенности  $h$ - $s$ -диаграммы водяного пара. Удельный объем, энтальпия и энтропия воды, влажного насыщенного, сухого насыщенного и перегретого пара.

Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара.

Расчет термодинамических процессов изменения состояния водяного пара с использованием  $h$ - $s$ -диаграммы и таблиц.

### *2.2.5. Влажный воздух*

Влажный воздух как смесь идеальных газов. Расчетные выражения газовой постоянной, молекулярной массы, плотности и теплоемкости влажного воздуха. Уравнение состояния влажного воздуха.

Влажность, относительная влажность, температура точки росы, энтальпия влажного воздуха. Насыщенный и ненасыщенный влажный воздух.

$h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха, принцип построения, характерные особенности, определение параметров влажного воздуха. Расчет основных процессов с использованием  $h$ - $d$ -диаграммы. Температура мокрого термометра. Принцип действия психрометра.

### *2.2.6. Термодинамика потока. Истечение. Дросселирование*

Уравнение первого закона термодинамики для потока. Предполагаемая работа, работа проталкивания, работа изменения кинетической и потенциальной энергии потока, работа против сил трения. Теплота трения и внешняя теплота. Первый закон термодинамики для адиабатного потока.

Истечение газов из суживающихся сопел. Расчетные соотношения для скорости и расхода. Переход через скорость звука, критические параметры. Истечение идеального газа из сопла Лаваля. Расчет истечения водяного пара из сопла Лаваля с использованием  $h$ - $s$ -диаграммы. Анализ адиабатного истечения водяного



пара с учетом необратимости. Основные положения расчета процесса истечения из сосуда ограниченной емкости.

Дросселирование газов и паров. Физическая сущность процесса дросселирования. Изменение параметров в процессе дросселирования. Определение дифференциального дроссель-эффекта с использованием дифференциальных уравнений термодинамики. Интегральный дроссель-эффект. Температура инверсии, кривая инверсии. Процесс дросселирования водяного пара. Практическое применение процесса дросселирования.

### ***2.2.7. Компрессоры. Газовые циклы***

Термодинамический анализ процесса сжатия газов в компрессорах. Принцип действия поршневого компрессора. Индикаторная диаграмма компрессора. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие. Учет работы проталкивания. Многоступенчатый компрессор, распределение давления по ступеням. Определение мощности привода компрессора. Иллюстрация термодинамического анализа работы компрессора в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах. Процесс сжатия газов в компрессоре с учетом необратимости.

Циклы поршневых ДВС с изохорным и изобарным подводом теплоты. Методы повышения эффективности работы поршневых ДВС.

Циклы газотурбинных установок. Принципиальная схема и термодинамический цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении. Термический КПД цикла. Учет необратимости в процессах сжатия и расширения. Методы повышения термического КПД газотурбинных установок. Оптимальная степень повышения давления. Регенерация, многоступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты. Замкнутые схемы газотурбинных установок. Циклы реактивных двигателей.

### *2.2.8. Циклы паросиловых установок*

Принципиальная схема паротурбинной установки. Цикл Ренкина, его термический КПД. Методы повышения термического КПД цикла Ренкина. Действительный цикл с учетом необратимости адиабатного расширения. Цикл со вторичным перегревом пара. Цикл с регенеративным подогревом питательной воды. Влияние числа отборов на КПД регенеративного цикла. Эксергетический анализ паросиловой установки.

Термодинамический анализ теплофикационной установки. Сравнение комбинированной и отдельной выработки электроэнергии и теплоты. Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела в паротурбинных установках. Принципиальная схема и цикл бинарной установки. Парогазовая установка и ее циклы. Термодинамические циклы атомных электростанций.

Термодинамические основы процессов непосредственного преобразования теплоты в электроэнергию. Схема и цикл МГД-установки. Термодинамические и термоэмиссионные преобразователи, топливные элементы.

### *2.2.9. Циклы холодильных установок*

Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Схема и цикл воздушной холодильной установки. Парокомпрессорная холодильная установка: принципиальная схема, цикл, свойства рабочего тела. Пароэжекторная и абсорбционная холодильные установки. Понятие о циклах глубокого охлаждения.

Цикл теплового насоса. Коэффициент трансформации теплоты.

### *2.2.10. Элементы химической термодинамики*

Первый закон термодинамики применительно к химическим реакциям. Закон Гесса. Зависимость тепловых эффектов

реакций от температуры. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Тепловая теорема Нернста. Третий закон термодинамики.

Растворы. Условия равновесия в растворах. Диаграмма состояния раствора. Равновесие «жидкость-пар» для многокомпонентной системы.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕМ КУРСА. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

#### **Основные понятия и определения**

##### ***3.1. Первый закон термодинамики***

Термодинамика изучает физические процессы, происходящие в макроскопических системах, в которых содержится огромное число микрочастиц: молекул, атомов, электронов, фотонов и т.д. Термодинамика объединяет два раздела – термостатику и термодинамику. В первом изучаются свойства систем, находящихся в термодинамическом равновесии, без учета времени развития процесса. Во втором исследуются необратимые термодинамические процессы, протекающие во времени. При этом законы равновесной термодинамики при определенных условиях могут быть применены для изучения неравновесных процессов. Поэтому изучение термодинамики следует начинать с этого раздела. Неравновесная термодинамика, т.е. термодинамика реальных процессов, формулирует общие законы переноса энергии, массы и импульса – фундаментальных характеристик материи. Таким образом, термодинамика изучает законы движения и превращения энергии, тепло- и массообмена в макросистемах без учета поведения каждой отдельной частицы.

Объектом исследования в термодинамике является система – макроскопическое тело или система тел, взаимодействующих как

между собой, так и с окружающей средой. Зачастую в качестве термодинамической системы рассматривается какое-либо вещество, выполняющее главную функцию в тепловой машине, например, пар. Такое вещество называется рабочим телом машины или термодинамической системы.

Взаимодействие закрытой термодинамической системы с окружающей средой может происходить в форме теплоты  $q$  и работы  $l$ . На основании закона сохранения энергии изменение внутренней энергии системы  $\Delta u$  может быть представлено выражением

$$\Delta u = q - l.$$

или в дифференциальном виде

$$du = dq - dl.$$

Большое практическое значение при изучении поведения газов имеет энтальпия

$$h = u + pv.$$

Изменение энтальпии в процессе при  $p = \text{const}$  определяет теплообмен системы с окружающей средой, что и характеризует ее физический смысл в этом процессе.

Уравнение

$$dq = dh - vdp$$

является вторым видом уравнения первого закона термодинамики.

### **Контрольные вопросы**

1. Термодинамическая система. Виды систем.

2. Основные термодинамические параметры состояния системы, их физический смысл.
3. Уравнение состояния. Термодинамические поверхности и диаграммы.
4. Равновесные и неравновесные термодинамические процессы.
5. Понятия о работе и теплоте. Первый закон термодинамики.
6. Внутренняя энергия как функция состояния термодинамической системы.
7. Энтальпия. Аналитическое выражение первого закона термодинамики через энтальпию.

**Литература:**[1, гл.1 § 1.2, 1.3; гл.2 ↓§ 2.1 – 2.5 ].

### ***3.2. Термодинамика идеального газа. Газовые смеси***

При изучении этой темы прежде всего необходимо уяснить, чем отличается идеальный газ от реального и в чем состоит смысл введения в термодинамику понятия идеального газа.

Основные параметры состояния идеального газа связаны между собой характеристическим уравнением состояния. Следует уяснить физический смысл универсальной газовой постоянной и газовой постоянной. В табл. П1 приведены молекулярные массы, плотности, объемы киломолей и газовые постоянные важнейших для техники газов.

Из определения теплоемкости следует, что она является функцией процесса. В приближенных расчетах теплоемкость конкретного процесса считают величиной постоянной. В более точных расчетах необходимо учитывать зависимость теплоемкости идеального газа от температуры. В табл. П2 приведены средние теплоемкости некоторых газов в интервале температур от 0 до 1800 °С.

Количество подводимой теплоты зависит от характера термодинамического процесса, и поэтому каждому термодинамическому процессу соответствует собственная удельная теп-

лоемкость газа. Уравнение  $C_p - C_v = R$  показывает, что для нагрева одного и того же количества вещества в одинаковом интервале температур в изохорном процессе теплоты затрачивается меньше, чем в изобарном. Это явление обусловлено тем, что в процессе при  $v = \text{const}$  теплота затрачивается только на изменение внутренней энергии, а в процессе при  $p = \text{const}$  дополнительно совершается работа расширения газа.

При изучении основных термодинамических процессов изменения состояния идеальных газов следует обратить внимание на их изображение в координатах  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ . Политропный процесс является обобщающим термодинамическим процессом. Основным его свойством является постоянство теплоемкости газа на протяжении всего развития процесса.

### Контрольные вопросы

8. Уравнения состояния идеального газа.
9. Удельная и универсальная газовые постоянные, их физический смысл.
10. Основные законы идеальных газов.
11. Удельная теплоемкость в процессах при  $p = \text{const}$  и  $v = \text{const}$ .
12. Теплоемкость истинная и средняя.
13. Изохорный процесс изменения состояния идеального газа. Основные расчетные выражения.
14. Изобарный процесс изменения состояния идеального газа. Основные расчетные выражения.
15. Изотермический процесс изменения состояния идеального газа. Основные расчетные выражения.
16. Адиабатный процесс изменения состояния идеального газа. Основные расчетные выражения.
17. Политропный процесс как общая форма частных процессов. Теплоемкость процесса.
18. Закон Дальтона. Парциальное давление, парциальный объем.

19. Массовая, объемная и мольная доля компонентов газовой смеси.

20. Кажущаяся молекулярная масса газовой смеси.

21. Теплоемкость газовой смеси.

**Литература:** [1, гл.1 ♣§ 1.4 – 1.6, гл. 4 ♣§ 4.4; гл. 7 ♣§ 7.1 – 7.5].

### *3.3. Второй закон термодинамики*

Действительные термодинамические процессы необратимы и могут развиваться только в одном направлении, например, теплота передается от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой, поток воздуха движется в сторону выравнивания давления, температуры, концентрации и т.д. Поэтому существует много эквивалентных формулировок второго закона термодинамики в зависимости от равновесного конечного параметра. Согласно формулировке Планка нельзя теплоту, полученную из некоторого источника, полностью превратить в работу, а затем снова в теплоту. Степень совершенства превращения теплоты в работу характеризуется термическим КПД цикла.

Для осуществления обратного процесса, т.е. для того, чтобы вернуть систему в исходное состояние, необходимо затратить работу. На принципе обратного цикла работают холодильные установки и трансформаторы теплоты. Оценкой термодинамической эффективности холодильных циклов служит холодильный коэффициент.

Аналитическое выражение второго закона термодинамики имеет вид

$$ds \geq \frac{dq}{T},$$

а объединенное уравнение первого и второго законов

$$T \cdot ds \geq du + p \cdot dv.$$

При анализе термодинамических циклов тепловых машин следует обратить внимание на то, что эталонным является идеальный цикл Карно, как обладающий максимальным термическим КПД.

### **Контрольные вопросы**

22. Понятие о цикле. Прямые и обратные циклы.
23. Основные формулировки II закона термодинамики.
24. Обобщенное уравнение I и II законов термодинамики.
25. Понятие об энтропии.
26. Работоспособность (эксергия) термодинамической системы.

**Литература:** [1, гл.3 ♣ § 3.1 – 3.4, 3.6, 3.8, 3.10].

### ***3.4. Реальные газы и пары***

Изучая свойства реальных веществ, необходимо помнить, что соотношения, полученные для идеального газа, к ним не применимы. Реальный газ приближается к идеальному при малых давлениях и высоких температурах. Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает лишь качественные особенности реальных газов. Более точные уравнения довольно громоздки и имеют ограниченную область применения. Поэтому расчет процессов для реальных газов проводится либо по таблицам их термодинамических свойств, либо по диаграммам, например, для водяного пара.

Реальный газ, близкий к состоянию насыщения (конденсации), называется паром. Примером такого реального газа является водяной пар, который образуется из воды в результате фазового перехода. Получение пара из воды следует рассматривать в  $p$ - $v$ -координатах, после чего, изучив термодинамические свойства воды и водяного пара, ознакомиться с  $T$ - $s$ - и



h-s-диаграммами водяного пара. Следует уяснить преимущества h-s-диаграммы по сравнению с T-s.

В приложении приведена h-s- диаграмма водяного пара и табл. ПЗ «Сухой насыщенный водяной пар и вода на кривой насыщения».

### **Контрольные вопросы**

27. Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса.
28. Фазовые переходы.
29. Кипение и испарение. Зависимость температуры кипения от давления.
30. Фазовая диаграмма. Тройная точка.
31. Процесс образования пара и воды в p-v-координатах.
32. Критическая точка. Критические параметры.
33. Принципы построения и особенности h-s-диаграммы.
34. Изображение теплоты процессов парообразования на T-s-диаграмме.
35. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара.

**Литература:** [1, гл.5, ♣§ 5.2, 5.5, 5.6; гл. 6 ♣§ 6.3 – 6.6, 6.8; гл. 7 §♣ 7.1 – 7.4].

### ***3.5. Влажный воздух***

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Обычно влажный воздух имеет низкое давление, а парциальное давление водяного пара во влажном воздухе еще меньше, вследствие чего его свойства мало отличаются от свойств идеального газа. Следует ознакомиться с основными формулами для расчета параметров влажного воздуха и научиться определять их с помощью h-d-диаграммы.

## Контрольные вопросы

36. Три характерных состояния влажного воздуха.
37. Основные параметры влажного воздуха.
38. h-d-диаграмма влажного воздуха.
39. Устройство и принцип действия психрометра.
40. Процессы изменения состояния влажного воздуха в h-d-диаграмме.

**Литература:** [1, гл.15 ♣ § 15.1, 15.2, 15.4].

### *3.6. Термодинамика потока. Истечение. Дросселирование*

Теплота, подведенная к массе газа в потоке, расходуется на изменение внутренней энергии, работу расширения и изменение кинетической энергии потока, которая может быть использована в технике.

При изучении этой темы следует уяснить процессы преобразования кинетической энергии потока при движении газа или пара в каналах различных профилей. Необходимо научиться рассчитывать скорости истечения пара по заданным изменениям энтальпии. Следует разобраться, как влияет отношение  $p_2/p_1$  на изменение расхода и скорости истечения идеального газа, почему в суживающемся сопле нельзя превзойти скорость звука и почему в комбинированном сопле Лаваля можно получить скорость больше критической.

Процесс адиабатного дросселирования широко используют в технике, в частности в холодильных машинах. Поэтому необходимо хорошо представлять, какие параметры газа в процессе дросселирования изменяются, а какие остаются постоянными. Следует научиться рассчитывать процесс дросселирования с помощью h-s-диаграммы газов и паров.

## Контрольные вопросы

41. Первый закон термодинамики для потока газа.
42. Расчетные выражения для скорости и расхода газа при истечении из суживающихся сопел.
43. Зависимость расхода газа от отношения  $p_2/p_1$ .
44. Число Маха. Дозвуковая и сверхзвуковая скорость.
45. Изменение давления и скорости потока газа по длине сопла Лавалья.
46. Действительный процесс истечения.
47. Изменение параметров идеального газа при дросселировании.
48. Эффект Джоуля-Томсона.
49. Температура инверсии. Кривая инверсии.
50. Дросселирование водяного пара.

**Литература:** [1, гл.2 § 2.6; гл. 7 § 7.6, 7.7; гл. 8 § 8.1 – 8.5].

### *3.7. Компрессоры. Газовые циклы*

При изучении работы поршневых компрессоров следует уяснить, в каких случаях необходимо применять многоступенчатое сжатие газа, насколько целесообразно охлаждение газа в промежуточных холодильниках, чем ограничивается степень повышения давления газа в одной ступени компрессора, как влияет наличие вредного пространства на производительность компрессора. Этот анализ необходимо уметь проводить как аналитически, так и с помощью  $p-v$  и  $T-s$ - диаграмм.

Циклы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) изучаются в термодинамике на идеальных циклах. Поэтому следует уяснить себе основные отличия идеального цикла от индикаторной диаграммы и с каким приближением осуществляются реальные циклы двух- и четырехтактных ДВС.

Цикл газотурбинной установки (ГТУ) рассматривается с изобарным подводом теплоты. Следует обратить внимание на способы увеличения экономичности ГТУ – регенерацию, ступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением и ступенчатый подвод теплоты.

### **Контрольные вопросы**

51. Изотермический, политропный и адиабатный процессы сжатия газа в компрессоре в  $p$ - $v$ -координатах.

52. Влияние вредного пространства на производительность компрессора.

53. Преимущества многоступенчатого сжатия газа в компрессоре.

54. Предпосылки, положенные в основу идеализации циклов поршневых ДВС.

55. Графическое сравнение КПД циклов ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  и  $p = \text{const}$ .

56. Преимущества цикла ДВС со смешанным подводом теплоты.

57. Принципиальная схема ГТУ с изобарным подводом теплоты.

58. Пути повышения термического КПД ГТУ.

**Литература:** [1, гл. 7 § 7.9; гл. 10 § 10.1, 10.2].

### ***3.8. Циклы паросиловых установок***

Рассмотрение теоретических циклов паросиловых установок следует начинать с цикла Карно, выяснив при этом причины его практической неосуществимости. Необходимо изучить основной цикл паросиловой установки – цикл Ренкина, рассмотрев его в координатах  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  и  $h$ - $s$ . Следует понять, что при повышении начальных параметров пара, а также при понижении противодавления возрастает полезный теплопере-

пад в адиабатном процессе расширения. Эту особенность используют для повышения КПД теплосиловых установок. Затем следует рассмотреть более сложные циклы: регенеративный, теплофикационный, с промежуточным перегревом и парогазовый.

Термический КПД цикла паросиловой установки можно повысить, применяя бинарный цикл, в котором кроме воды используется дополнительное рабочее вещество (ртуть, цезий и т. д.). Важно уяснить, какие свойства этих веществ дают им предпочтение по сравнению с водой (водяным паром).

### **Контрольные вопросы**

59. Цикл Карно паросиловой установки.
60. Цикл Ренкина.
61. Пути повышения термического КПД паросиловой установки.
62. Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела в паросиловых установках.
63. Тепловая схема ТЭЦ.
64. Сущность бинарного цикла.

**Литература:** [1, гл.11 ♣ § 11.1 – 11.7].

### ***3.9. Циклы холодильных установок***

Изучить данную схему следует с обратного цикла Карно как эталонного и его холодильного коэффициента  $\varepsilon$ . Далее необходимо уделить особое внимание воздушной холодильной установке, разобраться в назначении детандера и почему его нельзя заменить дроссель-вентилем. Следует уяснить преимущества и недостатки других холодильных установок (парокомпрессионной, парозежекторной) по сравнению с воздушной.

В настоящее время в технике используется большое количество различных хладагентов. Следует оценить их достоин-

ства и недостатки, обратив особое внимание на особенности их фазовых превращений в процессах, входящих в цикл холодильной установки.

Следует изучить цикл теплового насоса и оценить возможность его применения для отопления и других нужд.

### **Контрольные вопросы**

65. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент.
66. Принципиальная схема воздушной холодильной установки.
67. Парокомпрессионная холодильная установка.
68. Преимущества и недостатки парожеткаторной холодильной установки по сравнению с парокомпрессионной.
69. Принцип действия теплового насоса.
70. Современные хладагенты.

**Литература:** [1, гл.13 ♣ § 13.1 – 13.5, 13.7].

### ***3.10. Основы химической термодинамики***

Основу химической термодинамики составляет приложение первого и второго законов термодинамики, а также закона Нернста к процессам, в ходе которых совершаются химические преобразования. Термодинамическая система имеет здесь дополнительную степень свободы, связанную с изменением химического состава вещества, поэтому химические реакции могут протекать при фиксированном значении двух параметров. Следует также учитывать, что в понятие «обратимость химической реакции» вкладывается иной смысл, чем тот, который содержит понятие «обратимость термодинамических процессов».

### **Контрольные вопросы**

71. Первый закон термодинамики для химически активной системы.

72. Тепловая теория Нернста.  
73. Третий закон термодинамики.

**Литература:** [1, гл.15, § 15.1, 15.2, 15.4].

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

##### Контрольная работа № 1

Контрольная работа № 1 состоит из четырех задач и контрольных вопросов, номера которых приведены в табл. 9.

**Задача 1.** В сосуде объемом  $V$ , м<sup>3</sup>, находится  $m_1$ , кг, кислорода,  $m_2$ , кг, азота и  $m_3$ , кг, водорода при температуре  $t$ , °С.

**Рассчитать:** массовые и объемные доли компонентов, парциальное и полное давление в сосуде, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси при НФУ.

Значения  $V$ ,  $m_1$  выбрать из табл. 1 по последней цифре шифра.

Т а б л и ц а 1

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , м <sup>3</sup>	0,6	1,0	2,5	3,0	4,5	5,0	6,5	7,0	8,5	9,0
$m_1$ , кг	6,0	5,0	5,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0

Значения  $t$ ,  $m_2$  и  $m_3$  принять по табл. 2 по предпоследней цифре шифра.

Т а б л и ц а 2

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$m_2, \text{кг}$	1,0	3,0	2,0	5,0	4,0	7,0	6,0	9,0	8,0	10,0
$m_3, \text{кг}$	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	1,0	0,5	1,0	1,5

**З а д а ч а 2.**  $m, \text{кг}$ , газа при начальном давлении  $p_1$  и начальной температуре  $t, ^\circ\text{C}$ , расширяется до пятикратного увеличения объема по изобаре, изотерме и адиабате.

**Рассчитать:** объем газа в начале и конце расширения; конечные давления и температуру газа; работу, получаемую в процессе; количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и энтропии для всех трех случаев расширения.

Род газа и давление  $p_1$  принять из табл. 3 по последней цифре шифра.

Т а б л и ц а 3

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1, \text{МПа}$	0,6	0,5	0,65	0,7	0,45	0,55	0,35	0,3	0,3	0,75
Газ	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2$

Массу газа  $m$  и температуру  $t_1$  принять из табл. 4 по предпоследней цифре шифра.

Т а б л и ц а 4

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m, \text{кг}$	3	5	6	9	11	13	15	17	19	20
$t_1, ^\circ\text{C}$	15	25	20	30	35	40	10	20	30	35



**Задача 3.** Водяной пар с параметрами, указанными в табл. 5, изменяет свое состояние по процессам, указанным в этой же таблице. Конечные параметры пара представлены в табл. 6.

**Следует определить:** состояние пара в начале и конце процесса и его параметры в этих точках; работу, совершаемую в процессе; количество теплоты, участвующей в процессе; изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии.

**Примечание.** Параметры пара определяются с помощью  $h$ - $s$ -диаграммы. Процесс изменения состояния и конечные параметры пара нанести на  $h$ - $s$ -диаграмму.

Т а б л и ц а 5

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_1$ , кДж/кг	3600				3000				2300	
$s_1$ , кДж/(кг·К)		7			6,55			6,8		6,0
$x_1$		0,85		0,95			0,92			
$t_1$ , °С	520		150	210				200		
$p_1$ , МПа			0,1			1,0				2,0
$m_1$ , м <sup>3</sup> /кг						0,25	1,0		1,0	
Процесс (const)	v	s	s	v	p	s	p	v	s	p

Т а б л и ц а 6

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_2$ , кДж/кг			2600		2500					2900
$x_2$	0,9			0,82				0,98	1,0	
$t_2$ , °С		450				400	350			

**Задача 4.** Влажный воздух массой  $m$ , кг, при давлении 745 мм рт. ст. с относительной влажностью  $\varphi_1$  и при температуре  $t_1$  изменяет свое состояние по процессам, указанным в

табл. 7. Определить все недостающие параметры воздуха в начале и в конце процесса (энтальпию, температуру, относительную влажность, точку росы, влагосодержание), газовую постоянную воздуха, молекулярную массу и количество теплоты, участвующей в процессе.

П р и м е ч а н и е. Параметры воздуха определяются с помощью h-d-диаграммы. Диаграмма с нанесенным графиком решения прилагается к решению задачи.

Начальные параметры воздуха и процесс выбрать по табл. 7 по последней цифре шифра.

Т а б л и ц а 7

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	60	65	70	75	40	75	70	65	60	50
$\varphi_1, \%$	20	15	10	5	40	5	5	10	15	20
процесс (const)	d	$\varphi$	$p_n$	d	$p_n$	$t_p$	d	d	$\varphi$	$p_n$

Количество воздуха  $m$  и конечную температуру  $t_2$  выбрать из табл. 8 по предпоследней цифре шифра.

Т а б л и ц а 8

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m, \text{кг}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$t_2, ^\circ\text{C}$	15	20	10	15	25	30	20	10	5	0

Контрольные вопросы выбрать из табл. 9 по последней цифре шифра.

Таблица 9

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первый вопрос	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Второй	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Третий	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Четвертый	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

## Контрольная работа № 2

Контрольная работа № 2 состоит из одной задачи “Расчет сопла Лавала” и контрольных вопросов, номера которых приведены в табл. 12.

### З а д а ч а

#### Известны:

секундный расход воздуха	$m$ , кг/с;
начальные параметры воздуха :	$p_1$ , МПа;
	$t_1$ , °С;
	$\varphi_1$ , %
состав сухого воздуха по объему	%;
давление воздуха на выходе из сопла	$p_2 = 0,1$ МПа;
угол раствора	$\alpha = 11$
скоростной коэффициент	$\psi = 0,95$ .

#### Требуется:

- 1) рассчитать размеры сопла Лавала  $d_{\min}$ ,  $d_2$ ,  $l_2$  (рис.1);
- 2) определить скорость и термодинамические параметры воздуха на входе, в самой узкой части и на выходе из сопла ( $T$ ,  $v$ ,  $\omega$ );
- 3) показать качественную картину изменения давления, скорости и удельного объема по длине сопла;

4) изобразить в Т-s-координатах процесс адиабатного расширения воздуха в сопле с учетом трения.

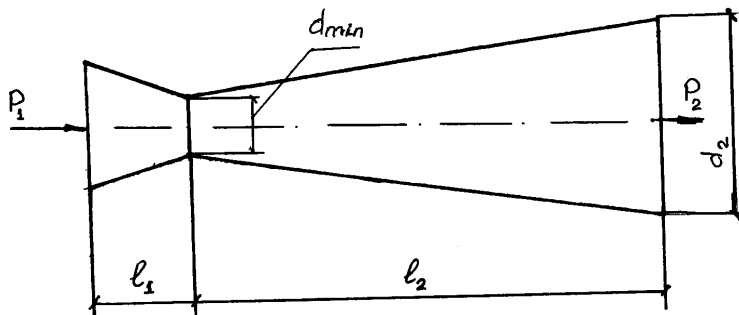


Рис. 1. Сопло Лавалья

Значения исходных величин для решения задачи выбираются из табл. 10 и 11 по предпоследней цифре номера группы, номер варианта – по сумме чисел, расположенных за дробной чертой, например: группа 310418/86 – исходные величины выбираются по цифре 1, а номер варианта – 14 (по сумме чисел  $8 + 6 = 14$ ).

Т а б л и ц а 10

№ вариантов	Предпоследняя цифра номера группы			
	1			
	m, кг/с	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$\varphi_1$ , %
1	2	3	4	5
1	3,2	4,3	55	50
2	2,8	3,0	6,1	47
3	4,2	4,7	68	43
4	3,0	4,6	66	48
5	2,1	3,5	60	55
6	1,9	3,4	59	44
7	4,0	4,5	63	58
8	1,5	3,0	56	53
9	2,9	3,2	62	49

Продолжение табл.10

1	2	3	4	5
10	3,5	4,2	64	51
11	2,5	3,1	50	45
12	1,7	3,6	66	42
13	3,9	4,6	59	50
14	1,8	3,4	57	40
15	2,3	4,4	63	44
16	2,7	4,1	52	46
17	3,8	4,2	61	55
18	4,1	4,7	62	43
19	3,4	3,8	58	54
20	1,6	3,2	55	50
21	2,4	3,3	60	58
22	2,2	4,0	58	41
23	2,5	3,4	42	51
24	2,1	3,5	49	43
25	2,7	4,0	35	60
26	2,8	3,5	60	30
27	2,5	4,2	24	36
28	2,3	4,3	20	50
29	1,9	3,4	26	50
30	1,8	3,2	28	56

Продолжение табл.10

№ вариантов	Предпоследняя цифра номера группы			
	2			
	m, кг/с	p <sub>1</sub> , МПа	t <sub>1</sub> , °С	φ <sub>1</sub> , %
1	1,8	3,4	61	56
2	2,3	4,0	36	70
3	2,7	4,2	40	30
4	3,6	4,4	18	70
5	3,4	3,8	26	50
6	1,6	3,2	32	60

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5
7	2,4	3,3	36	50
8	1,5	3,7	14	60
9	1,7	3,9	20	40
10	2,3	4,4	30	50
11	2,7	4,1	34	30
12	1,9	3,5	28	40
13	1,8	3,4	30	70
14	2,9	3,2	26	80
15	2,8	4,3	40	50
16	1,6	3,2	38	60
17	2,5	3,1	36	20
18	3,4	3,8	32	40
19	3,0	4,6	18	60
20	2,9	3,0	20	50
21	1,9	2,9	16	80
22	2,1	4,4	18	70
23	3,2	4,3	14	60
24	1,5	3,7	25	70
25	4,0	4,5	16	40
26	3,0	4,6	63	41
27	3,2	4,3	50	47
28	2,8	3,0	57	50
29	4,2	4,1	61	48
30	2,1	3,6	59	52

№ вариантов	Предпоследняя цифра номера группы			
	3			
	m, кг/с	p <sub>1</sub> , МПа	t <sub>1</sub> , °C	φ <sub>1</sub> , %
1	3,2	4,3	14	60
2	1,5	3,7	16	60
3	4,0	4,5	16	40
4	2,1	4,4	18	80
5	1,5	3,0	20	40
6	2,5	4,2	30	30
7	2,3	4,3	22	30
8	1,9	3,4	26	40
9	1,8	3,2	26	60
10	2,3	4,4	36	50
11	1,7	3,6	36	70
12	3,4	4,5	24	20
13	3,3	4,3	24	30
14	3,9	4,6	24	50
15	2,4	3,3	12	50
16	2,9	3,0	14	40
17	2,7	4,1	16	20
18	1,6	3,2	34	30
19	4,0	4,7	38	30
20	2,8	3,0	40	30
21	1,9	3,4	44	40
22	4,1	4,8	46	10
23	3,2	4,3	50	48
24	2,8	3,0	60	49
25	4,2	4,7	65	44
26	3,0	4,6	63	41
27	1,8	3,4	61	70
28	2,3	4,0	59	66
29	2,7	4,2	36	40
30	3,6	3,8	32	58

Т а б л и ц а 11

Компоненты	Предпоследняя цифра номера группы		
	1	2	3
	Состав воздуха по объему в %		
N <sub>2</sub>	78,09	77,81	76,93
O <sub>2</sub>	20,90	20,18	21,07
H <sub>2</sub>	0,93	1,16	0,97
CO <sub>2</sub>	0,03	0,825	0,46
SO <sub>2</sub>	0,05	—	—
Ar	—	0,025	0,57

Контрольные вопросы выбрать из табл. 12 по последней цифре шифра.

Т а б л и ц а 12

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первый вопрос	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Второй вопрос	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Третий вопрос	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70



ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а П I I

Молекулярные массы, плотности, объемы киломолей при нормальных физических условиях и газовые постоянные некоторых газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса $\mu$ , кг/кмоль	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Объем киломоля $\mu_{\text{в}}$ , м <sup>3</sup> /кмоль	Газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)
Воздух	–	28,960	1,293	22,40	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,000	1,429	22,39	259,8
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот <sup>1</sup>	N <sub>2</sub>	28,160	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,0030	0,179	22,42	2078
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,0160	0,090	22,43	4124
Окись углерода	CO	28,010	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44,010	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,060	2,926	21,89	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	–	11,500	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

<sup>1</sup> Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

<sup>2</sup> Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.

## Мольная теплоемкость некоторых газов, кДж/(кмоль·К)

t, °C	Воздух		Кислород		Азот		Водород		Водяной пар		Окись углерода		Диоксид углерода	
	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$	$\mu C_{pm}$	$\mu C_{vm}$
0	29,70	20,76	29,27	20,96	29,12	20,81	28,62	20,31	33,50	25,19	29,12	20,81	35,86	27,55
100	29,15	20,84	29,54	21,23	29,16	20,85	28,94	20,63	33,74	25,43	29,18	20,87	38,11	29,80
200	29,30	20,99	29,93	21,62	29,25	20,94	29,07	20,76	34,12	25,81	29,30	20,99	40,06	31,75
300	29,52	21, 21	30,40	22,09	29,38	21,07	29,12	20,81	34,58	26,27	29,52	21,21	41,76	33,45
400	29,79	21,48	30,88	22,57	29,60	21,29	29,19	20,88	35,09	26,78	29,79	21,48	43,25	34,94
500	30,09	21,78	31,33	23,02	29,86	21,55	29,25	20,64	35,63	27,32	30,10	21,79	44,57	36,26
600	30,40	22,09	31,76	23,45	30,15	21,84	29,32	21,01	36,20	27,89	30,43	22,12	45,75	37,44
700	30,72	22,41	32,15	23,84	30,45	22,14	29,41	21,09	36,79	28,47	30,75	22,44	46,81	38,50
800	31,03	22,72	32,50	24,19	30,75	22,44	29,52	21,20	37,39	29,08	31,07	22,76	47,76	39,45
900	31,32	23,01	32,82	24,51	31,04	22,73	29,65	21,23	38,01	29,69	31,38	23,06	48,62	40,30
1000	31,60	23,29	33,12	24,81	31,31	23,00	29,79	21,47	38,62	30,30	31,67	23,35	49,39	41,08
1200	32,11	23,80	33,63	25,32	31,83	23,52	20,11	21,79	39,83	31,51	32,19	23,88	50,74	42,43
1400	32,56	24,25	34,08	25,77	32,29	23,98	30,47	22,15	40,98	32,66	32,65	24,24	51,86	43,54
1600	32,97	24,66	34,48	26,17	32,70	24,39	30,83	22,52	42,06	33,74	33,05	22,74	52,80	44,49
1800	33,32	25,01	34,83	26,52	33,06	24,75	31,19	22,88	43,07	34,76	33,40	25,09	53,60	45,29

Т а б л и ц а ПЗ

Сухой насыщенный водяной пар и вода на кривой насыщения (по давлениям)

р, МПа	$t_n,$ °С	$v',$ м <sup>3</sup> /кг	$v'',$ м <sup>3</sup> /кг	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/кг	г, кДж/кг	$S',$ кДж/(кг·град)	$S'',$ кДж/(кг·град)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,001	6,9360	0,001000	130,040	0,0079	29,180	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,002	17,486	0,001001	67,240	0,0148	73,400	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,001002	54,420	0,0184	88,360	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,003	24,078	0,001003	45,770	0,0219	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,004	29,950	0,001004	34,930	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,005	32,890	0,001005	28,240	0,0354	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,006	36,170	0,001007	23,770	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,007	41,530	0,001009	18,130	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,010	45,820	0,001010	14,700	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,570	0,001013	10,690	0,0935	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,018	57,820	0,001016	8,4500	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,080	0,010170	7,6500	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,990	0,001019	6,2010	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,030	69,120	0,001022	5,2300	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,040	75,870	0,001026	4,0000	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,050	81,330	0,001029	3,2400	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,060	85,940	0,001033	2,7300	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,080	93,500	0,001038	2,0009	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,100	99,620	0,001043	1,6960	0,5896	417,47	2674,9	2257,9	1,3026	7,3579
0,120	104,80	0,001047	1,4300	0,6992	439,34	2683,6	2243,6	1,3610	7,2972
0,160	113,31	0,001054	1,0920	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,200	120,23	0,00106	0,8860	1,1290	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,260	128,73	0,001068	0,6930	1,4430	541,20	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,300	133,54	0,001073	0,6060	1,6520	561,70	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,400	143,62	0,001084	0,46230	2,1630	604,30	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,500	151,84	0,001093	0,37490	2,6670	640,10	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0,600	158,84	0,001101	0,31560	3,1690	670,60	2756,0	2086,3	1,9311	6,7609
0,800	170,41	0,001115	0,24030	4,1610	720,90	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
1,000	179,88	0,001127	0,19450	5,1430	762,40	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1,200	187,95	0,001139	0,16330	6,1250	798,40	2784,6	1986,2	2,2156	6,5244
1,400	195,04	0,001149	0,14080	7,1020	830,00	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,600	201,36	0,001159	0,12380	8,0800	858,30	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,800	207,10	0,001168	0,11040	9,0550	884,20	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
2,000	212,37	0,001177	0,09961	10,040	908,60	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
2,400	221,77	0,001193	0,08324	12,010	951,20	2801,8	1850,8	2,5346	6,2727
2,800	230,04	0,001209	0,07142	14,000	990,20	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3,000	233,82	0,001216	0,06663	15,010	1008,4	2803,5	1794,7	2,6456	6,1859

Окончание табл. ПЗ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,500	242,54	0,001234	0,05706	17,530	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
4,000	250,33	0,001252	0,04977	20,090	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,000	263,91	0,001286	0,03943	25,360	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
6,000	275,56	0,001319	0,03243	30,840	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7,000	285,80	0,001351	0,02738	36,530	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8,000	294,98	0,001384	0,02352	42,520	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9,000	303,31	0,001417	0,02049	48,800	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10,00	310,96	0,001452	0,01803	55,470	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11,00	318,04	0,001489	0,01597	62,620	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
12,00	324,64	0,001527	0,01426	70,150	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
13,00	330,81	0,001568	0,01278	78,220	1531,3	2662,9	1131,1	3,5606	5,4333
14,00	336,63	0,001611	0,01149	87,040	1570,8	2637,9	1067,0	3,6244	5,3731
16,00	347,32	0,001710	0,00932	107,30	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18,00	356,96	0,001839	0,00751	133,20	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20,00	365,72	0,002030	0,00586	170,50	1826,8	2410,3	583,44	4,0147	4,9280
22,00	373,71	0,002690	0,00378	265,00	2009,7	2195,6	185,9	4,2943	4,5815



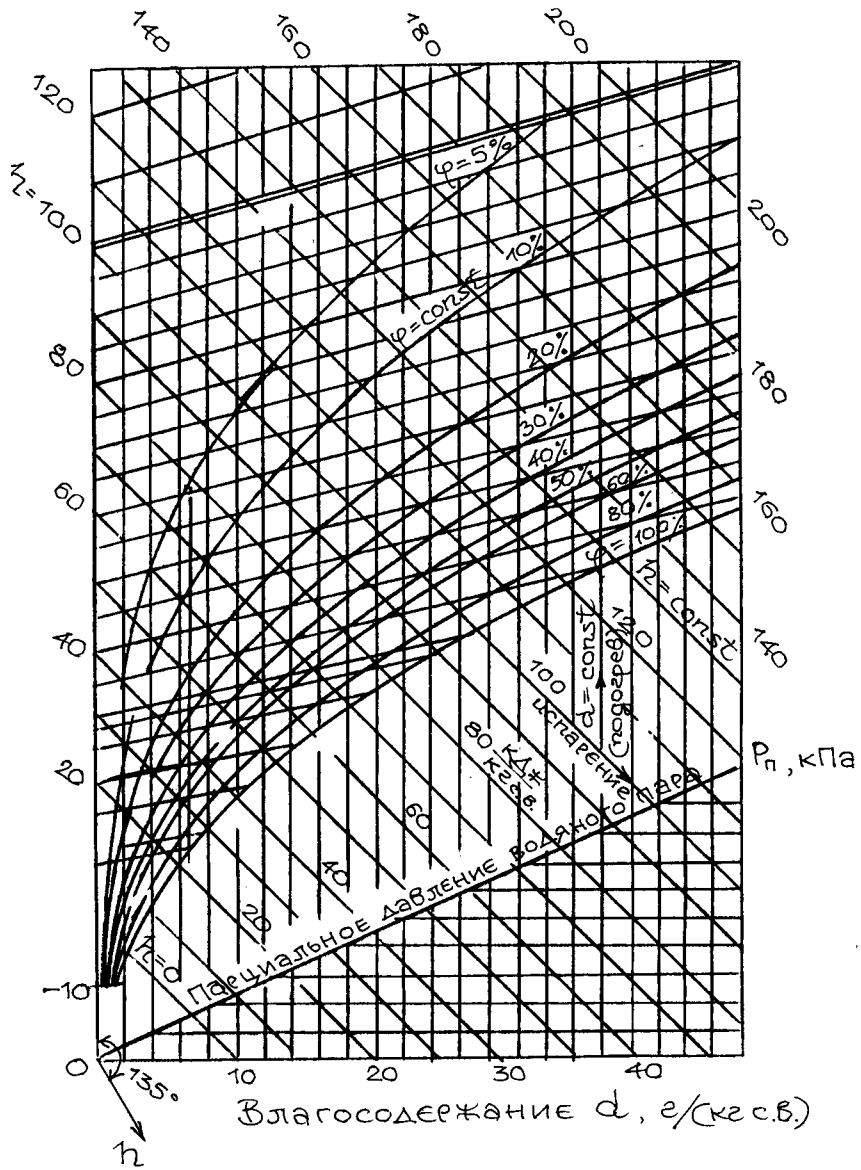


Рис. П4.2. h-d-диаграмма влажного воздуха

## С о д е р ж а н и е

1. Общие указания. ....	3
Литература . . . . .	4
2. Программа курса. ....	5
3. Методические указания по изучению отдельным тем курса. Контрольные вопросы. ....	11
4. Контрольные работы. ....	23
Контрольная работа № 1. ....	23
Контрольная работа № 2. ....	27
Приложение. ....	33



Учебное издание

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Программа, методические указания и контрольные задания  
для студентов заочного обучения  
специальности 1–70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция  
и охрана воздушного бассейна»

Составители: СТАНЕЦКАЯ Ирина Ивановна  
АКАЛЬБЕВ Валерий Дмитриевич  
КАЛИНИЧЕНКО Екатерина Сергеевна

Редактор О.Н. Воробьева

Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

---

Подписано в печать 11.02.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл.печ.л. 2,3. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 100. Заказ 516.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ № 155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.