

3025



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

# **ТЕПЛОТЕХНИКА**

(Раздел дисциплины  
«Теплотехника и теплотехническое  
оборудование»)

*Программа, методические указания и задания  
к курсовой работе*

**Минск 2006**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Теплогасоснабжение и вентиляция»

ТЕПЛОТЕХНИКА  
(Раздел дисциплины  
«Теплотехника и теплотехническое оборудование»)

Программа, методические указания и задания к курсовой работе  
для студентов заочного обучения  
специальности 1-70 01 01 «Производство строительных изделий  
и конструкций»

Минск 2006

Составители:

Л.В. Нестеров, А.И. Орлович

Рецензенты:

И.И. Станецкая, В.В. Бабицкий

Издание составлено согласно типовой программе курса «Теплотехника и теплотехническое оборудование технологии строительных материалов», утвержденной учебно-методическим объединением по инженерно-строительным дисциплинам. В него включены программа курса по разделу «Теплотехника», перечень основных и дополнительных учебников и учебных пособий, методические указания по изучению отдельных разделов и тем, вопросы и задачи для курсовой работы. Даны вспомогательные материалы для определения параметров водяного пара, влажного воздуха и воды.

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Согласно учебному плану для изучения дисциплины «Теплотехника» отводится 20 часов, из которых 12 лекционных, 8 лабораторных (проводятся в период экзаменационной сессии). При изучении курса требуется выполнить одну курсовую работу.

Удание составлено таким образом, чтобы помочь студенту самостоятельно освоить данную дисциплину. Оно содержит не только перечень основных вопросов курса (содержание дисциплины), но и указания студенту как работать над курсом и на что обратить особое внимание.

При изучении дисциплины необходимо хорошо усвоить теоретические основы предмета, научиться применять теорию при решении практических задач.

При работе с книгой студенту следует научиться выделять главное в тексте, разбираться в выводах формул, внимательно рассматривать иллюстративный материал (чертежи, схемы, рисунки, диаграммы).

Весь курс теплотехники разделен на отдельные темы, в конце которых приведены контрольные вопросы.

При выполнении курсовой работы необходимо соблюдать следующие требования:

1. На титульном листе указать фамилию и инициалы автора, номер 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. Если решение задачи производится по  $h-s$  или  $h-d$  диаграммам, то необходимо представить выкопировки из диаграмм с указанием стрелками хода решения.

6. Пояснительная записка должна иметь поля для заметок.

Внося и защищая курсовую и лабораторные работы, студент допускается к сдаче экзамена по дисциплине «Теплотехника» в объеме программы.

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. Термодинамика / Под ред. Б.М. Хрусталева. – М.: УП «Техно-принт», 2004.
2. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Теплотехника / Под ред. В.И. Крутого. – М.: Машиностроение, 1986.
4. Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутого. – М.: Высшая школа, 1991.
5. Кириллин, В.А., Сычев, В.В., Шейндлиц, А.Е. Техническая термодинамика: учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1981.
7. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под. ред. В.Н. Юдаева. – М.: Высшая школа, 1968.

### *Дополнительная*

1. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1988.
2. Юдаев, Б.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1978.
3. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под ред. В.И. Крутова, Г.Б. Петражицкого. – М.: Высшая школа, 1986.
4. Расчеты теплового режима твердых тел // Энергия, 1976

# 1. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цели и задачи дисциплины

Теплотехника – общетехническая дисциплина для подготовки инженера-строителя-технолога по специальности 1-70 01 01 «Производство строительных материалов и изделий», которая включает два раздела: техническую термодинамику и основы теплообмена.

Целью дисциплины является изучение теоретических основ процесса переноса теплоты в различных условиях, развитие навыков и умения применять основные закономерности термодинамики и теплопередачи для решения задач в области производства строительных материалов. Инженерно-технический персонал должен хорошо овладеть знаниями по рациональному использованию теплоты в технологических процессах и пути ее экономии.

Освоение дисциплины «Теплотехника» базируется на знаниях студентов, полученных из общенаучных и общеинженерных дисциплин учебного плана специальности 1-70 01 01, таких как «Высшая математика», «Физика», «Химия» и др. Изучение теплотехники входит в базовую подготовку, необходимую для усвоения основных дисциплин специальности: технологии бетона и железобетона, автоматизации технологических процессов и др.

## 1.2. Содержание дисциплины

### 1.2.1. Введение

Основные виды энергии, способы трансформации. Экономические и экологические аспекты использования энергии. Энергосбережение при производстве строительных материалов и изделий.

### 1.2.2. Водяной пар

Фазовая диаграмма. Процесс парообразования. Параметры воды и водяного пара.  $h$ - $s$ -диаграмма и таблицы параметров воды и водяного пара.

### 1.2.3. Влажный воздух

Состав и параметры влажного воздуха.  $h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха. Процессы сушки и увлажнения воздуха.

#### *1.2.4. Виды переноса теплоты*

Основные понятия и определения тепловых процессов. Движущие силы процессов переноса теплоты. Основные силы переноса теплоты, Температурное поле.

#### *1.2.5. Теплопроводность*

Закон Фурье. Теплопроводность плоской одно- и многослойной стенки при стационарных условиях. Термическое сопротивление слоя материала, конструкции.

#### *1.2.6. Конвективный теплообмен*

Физические основы конвективного теплообмена. Уравнение процесса. Коэффициент теплоотдачи. Теплообмен при свободном и вынужденном движении среды. Критериальные уравнения и расчетные формулы теплообмена при различных видах и режимах движения среды. Теплообмен при конденсации водяного пара. Критериальные уравнения и расчетные формулы.

#### *1.2.7. Теплообмен излучением*

Физические основы теплообмена излучением. Основные законы теплового излучения. Теплообмен между поверхностями, разделенными средой. Влияние экранов на интенсивность теплообмена.

#### *1.2.8. Физический процесс теплопередачи*

Понятие общего сопротивления теплопередачи. Коэффициент теплопередачи. Теплопередача через одно- и многослойную стенку при стационарных тепловых условиях. Теплопроводность при нестационарных тепловых условиях. Методы определения температурного поля. Метод конечных разностей. Виды теплообменных аппаратов. Основные принципы расчета теплообменных аппаратов.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### Основные понятия и определения

#### 2.1. Введение

Техническая термодинамика рассматривает закономерности взаимного превращения теплоты в работу, не затрагивая тепловых процессов, связанных с химическими, электрическими и другими явлениями, изучает законы движения и превращения энергии, тепло- и массообмена в макросистемах без учета поведения каждой отдельной частицы.

При изучении раздела «Техническая термодинамика» следует усвоить следующие основные понятия. Предмет и метод термодинамики, термодинамическая система, вид систем и их состояние. Интенсивные и экстенсивные параметры состояния и связь между ними. Уравнение состояния. Термодинамический процесс. Первый и второй законы термодинамики. Физическая сущность второго закона термодинамики. Внутренняя энергия, теплота, работа, энтальпия, энтропия и теплоемкость газов, жидких и твердых тел. Процессы идеальных газов.

В качестве рабочих тел для практического осуществления превращения тепла в работу используются газы и пары. Поэтому техническая термодинамика изучает процессы, связанные с изменением состояния газов и пара. Необходимо представлять различие между идеальными и реальными газами, уяснить возможности использования законов идеального газа в практических расчетах газов, если последние по своему состоянию далеки от состояния насыщения.

В качестве примеров использования зависимостей технической термодинамики должны быть проработаны термодинамика потока, истечение и дросселирование газов и пара, анализ процессов в компрессорах и двигателях внутреннего сгорания.

При изучении второго раздела дисциплины «Основы теплообмена» должны быть изучены три способа распространения теплоты в пространстве: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

При изучении конвективного теплообмена следует обратить внимание на физику явления переноса теплоты вместе с массой вещества при свободном и вынужденном течении среды.

В заключении следует обратить внимание на использование законов теплообмена в теплообменных аппаратах: сушилках, в установках для тепловой обработки бетона и других.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие вопросы изучает термодинамика?
2. Какими основными параметрами характеризуется состояние системы и какой их физический смысл?
3. Какие существуют уравнения состояния идеального газа и какой физический смысл входящих в них величин?
4. Что понимается под идеальным газом?
5. Что понимается под термодинамической системой?
6. Какими способами может осуществляться обмен энергией между системой и окружающей средой и какая между ними разница?
7. Какая разница между интенсивными и экстенсивными параметрами состояния?
8. Что понимается под термодинамическим процессом?
9. Что такое равновесная система и чем она отличается от неравновесной?
10. Формулировка и аналитическое выражение первого закона термодинамики.
11. В чем состоит физическая сущ. различия между первым и вторым законом термодинамики?

### *2.2. Водяной пар*

Физическое поведение паров в области близкой к состоянию насыщения сильно отклоняется от законов идеальных газов, и поэтому они не применимы для реальных газов. Реальный газ приближается к идеальному при малых давлениях и высоких температурах. Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает лишь качественные особенности реальных газов. Поэтому расчет процессов для реальных газов проводится либо по таблицам их термодинамических свойств, либо по диаграммам.

Примером реального газа является водяной пар, который образуется из воды в результате фазового перехода. Процесс перехода жидкости в пар состоит из нескольких стадий: нагрев, кипение, парообразование. Получение пара из воды следует рассматривать в  $p$ - $v$ -координатах,  $T$ - $s$  и  $h$ - $s$ -диаграммах водяного пара, на которых эти стадии разделены пограничными кривыми, разделяющими области жидкости, влажного насыщенного и перегретого пара.

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

### *Контрольные вопросы*

12. Чем отличается уравнение состояния реального газа от уравнения состояния идеального газа?
13. Каковы последовательные стадии получения перегретого пара? Изобразите их в  $p$ - $v$ -координатах.
14. Какая разница между влажным и сухим насыщенным и перегретым паром?
15. Какими параметрами характеризуются состояния влажного, сухого и перегретого пара?

### *2.3. Влажный воздух*

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара и характеризуется несколькими параметрами, взаимно связанными между собой. Необходимо усвоить понятия относительной влажности, влагосодержания, абсолютной влажности, энтальпии, температуры точки росы. Графически связь между параметрами влажного воздуха представлена в  $h$ - $d$ -диаграмме, с помощью которой можно решать ряд сложных практических задач. Следует ознакомиться с основными формулами для расчета параметров влажного воздуха и научиться определять их с помощью  $h$ - $d$ -диаграммы.

### *Контрольные вопросы*

16. Основные параметры влажного воздуха.
17.  $h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха.
18. Три характерных состояния влажного воздуха.
19. Какая разница между влажным ненасыщенным и влажным насыщенным воздухом?

## *2.4. Виды переноса теплоты*

Перенос теплоты подразделяют на три вида: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. Эти формы теплообмена, как правило, изучают раздельно, однако необходимо иметь в виду, что в любой тепловой установке всегда будет иметь место перенос теплоты всеми видами теплообмена, один из которых может иметь преобладающее значение. При этом следует понять, что перенос теплоты возможен только при наличии разности температуры между системами. В связи с этим нужно усвоить понятия температурного поля, температурного градиента, теплового потока и плотности теплового потока. Изучить распространение теплоты при стационарном и нестационарном тепловых состояниях системы.

При изучении конвективного теплообмена следует обратить внимание на физику явления переноса теплоты вместе с массой вещества при свободном и вынужденном течении среды.

При тепловой обработке бетона и в ряде других технологических процессах в качестве теплоносителя используется водяной пар, поэтому следует изучить явление теплообмена при конденсации пара.

Изучаются законы переноса энергии при тепловом излучении.

В заключении следует обратить внимание на использование законов теплообмена в теплообменных аппаратах: сушилках, в установках для тепловой обработки бетона и других.

### *2.4.1. Теплопроводность*

Изучение теплопроводности начинают с разбора основного закона распространения тепла теплопроводностью - закона Фурье. Нужно хорошо усвоить понятия температурного поля и температурного градиента. Четко различать понятия стационарного и нестационарного состояния тел и чем они обуславливаются. Следует обратить внимание на физическое свойство тел проводить теплоту, которое характеризуется коэффициентом теплопроводности. Величина его зависит от многих факторов, основными из которых являются поровая структура и влажность.

Нестационарные тепловые процессы сопровождают все технологические процессы тепловой обработки материалов, поэтому на

изучение этой темы следует обратить особое внимание. При этом все нестационарные процессы теплопроводности описываются уравнением Фурье, для решения которого следует задавать условия однозначности. Необходимо уяснить, что под этим понимается.

Часто элементы тепловых установок находятся в стационарном тепловом состоянии, поэтому данному вопросу следует уделить внимание. При этом следует различать понятия теплоотдачи и теплопередачи.

### *Контрольные вопросы*

20. Что понимается под температурным полем и температурным градиентом?

21. Что такое коэффициент теплопроводности и в чем состоит его физический смысл?

22. Чем отличается стационарное тепловое состояние тела от нестационарного?

23. Объясните, почему при увеличении влажности строительных материалов коэффициент теплопроводности возрастает?

24. Почему температура в плоской однослойной стенке при постоянном коэффициенте теплопроводности изменяется по линейному закону, а в цилиндрической – по криволинейному?

25. Что такое плотность теплового потока?

### *2.4.2. Конвективный теплообмен*

Конвективный перенос тепла наблюдается в жидкостях и газах. Он обусловлен способностью жидкости и газа перемещаться в пространстве и переносить при этом теплоту. Внутри же перемещающихся объемов жидкости или газа теплота распространяется за счет теплопроводности. Совместный процесс переноса теплоты перемещающимися объемами среды и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. Интенсивность конвективного теплообмена зависит от скорости перемещения среды, которая возникает под действием разности плотностей нагретых и холодных объемов среды или под действием силовых воздействий. В связи с этим различают теплообмен при свободном и вынужденном течениях среды. Конвективный теплообмен определяется совокупностью многих

физических процессов и описывается системой дифференциальных уравнений, которую совместно с условиями однозначности практически решить нельзя. Поэтому для изучения конвективного теплообмена используется теория подобия.

Теория подобия – простое и всеобъемлющее средство изучения явлений природы. Она является теоретической основой экспериментальных исследований. Поэтому при изучении темы следует уяснить способы анализа физических процессов, на основании которых эти явления можно привести к безразмерному виду. Очень важно понять, что такое класс физических явлений, группа явлений и единичное явление.

Познакомившись с физическими особенностями переноса тепла при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости, обратите внимание на критерии подобия, входящие в критериальные уравнения, описывающие эти процессы, и на метод их расчета по определяющим геометрическим размерам и температурам. Уясните, как влияют на характер критериальных зависимостей режим движения теплоносителя (ламинарный или турбулентный) и род движения (свободный или вынужденный).

Ознакомьтесь с физической сущностью и расчетными формулами теплообмена при обтекании одиночной трубы и пучка труб. Уясните понятия локального и среднего значений коэффициента теплоотдачи. Особое внимание обратите на особенности переноса тепла через жидкостные прослойки и приемы расчета коэффициента теплоотдачи в этих условиях.

Процессы теплообмена, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния, занимают особое место среди явлений конвективного теплообмена.

При рассмотрении процесса теплообмена при конденсации чистого пара необходимо уяснить влияние пленки конденсата на интенсивность теплообмена и разобраться с особенностями капельной и пленочной конденсации.

### *Контрольные вопросы*

26. Дайте определение свободной конвекции.
27. Что понимается под конвективным теплообменом?

28. Что понимается под критерием подобия?
29. Какая разница между определяющими и неопределяющими критериями подобия?
30. В чем состоит физическое различие между свободным и вынужденным течением среды?
31. От каких факторов зависит величина коэффициента теплоотдачи при свободном течении среды?
32. В чем состоит физический смысл зависимости коэффициента теплоотдачи при свободном течении среды от произведения критериев ( $Gr \cdot Pr$ )?
33. Какими критериями определяется интенсивность теплообмена при свободном течении среды?
34. Какими критериями определяется интенсивность теплообмена при вынужденном течении среды?
35. Почему в критериальное уравнение теплообмена при ламинарном течении входит критерий  $Gr$ ?
36. Какая разница между гидродинамическим и тепловым пограничными слоями?
37. Какие существуют виды конденсации и чем они отличаются друг от друга?
38. Почему коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации меньше, чем при капельной?

### 2.4.3. Теплообмен излучением

Изучение теплообмена лучеиспусканием следует начинать с основных законов теплового излучения Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. При изучении этих законов следует уделить внимание их физической сущности. Необходимо уяснить, почему введено понятие абсолютно черного тела, и разницу между ним и серыми телами. Степень черноты тел очень часто используется при расчетах лучистого теплообмена, а поэтому необходимо твердо усвоить это понятие.

Особое внимание следует обратить на законы излучения газов. Экспериментально доказано, что интенсивность излучения газов зависит от концентрации (парциального давления) газа, объема, занимаемого газом, и температуры. Нужно понять физическую сущность

этой зависимости. Для того, чтобы уметь рассчитывать теплообмен излучением с участием газов, необходимо научиться пользоваться номограммами для определения степени черноты газа и смеси газов.

Изучая процессы теплообмена излучением между телами, следует обратить внимание на изменение интенсивности теплообмена в зависимости от расположения тел относительно друг друга. Ознакомиться с понятием углового коэффициента и приведенного коэффициента излучения системы тел.

В результате проработки данной темы студент должен научиться рассчитывать теплообмен излучением между телами с использованием физических величин, приведенных в таблицах и справочных материалах.

### *Контрольные вопросы*

39. В чем состоит физическая сущность теплового излучения?
40. Что понимается под степенью черноты поверхности твердого тела?
41. Какие зависимости устанавливаются законами Стефана-Больцмана и Вина?
42. Объясните физический смысл закона Вина?
43. Какая зависимость устанавливается законом Кирхгофа? Объясните ее физический смысл.
44. В чем состоит различие между излучением газов и поверхностью твердого тела?

### **2.5. Физический процесс теплопередачи**

При изучении вопроса теплопередачи вначале необходимо уяснить физический смысл теплопередачи и из каких процессов она состоит, усвоить понятие коэффициента теплопередачи и термического сопротивления теплопередаче, изучить, какие факторы и какое влияние оказывают на их величину.

Разделение общего процесса распространения теплоты на элементарные явления: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение является методологическим приемом. В действительности же эти явления протекают одновременно.

На практике очень часто встречаются случаи передачи теплоты от одной среды к другой через разделяющую стенку. В этом случае мы

можем наблюдать явление конвективной теплоотдачи от среды к поверхности стенки, перенос тепла через стенку за счет теплопроводности, а затем снова теплоотдачу от поверхности стенки к среде. Такого рода процессы теплообмена студент должен изучить в данной теме.

Необходимо разобраться в классификации теплообменных аппаратов по схеме передачи тепла от первичного теплоносителя ко вторичному.

В рекуперативных аппаратах теплота передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку. Примерами таких аппаратов являются некоторые воздухонагреватели, водоподогреватели и др.

Регенеративными называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается поочередно то горячим, то холодным теплоносителем. При этом теплота, аккумулированная стенками аппарата (насадкой) при охлаждении горячего теплоносителя, отдается холодному. Примером таких теплообменников могут служить регенераторы стекловаренных и мартеновских печей.

### *Контрольные вопросы*

45. Что такое сопротивление теплопередачи многослойной стенки и от каких факторов зависит его величина?
46. Что такое коэффициент теплопередачи и от каких факторов зависит его величина?
47. Что понимается под процессом теплопередачи?
48. Что понимается под коэффициентом теплоотдачи?
49. В чем существенное различие между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи?
50. На какие основные типы делятся теплообменные аппараты?

## **3. КУРСОВАЯ РАБОТА**

### *Задача 1.*

Водяной пар с параметрами, указанными в табл. 1, изменяет состояние в процессе, заданном в той же таблице. Параметры пара в конце процесса представлены в табл. 2.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_1$ , кДж/кг	3500				3000				2300	
$s$ , 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
$v_1$ , м <sup>3</sup> /кг						0,25	1,0		1,0	
Процесс (const)	$\nu$	$s$	$s$	$\nu$	$p$	$s$	$p$	$\nu$	$s$	$p$

Таблица 2

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			

**Определить и рассчитать:**

- состояние и параметры пара в начале и в конце процесса;
- работу процесса и количество теплоты, участвующее в нем;
- изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии.

**П р и м е ч а н и е.** Процесс изменения состояния пара нанести на  $h$ - $s$ -диаграмму и с ее помощью определить состояние и параметры пара в начале и в конце процесса.

**Задача 2.**

Влажный воздух массой  $M$  (кг) при давлении 745 мм рт. ст. с относительной влажностью  $\phi$  и при температуре  $t$  изменяет свое состояние по процессам, указанным в табл. 3. Определить все недостающие параметры воздуха в начале и в конце процесса (энтальпию, температуру, относительную влажность, точку росы, влагосодержание) и рассчитать газовую постоянную воздуха, молекулярную массу и количество теплоты, участвующее в процессе.

Примечание. Параметры воздуха определяются с помощью  $h-d$ -диаграммы. Диаграмма с нанесенным графиком решения прилагается к решению задачи.

Начальные параметры воздуха и процесс выбирается из табл. 3 по последней цифре шифра.

Таблица 3

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)	$d$	$\varphi$	$Pn$	$d$	$Pn$	$tp$	$d$	$d$	$\varphi$	$Pn$

Количество воздуха  $M$  и конечную температуру  $t$  выбрать из табл. 4 по предпоследней цифре шифра.

Таблица 4

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

### Задача 3.

Трехслойная панель с двух сторон омывается воздухом.

Определить общее сопротивление теплопередачи конструкции, плотность теплового потока, температуры на поверхностях панели и на границах слоев и толщину зоны промерзания конструкции.

Толщину слоев панели  $\delta$ , температуру  $t_{ж1}$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  выбрать из табл. 5 по последней цифре шифра.

Температура  $t_{ж2}$ , коэффициент  $\alpha_2$  и коэффициент теплопроводности слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – выбираются по предпоследней цифре шифра табл. 6.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta_1, \text{ м}$	0,06	0,05	0,07	0,08	0,07	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06
$\delta_2, \text{ м}$	0,20	0,21	0,18	0,16	0,19	0,21	0,21	0,20	0,22	0,24
$\delta_3, \text{ м}$	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,03	0,07	0,04	0,05
$t_{ж1}, \text{ }^\circ\text{C}$	18	19	20	21	22	21	20	19	18	17
$\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	4	5	6	5	6	4	3	4	5	7

Таблица 6

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_1, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	1,1	0,9	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,0	0,9	0,8
$\lambda_2, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06
$\lambda_3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,9	0,9	0,8	1,0
$t_{ж2}$	-20	-28	-24	-25	-21	-23	-22	-24	-17	-19
$\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	5,0	4,0	4,5	5,5	6,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0

**Задача 4.**

Железобетонная панель высотой  $H$  с температурой на поверхностях  $t_n$  охлаждается воздухом с  $t_{ж}$  за счет естественной конвекции и теплового излучения. Рассчитать общий коэффициент теплоотдачи у поверхности панели. Высота панели  $H$  и температура панели  $t_n$  выбирается из табл. 7 по последней цифре шифра.

Таблица 7

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H, \text{ м}$	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6
$t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	60	70	80	65	75	85	80	70	60	90

Температуру охлаждающего воздуха  $t_{ж}$  и степень черноты поверхности панели  $\epsilon$  выбрать по предпоследней цифре шифра в табл. 8.

Таблица 8

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	0	10	15	20	25	5	10	15	20	0
$\epsilon$	0,6	0,7	0,8	0,65	0,75	0,85	0,87	0,9	0,86	0,83

**Задача 5.**

Бетонная панель толщиной  $\delta$  с теплофизическими характеристиками  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  имеет в начальный момент времени по сечению одинаковую температуру  $t_0$ . Панель охлаждается с двух сторон воздухом с температурой  $t_{ж}$  и коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Рассчитать методом конечных разностей распределение температуры по сечению через  $\tau$  часов и количество отданной теплоты.

Толщину панели и ее теплофизические характеристики выбрать по последней цифре шифра в табл. 9.

Таблица 9

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta, \text{м}$	0,26	0,32	0,35	0,25	0,30	0,28	0,35	0,32	0,3	0,25
$t_0, ^\circ\text{C}$	60	70	80	65	70	75	85	80	75	70
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	1,8	1,9	2,0	0,9	0,8	1,0	0,7	0,6	0,9	1,0
$c, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	1,0	1,1	1,2	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	0,8	0,9
$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	1800	1900	2000	1000	900	1100	800	700	850	1000

Температуру воздуха  $t_{ж}$ , коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и время охлаждения  $\tau$  выбрать по предпоследней цифре шифра из табл. 10.

Таблица 10

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	10	5	0	5	10	15	20	15	10	0
$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	3,0	3,5	4,0	4,5	4,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$\tau, \text{ч}$	5	6	3	4	5	4	3	4	5	5

Примечание. Панель следует делить на нечетное число слоев (не менее пяти).

### *Контрольные вопросы*

Номера контрольных вопросов выбрать из табл. 11 по последней цифре шифра.

Таблица 11

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
Пятый	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### *Параметры сухого насыщенного водяного пара и воды на кривой насыщения (по давлениям)*

$P$ , Мпа	$t_m$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг · К)	$s''$ , кДж/(кг · К)
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
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

Окончание прил. 1

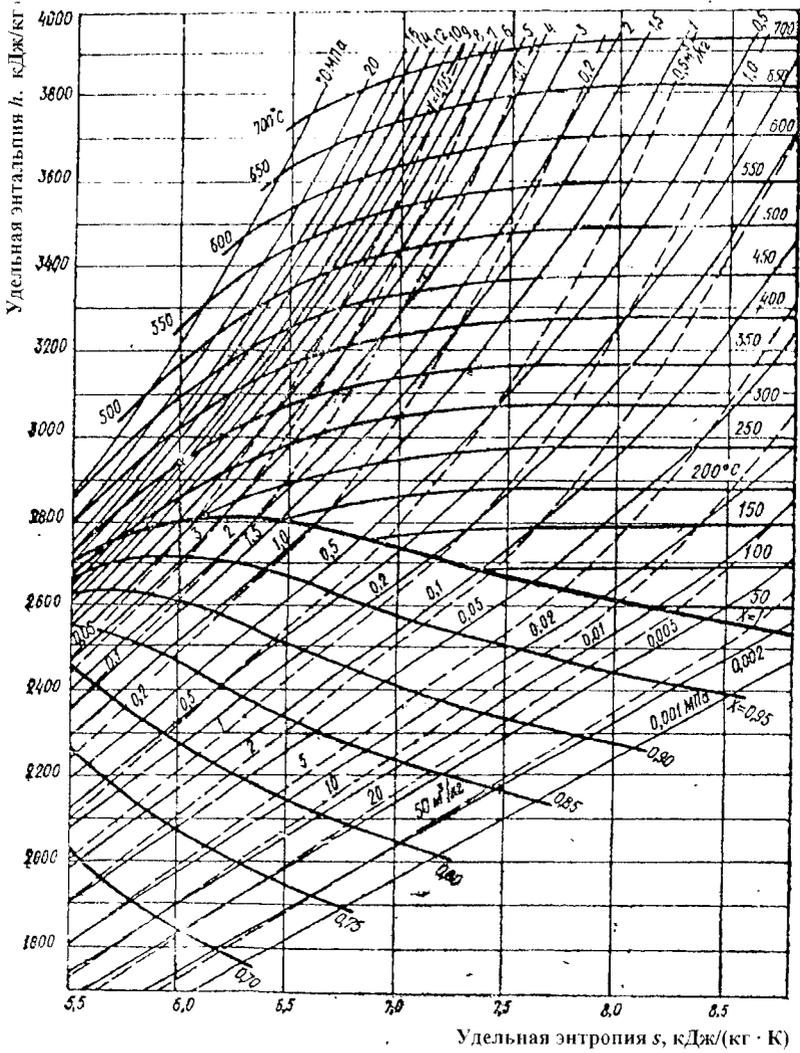
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,200	187,95	0,001139	0,16330	6,1250	798,40	2784,6	1986,2	2,2156	6,5244
1,400	195,04	0,001149	0,14080	7,1020	830,00	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,600	201,36	0,001159	0,12380	8,0800	858,30	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,800	207,10	0,001168	0,11040	9,0550	884,20	2796,5	1912,3	2,3975	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

Приложение 2

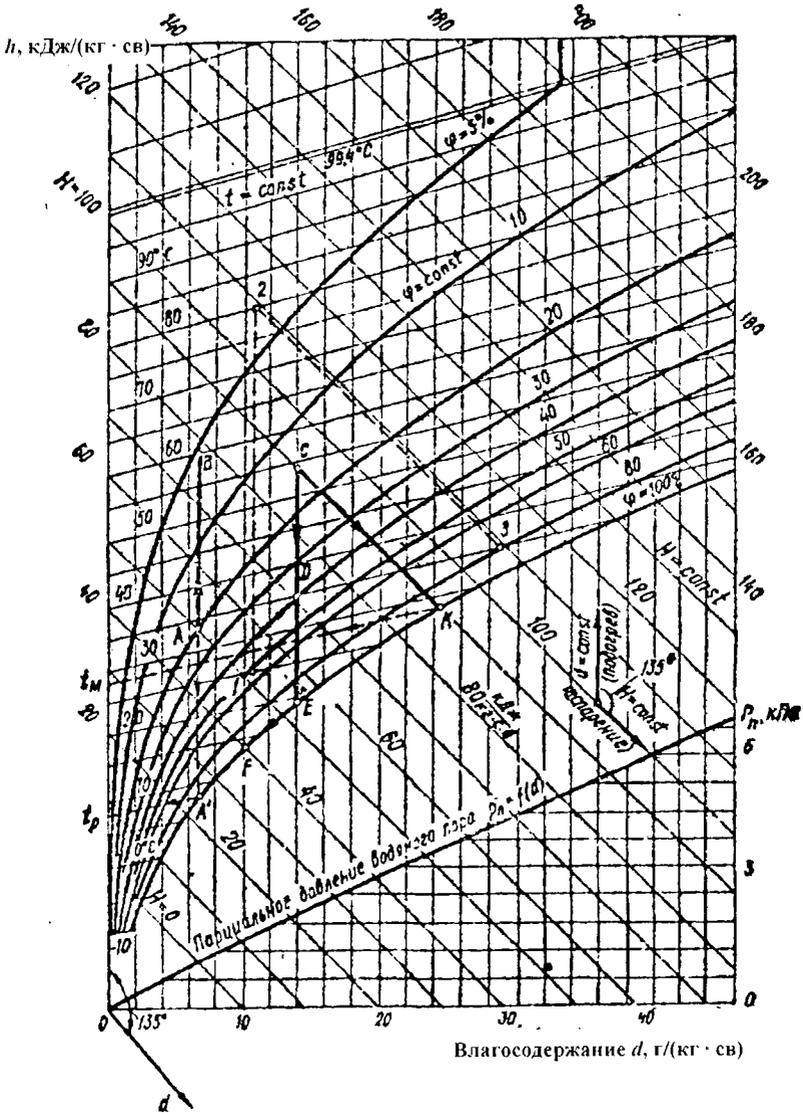
*Физические параметры для сухого воздуха  
при давлении 0,1015 МПа*

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг · К)	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$\alpha \cdot 10^5$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
1	2	3	4	5	6	7
-30	1,453	1,013	0,0220	1,492	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	0,0228	1,620	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	0,0236	1,745	12,43	0,712
0	1,293	1,005	0,0244	1,881	13,28	0,707
10	1,247	1,005	0,0251	2,006	14,16	0,705
20	1,205	1,005	0,0269	2,142	15,06	0,703
30	1,165	1,005	0,0267	2,286	16,00	0,701
40	1,128	1,005	0,0276	2,431	16,96	0,699
50	1,093	1,005	0,0283	2,572	17,95	0,698
60	1,060	1,005	0,0290	2,720	18,97	0,696
70	1,029	1,009	0,0297	2,856	20,02	0,694
80	1,000	1,009	0,0305	3,020	21,09	0,692
90	0,972	1,009	0,0313	3,189	22,10	0,690
100	0,940	1,009	0,0321	3,364	23,13	0,688
120	0,898	1,009	0,0334	3,684	25,45	0,686
140	0,854	1,013	0,0349	4,034	27,80	0,684
160	0,815	1,017	0,0364	4,389	30,09	0,682
180	0,779	1,022	0,0378	4,750	32,49	0,681
200	0,776	1,026	0,0393	5,136	34,85	0,680

*h-s-диаграмма водяного пара*



*h-d-диаграмма влажного воздуха*



## Содержание

Общие указания . . . . .	3
Литература . . . . .	4
1. Программа дисциплины . . . . .	5
1.1. Цели и задачи дисциплины . . . . .	5
1.2. Содержание дисциплины . . . . .	5
2. Методические указания по изучению отдельным тем дисциплины. Контрольные вопросы . . . . .	7
2.1. Введение . . . . .	7
2.2. Водяной пар . . . . .	8
2.3. Влажный воздух . . . . .	9
2.4. Виды переноса теплоты . . . . .	10
2.5. Физический процесс теплопередачи . . . . .	14
3. Курсовая работа . . . . .	15
Приложения . . . . .	21

Учебное издание

ТЕПЛОТЕХНИКА  
(Раздел дисциплины  
«Теплотехника и теплотехническое оборудование»)

Программа, методические указания и задания к курсовой работе  
для студентов заочного обучения  
специальности 1-70 01 01 «Производство строительных изделий  
и конструкций»

Составители:  
НЕСТЕРОВ Лев Валентинович  
ОРЛОВИЧ Анна Ивановна

Редактор Л.Н. Дубовик  
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

---

Подписано в печать 09.10.2006.  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,2. Тираж 75. Заказ 770.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.  
220013, Минск, проспект Независимости, 65.