

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет»

Кафедра процессов, машин и аппаратов химических производств

## **ТЕРМОДИНАМИКА**

Программа, методические указания  
по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы  
для студентов специальности 130405 «Обогащение полезных ископаемых»  
заочной формы обучения

Составители **А. Р. Богомолов**  
**Е. Ю. Темникова**

Рассмотрены и утверждены  
на заседании кафедры  
Протокол № 3 от 30.11.2010  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
специальности 130405  
Протокол № 2 от 03.12.2010  
Электронная копия находится  
в библиотеке ГУ КузГТУ

Кемерово 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	2
2. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ	2
2.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ	2
2.1.1. Цель преподавания дисциплины	2
2.1.2. Задачи изучения дисциплины	2
2.1.3. Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения дисциплины	3
2.2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	3
2.2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лек- ционных занятий	3
2.2.2. Практические занятия, их содержание, объем в часах	4
2.3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	5
2.3.1. Основная литература	5
2.3.2. Дополнительная литература	5
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ	6
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	41
5. ЗАДАНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ	42

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основной формой изучения дисциплины «Термодинамика» является самостоятельная работа студента, включающая освоение предлагаемых разделов курса и выполнение контрольной работы. Изучение дисциплины осуществляется в 7 семестре и рекомендуется вести в последовательности, определенной содержанием и методическими рекомендациями, представленными в данных методических указаниях. Кроме того, в период сессии студент посещает занятия, проводимые преподавателем с обзорными лекциями по наиболее важным разделам, и выполняет комплекс практических заданий.

В течение семестра студенту необходимо выполнить контрольную работу и выслать ее в университет для проверки. Доработка, исправления и защита контрольной работы осуществляется в период сессии. Контрольную работу следует рассматривать как итоговое задание, характеризующее степень и качество изучения дисциплины в период самостоятельной подготовки.

В конце изучения дисциплины студент сдает зачет.

## 2. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

#### 2.1.1. Цель преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины является освоение студентом знаний о фундаментальных законах термодинамики и закономерностях превращения энергии в различных физических, химических и механических процессах.

#### 2.1.2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен знать: термодинамический метод исследования энергетических превращений, принцип термодинамического равновесия, законы термодинамики для открытых систем, основы химической термодинамики, основы тепломассопереноса, теплофизические свойства веществ, термодинамические процессы в горном производстве, фазовые переходы в термодинамических системах, теорию флуктуаций, основы синергетики.

Студент должен уметь пользоваться термодинамическими диаграммами и таблицами термодинамических свойств веществ, рассчитывать параметры термодинамического процесса, вычислять константу равновесия химической реакции, а следовательно, максимально возможный выход продукта.

### 2.1.3. Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины

Изучение дисциплины «Термодинамика» предполагает знание студентами следующих курсов и их разделов:

- *математика*: дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения, основы математического анализа;
- *физика*: статистическая физика и молекулярно-кинетическая теория;
- *гидрогазомеханика*: гидростатика, гидродинамика;
- *общая и неорганическая химия*: периодическая система, строение вещества, окислительно-восстановительные реакции, скорость химических реакций.

## 2.2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

Распределение лекционных часов по темам дисциплины приведено в табл. 1

Таблица 1

Содержание лекционного курса	Объем в час.
<p>1. ОСНОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ</p> <p>1.1. Предмет и метод термодинамики. Основные понятия: термодинамическая система, параметры состояния, уравнение состояния, термодинамический процесс, работа и теплота процесса, обратимые и необратимые процессы.</p> <p>1.2. Начала термодинамики: первое начало термодинамики, внутренняя энергия и энтальпия, теплоемкость, второе начало термодинамики, превращение теплоты в работу, термодинамическая температура, энтропия, возрастание энтропии в необратимых процессах, максимальная полезная внешняя работа, третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста).</p> <p>1.3. Термодинамическое равновесие: термодинамические потенциалы, химический потенциал, условия равновесия термодинамических систем.</p> <p>1.4. Равновесие фаз: условия равновесия фаз, термодинамические диаграммы и таблицы, правило фаз, теплота фазового перехода.</p> <p>1.5. Основные термодинамические процессы и циклы: изотермический, изобарический, изохорический, адиабатический, политропический процессы, смешение идеальных газов, обратимые циклы, работа цикла, термодинамическая вероятность.</p> <p>1.6. Свойства газов, паров, жидкостей и твердых тел: реальные газы, уравнение состояния реальных газов, испарение и конденсация, насыщенный, влажный и перегретый пар, теплоемкость, теплопроводность и тепловое расширение твердых тел, упругие, прочностные, электрические и магнитные свойства твердых тел.</p> <p>1.7. Изозэнтропическое течение газов и жидкостей: основные уравнения течения, изозэнтропическое течение газов и паров в каналах, сопло Лаваля.</p>	6

Содержание лекционного курса	Объем в час.
<p>2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ (СИНЕРГЕТИКА)</p> <p>2.1. Основные постулаты термодинамики необратимых процессов: общее выражение для диссипативной функции, диссипативная функция вязкой и теплопроводящей жидкости, термодинамика термоэлектрических явлений.</p> <p>2.2. Теория теплопередачи: основные определения, передача теплоты теплопроводностью, распространение тепла в твердых телах, теплообмен при течении жидкости в трубе, теплообмен при кипении жидкости и конденсации пара, виды теплоносителей.</p>	2
<p>3. ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ</p> <p>3.1. Химическое равновесие: основные понятия, химические реакции, закон Гесса, закон действующих масс, максимальная работа реакции. Уравнение Кирхгофа.</p> <p>3.2. Растворы: условия равновесия в растворах, идеальные и разбавленные растворы, критические состояния.</p>	3
<p>4. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС</p> <p>4.1. Процессы сушки горной массы: виды воды в горной массе, условия протекания процессов сушки, тепло- и массообмен при сушке горной массы, поверхностное подсушивание кусков горной массы, техника и технология сушки горной массы.</p> <p>4.2. Термодинамические процессы обогатительного передела: необходимость окускования руд и концентратов, термообработка брикетов, агломерация руды и обжиг окатышей, окислительные процессы при агломерации, магнетизирующий обжиг руд.</p>	3
ИТОГО:	14

### 2.2.2. Практические занятия, их содержание, объем в часах

Проведение практических занятий имеет целью ознакомить студентов с методами и привить навыки решения практических задач, встречающихся в производственной деятельности.

Перечень заданий и объем в часах, отводимый на их выполнение приведен в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Тематика практических занятий	Объем в час.
1	Параметры состояния. Основные газовые законы.	0,5
2	Теплоемкость. Энтальпия. Первый закон термодинамики.	0,5
3	Основные термодинамические процессы.	0,5
4	Второй закон термодинамики. Энтропия.	0,5
5	Водяной пар.	0,5
6	Влажный воздух. Сушка	0,5
7	Термодинамика химических процессов.	0,5
8	Истечение газов и паров.	0,5
ИТОГО:		4

## 2.3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 2.3.1. Основная литература

1. Мазур, Л. С. Техническая термодинамика и теплотехника / Л. С. Мазур. – М.: ГЕОТАР-МЕД, 2003. – 352 с.
2. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташев. – М.: Высш. шк., 2005. – 261 с.
3. Теплотехника / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2005. – 671 с.
4. Гончаров, С. А. Термодинамика / С. А. Гончаров. – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2001. – 441 с.
5. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М.: Энергия, 1983. – 416 с.
6. Крутов, В. И. Техническая термодинамика / В. И. Крутов [и др.]. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
7. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1980. – 469 с.
8. Карякин, Н. В. Основы химической термодинамики / Н. В. Карякин. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та; М.: Академия, 2003. – 464 с.
9. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 753 с.
10. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
11. Рабинович, О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
12. Андрианова, Т. Н. Сборник задач по технической термодинамике / Т. Н. Андрианова [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 240 с.
13. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – М.: Альянс, 2005. – 576 с.

### 2.3.2. Дополнительная литература

14. Вукалович, М. П. Термодинамика / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.
15. Новиков, И. И. Термодинамика / И. И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1984. – 592 с.
16. Карапетьянц, М. Х. Химическая термодинамика / М. Х. Карапетьянц. – М.: Химия, 1975. – 564 с.

17. Алабовский, А. Н. Техническая термодинамика и теплопередача / А.Н. Алабовский, И.А. Недужий. – К.: Выща шк., 1990. – 255 с.
18. Ерохин, В. Г. Основы термодинамики и теплотехники / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 224 с.
19. Теплотехника / А.П. Баскаков [и др.]; Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
20. Ерохин, В. Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 240 с.
21. Панкратов, Г. П. Сборник задач по теплотехнике / Г.П. Панкратов. – М.: Высш. шк., 1995. – 238 с.
22. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Е.В. Дрыжаков [и др.]; Под ред. Б.Н. Юдаева. – М.: Высш. шк., 1968. – 371 с.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

#### **1. ОСНОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ**

**1.1. Предмет и метод термодинамики. Основные понятия: термодинамическая система, параметры состояния, уравнение состояния, термодинамический процесс, работа и теплота процесса, обратимые и необратимые процессы.**

##### *Методические указания*

Необходимо уяснить, что предметом термодинамики является изучение процессов взаимного преобразования теплоты и работы в различных тепловых машинах. Термодинамика изучает закономерности теплового движения в равновесных системах и при переходе систем в равновесие, а также обобщает эти закономерности на неравновесные системы. При анализе конкретных явлений применяют термодинамический метод (метод дедукции, т.е. от общего к частному, метод круговых процессов и термодинамических функций, а также метод геометрических построений), имеющий три особенности: использование двух законов термодинамики, использование только таких физических величин, смысл которых не связан с микроскопическим (молекулярным, атомарным и т.п.) строением вещества, и наконец, описание процессов основывается на понятии о макроскопическом равновесии, т.е. процессы рассматриваются как непрерывная последовательность состояний равновесия (квазистатические процессы).

Изучение дисциплины нужно начинать с усвоения основных понятий. Рассмотрите понятие термодинамической системы, как совокупность материальных тел, являющихся объектом изучения и

находящихся во взаимодействии с окружающей средой, виды систем: открытые и закрытые, теплоизолированные и изолированные, гомогенные и гетерогенные. Важнейшими являются понятия равновесного и неравновесного термодинамического состояния системы. Особое внимание следует уделить такому понятию как термодинамические параметры, какие параметры называют экстенсивными и интенсивными, а также основными термодинамическими параметрами и какие параметры к ним относятся. Для термодинамической системы, находящейся в равновесии, существует функциональная связь между параметрами состояния, которая называется уравнением состояния и имеет вид  $f(p, v, T) = 0$ . Необходимо уяснить, что из трех основных параметров, определяющих состояние системы, независимыми являются два любых, а конкретный вид уравнения состояния зависит от индивидуальных свойств веществ. Для примера рассмотрите уравнение состояния идеальных газов Клапейрона и универсальный вид его – Клапейрона-Менделеева, особо отметив физический смысл величины газовой постоянной. Рассмотрите подробно уравнение состояние реальных газов на примере уравнения Ван-дер-Ваальса, учитывающего объем молекул и силы межмолекулярного взаимодействия. Рассмотрите условия, при которых уравнение Ван-дер-Ваальса вырождается в уравнение состояния идеального газа.

Изучение термодинамики неразрывно связано с понятием термодинамический процесс, представляющим собой совокупность изменяющихся состояний рассматриваемой системы, характеризующихся изменением хотя бы одного параметра состояния. Акценты можно расставить, рассматривая все процессы, разделяя их на равновесные и неравновесные, отмечая, что любой реальный процесс является в большей или меньшей степени неравновесным, а при приближении скорости процесса к нулю, его можно рассматривать как равновесный (квазиравновесный). В зависимости от физических условий протекания процесса, необходимо изучить простейшие процессы, характеризующиеся условием  $X = \text{const}$ , где  $X$  – один из внешних или внутренних параметров системы или некоторая их функция. Необходимо усвоить, что только равновесные процессы допускают графическое изображение в пространстве и на плоскостях параметров состояния. Особый интерес представляют замкнутые (круговые) процессы или циклы.

Особое внимание следует уделить пониманию двух способов обмена энергией между участвующими в термодинамическом процессе телами – в форме теплоты и работы. Энергия, переданная в форме теплоты, называется количеством теплоты, а в форме работы – работой. Необходимо раскрыть сущность и качественное и количественное отличие двух основных форм передачи энергии – теплоты и работы, отличать работу изменения объема, работу проталкивания и внешнюю полезную работу.

Понимание наступает при осмыслении определений обратимых и необратимых процессов. Важно уяснить, что если процессы, происходящие вначале в прямом равновесном, и затем в обратном направлении, не оставляют в самой системе или окружающей среде каких-либо остаточных конечных изменений, называют обратимыми, т.е. всякие квазиравновесные (квазистатические) процессы в пределе являются обратимыми. В противном случае – необратимыми. При необратимом процессе система не может быть возвращена в исходное состояние ни по тому же пути, по которому она пришла в конечное состояние, ни по какому-либо обходному пути вообще без дополнительного внешнего воздействия, т.е. без «принуждения».

### Вопросы

1. Отметьте предмет и объект изучения термодинамики, а также методы, используемые при этом.
2. Назовите цель и задачи изучения дисциплины, значение данного курса в подготовке инженера.
3. Что такое термодинамическая система?
4. Дайте понятия видам систем: открытые и закрытые, теплоизолированные и изолированные, гомогенные и гетерогенные.
5. Что называют термодинамическим состоянием?
6. Какая существует функциональная связь между параметрами состояния для термодинамической системы, находящейся в равновесии?
7. Перечислите термодинамические параметры, характеризующие термодинамическую систему, и дайте характеристику им. Какие параметры называют экстенсивными и интенсивными?
8. Прокомментируйте сходство и отличие уравнений состояния идеальных и реальных газов.
9. Что называют термодинамическим процессом?
10. Дайте понятия работы и теплоты, их различия.
11. Что такое обратимый и необратимый процесс, приведите пример.

### Литература: [2, 3, 5, 6]

**1.2. Начала термодинамики: первое начало термодинамики, внутренняя энергия и энтальпия, теплоемкость, второе начало термодинамики, превращение теплоты в работу, термодинамическая температура, энтропия, возрастание энтропии в необратимых процессах, максимальная полезная внешняя работа, третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста).**

### Методические указания

Необходимо четко уяснить наиболее общий, универсальный закон природы, применимый ко всем явлениям и процессам – закон сохранения и превращения энергии. Обратите внимание, что понятие энергии

неразрывно связано с движением материи: энергия есть физическая мера движения материи. Взаимные превращения энергии тел отражают способность движения переходить из одних форм в другие, следовательно, сохранение энергии выражает факт неуничтожимости движения материального мира. На основе закона сохранения и превращения энергии могут быть установлены точные количественные соотношения между отдельными видами энергии. Эквивалентность тепла и работы была подтверждена экспериментальным путем и установлен механический эквивалент теплоты.

Первый закон (начало) термодинамики характеризует процессы превращения энергии с количественной стороны. Например, изменение энергии термодинамической системы равно разности между полученным системой количеством теплоты  $Q$  и совершенной ею работой  $L$ . Изучите формулировки закона сохранения и превращения энергии и первого начала термодинамики. Рассмотрите связь между этими законами. Отметьте, что первый закон термодинамики налагает строгое условие на все процессы природы, которые при всем их многообразии ограничены условием сохранения энергии. Первое начало термодинамики представляет собой частный случай общего закона сохранения энергии. В термодинамике предпочитают употреблять выражение «первое начало термодинамики», а не «закон сохранения энергии», так как следствием сохранения энергии является существование во всякой системе функции состояния – внутренней энергии (а также энтальпии) являющейся одной из основных термодинамических величин.

В связи со сказанным, важным понятием, введенным в первом законе термодинамики, является внутренняя энергия  $u$  – энергия, заключенная в системе, которая состоит из кинетической энергии поступательного, вращательного и колебательного движения молекул, потенциальной энергии взаимодействия молекул, энергии внутриатомных и внутриядерных движений частиц и др. Внутренняя энергия является однозначной функцией параметров состояния и состава системы. У. Гиббс ввел функцию состояния, которую назвал энтальпией. Функция для 1 кг вводится по формуле  $i = u + p\upsilon$ . Так же как и внутренняя энергия, энтальпия является функцией состояния. Если внутренняя энергия – это энергия всех составляющих тело частиц, то энтальпия, связанная с данным состоянием тела – это внутренняя энергия и величина  $p\upsilon$ .

Следует обратить внимание, что аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет два вида, необходимо их знать и уметь преобразовывать одно выражение в другое.

При рассмотрении теплоемкости системы и теплоемкости единицы количества вещества нужно различать массовую, молярную и объемную,

истинную и среднюю, изобарную и изохорную, а также выяснить взаимосвязь между ними. Если известны аналитические выражения для внутренней энергии или энтальпии тела в виде функций параметров состояния, то при помощи первого начала термодинамики необходимо уметь определять значения теплоемкостей тела при постоянном объеме и постоянном давлении и зависимость их от параметров состояния.

Второй закон (начало) термодинамики рассматривает направленность протекания естественных процессов. Следует обратить внимание, что имеется неравнозначность во взаимном превращении теплоты и работы. Если первый закон термодинамики накладывает единственное ограничение на процесс теплообмена между телами с различной температурой – требование равенства количеств теплоты, отданной горячим телом и полученной вторым, то второй закон термодинамики дает ответ на вопрос о направлении, в котором действительно происходит переход теплоты между двумя телами (*первая формулировка – некомпенсированный переход теплоты от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой невозможен*). Второе начало термодинамики имеет важное значение для теории тепловых двигателей. Оно утверждает, что в тепловых двигателях в работу может быть превращена лишь часть подведенной теплоты (*вторая формулировка – нельзя осуществить тепловой двигатель, единственным результатом действия которого было бы превращение теплоты какого-либо тела в работу без того, чтобы часть этой теплоты передавать другим телам*). Максимальное значение КПД устанавливается на основе второго закона термодинамики, который также устанавливает критерий необратимости процессов и с его помощью можно находить пути осуществления рабочего процесса наиболее эффективным образом. Вторым законом термодинамики, как и первым, позволяет, исходя из известных физических свойств вещества, предсказывать другие свойства его и устанавливать количественные соотношения между ними. Второе начало термодинамики раскрывает термодинамическую сущность понятия температуры.

Необходимо уяснить, что температура  $T_K$ , определяемая на основе использования теплового двигателя Карно в качестве термометрического устройства, представляет собой температуру тела по температурной шкале, называемую термодинамической температурой. В цикле Карно отношение абсолютной величины количества теплоты  $Q_1$ , полученной рабочим телом от источника теплоты высшей температуры  $T_1$ , к абсолютной величине количества теплоты  $Q_2$ , отданной источнику теплоты низшей температуры  $T_2$ , есть при  $T_2 = \text{const}$  возрастающая функция температуры  $T_1$ . Термодинамическая температура находится в простой связи с количеством теплоты  $Q$ , полученной рабочим телом двигателя Карно при заданной

температуре:  $Q/Q_c = T_K/T_{Kc}$ . Из этого условия следует, что температура тела  $T_K$  во столько раз больше стандартной температуры  $T_{Kc}$ , во сколько раз количество теплоты  $Q$ , полученной от этого тела в цикле Карно, больше количества теплоты  $Q_c$ , отданной стандартному теплоприемнику.

Кроме того, важно знать, термодинамическая температурная шкала никак не связана с конкретными свойствами рабочего тела. Следовательно, термодинамическая температура  $T_K$  является не эмпирической, а универсальной температурой. Построенная на основе машины Карно температурная шкала является равномерной. Важное свойство термодинамической шкалы – одинаковость знака температуры всех тел. Это означает, что существует предельная температура, называемая абсолютным нулем. Наименьшая из возможных температур отвечает случаю, когда  $Q_c = 0$ . Эта температура и есть абсолютный нуль.

Следует иметь в виду, что двигатель Карно, у которого температура теплоприемника равнялась бы абсолютному нулю, в действительности быть не может, так как его существование противоречит второму началу термодинамики, поскольку в этом случае вся теплота превращалась бы в работу без всякой компенсации. Абсолютный нуль в термодинамической шкале температур является, таким образом, предельной и, недостижимой температурной точкой.

Физический смысл энтропии достаточно сложен и его трудно объяснить с помощью наглядных представлений, поэтому раскрытие содержания энтропии необходимо рассмотреть более подробно.

Понятие энтропии достаточно просто выводится из доказательства теоремы Клаузиуса. Он рассматривал обратимый цикл произвольной формы – аналитическая кривая без каких-либо заострений. Он доказал, что для любого цикла интеграл  $\oint dQ/T$ , взятый по контуру цикла, равняется нулю  $\oint dQ/T = 0$  в случае обратимого процесса и имеет отрицательное значение  $\oint dQ/T < 0$  в случае необратимого процесса. Обратите внимание, что под  $Q$  подразумевается не абсолютная величина, а действительное, т.е. положительное или отрицательное, количество теплоты.

Клаузиус использовал при доказательстве метод циклов, разработанный Клапейроном на основе идей Карно. До введения У. Гиббсом в 1870 г. метода потенциалов это был единственный метод, позволявший устанавливать связи между термодинамическими характеристиками процессов, связанных с преобразованиями, в которых участвуют теплота и работа.

Из выражения для термического КПД *обратимого* цикла Карно через термодинамические температуры  $\eta_K = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$  или  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$

следует, что для каждого элементарного цикла Карно произвольного цикла  $\frac{dQ_{i1}}{dQ_{i2}} = \frac{T_{i1}}{T_{i2}}$  или  $\frac{dQ_{i1}}{T_{i1}} = \frac{dQ_{i2}}{T_{i2}}$ . Из последнего выражения следует равенство отношений элементарного количества теплоты к температуре тела в данном элементарном процессе, как нагревателя, так и холодильника в цикле Карно.

Просуммировав это соотношение по всем элементарным циклам, или что, то же самое, взяв интеграл  $\oint dQ/T$  вдоль верхней и нижней кривой цикла, получим  $\int_{\text{top}} dQ/T = \int_{\text{bottom}} dQ/T$ . Но сумма интегралов, взятых по верхней (top) и нижней (bottom) ветви цикла, равняется интегралу по всему контуру цикла, т.е.  $\oint dQ/T = 0$  для обратимого цикла.

Выражение для термического КПД *необратимого* цикла  $\eta_{\text{н.о.}} < \eta_{\text{о.о.}}$  или  $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$  приводит к следующему условию по

всем элементарным циклам для *необратимого* цикла Карно:  $\frac{dQ_{i1}}{T_{i1}} < \frac{dQ_{i2}}{T_{i2}}$ ,

следовательно, для всего цикла  $\oint dQ/T < 0$ . Здесь  $T$  – температура совершающего цикл тела в данной точке цикла, а  $dQ$  – полученное телом в этой точке элементарное количество теплоты.

Теперь, согласно теореме Клаузиуса интеграл  $\oint dQ/T$ , взятый по контуру *обратимого* цикла равняется нулю. Это означает, что в случае *обратимого* процесса 1–2 значение интеграла  $\int_1^2 dQ/T$  не зависит от пути

процесса, т.е. от того, по какой непрерывной линии, соединяющей начальную и конечную точки, осуществляется переход тела из состояния 1 в состояние 2, а определяется лишь начальным и конечным состоянием тела. Следовательно  $dQ/T$  есть полный дифференциал некоторой функции состояния тела, которую обозначают через  $S$  и называют *энтропией*. Для обратимого и необратимого циклов  $\oint dQ/T \leq 0$ , т.е. *интеграл Клаузиуса для замкнутого контура меньше или равен нулю, но не может быть больше нуля. Это утверждение представляет собой общую математическую формулировку второго начала термодинамики.* В последнем соотношении знак равенства применяется для обратимых, а знак «меньше» – для необратимых циклов.

Энтропия может быть определена следующим образом. Выберем некоторое определенное состояние  $s$  тела в качестве стандартного. Выбор

произвольный, т.е. исходный, и приписываем этому состоянию значение энтропии  $S_c$ , то в любом состоянии  $a$  энтропия тела равна  $S = S_c + \int_c^a dQ/T$ .

Из этого видно, что энтропия тела определяется с точностью до произвольной аддитивной постоянной  $S_c$ , однако разность энтропий тела в двух состояниях находится однозначно  $S_1 - S_2 = \int_c^a dQ/T$ . Для бесконечно малого *обратимого* процесса изменение энтропии равно  $dS = dQ/T$ . Отношение  $dQ/T$  называют *элементарной приведенной теплотой*, а  $Q/T$  – *приведенной теплотой*. Так как  $dQ$  не является полным дифференциалом, а  $dS$  есть полный дифференциал, то абсолютная температура выступает как интегрирующий делитель, т.е. величина, от деления на которую неполный дифференциал  $dQ$  обращается в полный дифференциал.

Таким образом, убедитесь, что установлено существование энтропии как функции состояния.

При рассмотрении вопроса об изменении энтропии при необратимых процессах, обратите внимание на показательный пример, когда исследуется необратимый цикл, состоящий из необратимого процесса  $1-2$  и обратимого процесса  $2-1$ . На основании теоремы Клаузиуса  $\int_1^2 dQ/T - \int_2^1 dQ/T < 0$ . Но интеграл  $\int_2^1 dQ/T$ , взятый по обратимому участку  $2-1$ , представляет собой разность энтропий тела в точках  $2$  и  $1$ , равную

$S_2 - S_1$ , поэтому  $\int_1^2 dQ/T < S_2 - S_1$ . Следовательно, при необратимом

процессе интеграл  $\int_1^2 dQ/T$  всегда меньше разности энтропий в конечном и начальном состояниях, а для обратимого процесса он равен  $S_2 - S_1$ . В

общем виде этот результат можно выразить так:  $\int_1^2 dQ/T \leq S_2 - S_1$ . Для

бесконечно малого процесса  $dQ/T \leq dS$ . На основании полученных результатов можно сформулировать следующую теорему: *при всех обратимых процессах в изолированной системе энтропия ее остается постоянной, при всех необратимых процессах энтропия системы только возрастает*, т.е.  $\Delta S_{\text{нëñò}} \geq 0$ . Для бесконечно малого обратимого процесса  $dS = dQ/T$ .

Аналитическое выражение второго начала термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид  $dQ = TdS$ . Объединив аналитическое выражение первого и второго начала термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса можно получить термодинамическое тождество.

Рассматривая физический смысл энтропии, можно отметить следующее: 1) дифференциал энтропии  $dS$  в *обратимом* процессе численно равен наибольшему количеству элементарной приведенной теплоты  $dQ/T$ , которая может быть получена телом от внешнего источника теплоты с температурой, равной температуре тела в начальном состоянии, при переходе из рассматриваемого состояния в заданное бесконечно близкое состояние; 2) энтропия является мерой потери работоспособности системы вследствие необратимости реальных процессов; 3) энтропия является мерой работоспособности, технологической эффективности (ценности) теплоты; 4) энтропия есть мера беспорядка, деградации и дезорганизованности системы.

Согласно первому закону термодинамики полезная внешняя работа, производимая телом при переходе из состояния 1 в состояние 2  $L = Q + I_1 - I_2$ . Основываясь на втором начале термодинамики, можно установить количественное соотношение между работой, которая могла бы быть совершена системой при данных внешних условиях в случае обратимого процесса, и действительной работой, производимой в тех же условиях при необратимом протекании процесса. То, что производимая системой работа при необратимом процессе всегда меньше работы обратимого процесса, происходящего между теми же начальными и конечными состояниями и при тех же внешних условиях, вполне очевидно. В результате обратимого цикла Карно может быть произведена *максимальная полезная работа* между телами разных температур:

$L_{\max} = \eta_t^k Q_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} Q_1$  или удельная  $l_{\max} = \eta_t^k q_1$ . В термодинамике, в

особенности в теории тепловых двигателей, важное значение имеет процесс перехода тела из заданного начального состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Максимальная удельная полезная внешняя работа, производимая телом при таком переходе определяется соотношением  $l_{\max} = i - i_0 - T_0(s - s_0)$ , которая называется *работоспособностью тела* в данном состоянии. Удельную работоспособность потока называют его *эксергией* и обозначают  $e$ .

Эксергия теплоты определяется по зависимости  $e_t = q_1 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$ .

Второй постулат при рассмотрении физического смысла энтропии: потеря работы от необратимости процесса прямо пропорциональна возрастанию энтропии. Доказательство этого положения часто рассматривают на простом примере. Если теплота передается от горячего источника теплоты (ГИТ) промежуточному теплоносителю с температурой  $T_1^1 < T_1$ , и, так как из-за необратимости теплообмена  $dS_1 < dS_1^1$ , то энтропия всей системы возрастает  $\Delta S_{i \hat{a} i \hat{a} \hat{o}} = dS_1 + dS_1^1 = -\frac{dQ_1}{T_1} + \frac{dQ_1}{T_1^1} = \left( \frac{1}{T_1^1} - \frac{1}{T_1} \right) dQ_1$ .

Полезную работу можно получить, осуществляя цикл Карно между промежуточным теплоносителем и холодным источником теплоты (ХИТ),  $dL^1 = \eta_i^k dQ_1 = \left( 1 - \frac{T_2}{T_1^1} \right) dQ_1$ . Тогда уменьшение работы в результате

необратимого теплообмена будет  $dL_{i \hat{a} i \hat{a} \hat{o}} = dL - dL^1 = \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} - 1 + \frac{T_2}{T_1^1} \right) dQ_1$ .

Отсюда  $dL_{i \hat{a} i \hat{a} \hat{o}} = T_2 \Delta S_{i \hat{a} i \hat{a} \hat{o}}$ . Это уравнение называют **уравнением Гюй-Стодолы**.

Третье начало термодинамики – это результат, являющийся обобщением ряда опытных данных при изучении свойств различных веществ при низких температурах, близких к абсолютному нулю ( $T = 0$ ), и не вытекающий непосредственно из первого или второго начала термодинамики, составляет содержание *тепловой теоремы Нернста*. В этих условиях обнаруживается следующая важная закономерность в поведении реальных веществ: в области абсолютного нуля энтропия тела в любом равновесном состоянии не зависит от температуры, объема и других параметров, характеризующих состояние тела, т.е. при  $T \rightarrow 0$   $S = S_{T=0} = S^0 = \text{const}$ . Из тепловой теоремы следует, что теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  при  $T \rightarrow 0$  обращаются в нуль. Обращается в нуль и коэффициент теплового расширения  $\alpha_p = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ . Постоянство энтропии при  $T \rightarrow 0$

означает, что в области абсолютного нуля  $dQ = 0$ , т.е. любая из изотерм совпадает с адиабатой  $S = S^0$ . Из последнего следует, что путем адиабатического расширения тела *достигнуть абсолютного нуля невозможно*. Нельзя достигнуть абсолютного нуля и с помощью отвода теплоты от тела, поскольку при  $T \rightarrow 0$  каждое из тел при любом процессе изменения состояния сохраняет неизменное значение энтропии, т.е. перестает отдавать теплоту окружающей среде. Планк пришел к выводу, что *при температуре абсолютного нуля энтропия всех веществ в состоянии равновесия независимо от давления, плотности и фазы*

обращается в нуль, т.е.  $S^0 = 0$ . Это утверждение составляет содержание третьего начала термодинамики. Важное следствие из третьего начала термодинамики: *вблизи абсолютного нуля все термодинамические величины, характеризующие равновесное состояние тела, перестают зависеть от температуры.*

Третье начало термодинамики представляет собой макроскопическое проявление квантовых свойств материи. В этом смысле оно является точным законом. На основании третьего начала термодинамики по известной величине теплоемкости можно вычислить абсолютное значение термодинамических функций. Необходимо отметить, что идеальные газы не удовлетворяют тепловой теореме Нернста. Это связано с неприменимостью уравнения Клапейрона–Менделеева при низких температурах и применимостью более сложному уравнению состояния, учитывающему квантовые эффекты.

### Вопросы

1. Дайте понятия энергии, внутренней энергии, энтальпии
2. Дайте формулировку закона сохранения и превращения энергии.
3. Сформулируйте первое начало термодинамики и запишите его математически.
4. Что такое теплоемкость?
5. Что называется круговым процессом или циклом?
6. Что называется термодинамической температурой?
7. Прямой и обратный цикл Карно.
8. Описать обратимый цикл Карно.
9. Расскажите второе начало термодинамики и напишите его выражение.
10. В чем сущность теоремы Клаузиуса?
11. В чем отличие термического КПД обратимого и необратимого цикла?
12. Как может быть определена энтропия тела?
13. Что называют элементарной приведенной теплотой?
14. Что такое эксергия?
15. Что такое эксергия теплоты и рабочего тела?
16. Как определяется максимальная полезная работа?
17. Расскажите о потере работы от необратимости процесса и как она связана с энтропией.
18. В чем сущность уравнения Гюи-Стодолы.
19. В чем суть третьего начала термодинамики?

Литература: [2, 3, 5, 6]

**1.3. Термодинамическое равновесие: термодинамические потенциалы, химический потенциал, условия равновесия термодинамических систем.**

Методические указания

Перед раскрытием понятия термодинамического равновесия необходимо уяснить такие простые понятия, как *система* (объект термодинамического исследования), *окружающая среда* (все, что не включено в систему, но может взаимодействовать с ней), *рабочее тело* (необходимый агент, с помощью которого в тепловых машинах и установках получают работу, теплоту или холод), *компонента* (индивидуальное вещество), *гомогенная (однородная)* (одна фаза с одинаковыми физическими свойствами во всех своих частях) или *гетерогенная (неоднородная)* (несколько фаз с различными физическими свойствами) система, *фаза* (совокупность всех гомогенных частей системы), *контрольная поверхность* (реальная или мысленная граница между системой и окружающей средой). Следует изучить понятия *изолированной, закрытой (замкнутой), открытой и адиабатной (термически изолированной) системы*. *Простой термодинамической системой* называется та, которая находится только воздействием внешних сил, а *сложная система* – не только под воздействием внешних сил, но и сил иной природы.

При анализе условий равновесия термодинамических систем используют специальные термодинамические функции, которые являются функциями состояния и при достижении системой состояния равновесия принимают экстремальные значения. Обратите внимание, что среди термодинамических функций выделяют так называемые характеристические функции, которые обладают тем свойством, что при выбранных параметрах состояния частные производные характеристических функций по параметрам равны тому или иному параметру состояния. Благодаря этому такие производные получают наиболее простое выражение и ясный физический смысл.

Характеристическими функциями состояния называются функции, с помощью которых и посредством их производных разных порядков могут быть явно выражены все термодинамические свойства, в том числе уравнения состояния, уравнения для определения теплоемкостей  $c_p$  и  $c_v$ . К числу термодинамических функций относятся: внутренняя энергия  $U = f(S, V)$ ; энтропия  $S = f(p, I)$  или энтропия  $S = f(V, U)$ ; энтальпия  $I = f(S, p)$ ; энергия Гельмгольца (свободная энергия)  $F = f(V, T)$  ( $F = U - TS$ ); энергия Гиббса (изобарный потенциал)  $\hat{O} = f(p, T)$  ( $\Phi = I - TS$ ). Следует отметить, что перечисленные функции являются характеристическими лишь с определенными независимыми параметрами, которые указаны в скобках под знаком функциональной зависимости.

Ясно, что характеристические функции  $U, I, F, \Phi$  являются *термодинамическими потенциалами*, поскольку в тех или иных процессах, определяемых условиями взаимодействия с окружающей средой, работа

процесса равна убыли соответствующей характеристической функции. Кроме того, по аналогии с механикой, где работа в поле консервативных сил численно равняется разности потенциалов в начальной и конечной точках, перечисленные выше функции, разность значений которых в двух состояниях представляет собой максимальную полезную внешнюю работу, производимую системой при обратимом переходе в соответствующих условиях из одного состояния в другое, получили название *термодинамических потенциалов*.

Произведение  $TS$  называют иногда «связанной энергией». Это название понятно, если вспомнить, что при обратимом изотермическом процессе вся работа совершается за счет энергии Гельмгольца  $F$ , а величина  $-TS$ , составляющая вместе с  $F$  внутреннюю энергию тела, в работу не преобразуется.

Для простых систем дифференциалы рассматриваемых характеристических функций из первого и второго начал термодинамики выглядят следующим образом:  $dU \leq TdS - pdV$ ;  $dI \leq TdS + Vdp$ ;  $dF \leq -SdT - pdV$ ;  $d\hat{O} \leq -SdT + Vdp$ . Знак «меньше» относится к необратимым процессам, а знак «равенства» – к обратимым процессам.

Таким образом, рассматривая первые два выражения, при обратимом изоэнтропическом процессе ( $S = \text{const}$ ) максимальная работа изменения объема равняется убыли внутренней энергии  $U$ , а максимальная полезная внешняя (техническая или располагаемая) работа, связанная с изменением объема, равняется убыли энтальпии  $I$ .

Рассматривая следующие два выражения, при обратимом изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ ), нетрудно убедиться, что убыль энергии Гельмгольца численно равна работе изменения объема, совершаемой телом, а максимальная полезная внешняя работа при изотермическом процессе равняется убыли энергии Гиббса.

Для сложных систем убыль соответствующей характеристической функции определяет работу системы немеханических сил, например, гравитационных, в соответствующих условиях с окружающей средой. Теперь несложно понять происхождение названий энергий Гельмгольца, как изохорно-изотермического потенциала, а энергии Гиббса – соответственно изобарно-изотермического потенциала.

Использование термодинамических потенциалов в соответствующих случаях облегчает отыскание работы процесса.

Удельный термодинамический потенциал  $\varphi = (p, T)$ , представляющий собой отнесенную к единице массы энергию Гиббса однородной системы, называется *химическим потенциалом*:  $\varphi = i - sT$ .

Дифференциал химического потенциала с помощью термодинамического тождества приводится к виду  $d\phi = -sdT + vdp$ .

Химический потенциал является одной из важнейших термодинамических функций. В этом необходимо убедиться, рассматривая процессы с изменением количества вещества. С этими процессами, т.е. с изменением массы данного тела, мы встречаемся при химических реакциях, когда за счет одних веществ образуются другие, или при изменении агрегатного состояния, в результате которого вещество из одной фазы, переходит в другую. Для таких систем внутренняя энергия изменяется как за счет теплоты и работы процесса, так и за счет потока энергии вещества, теплоты химических реакций, теплоты фазовых превращений.

При переменном количестве вещества в выражении для дифференциалов всех термодинамических потенциалов войдет дополнительный член, содержащий дифференциал массы тела  $dG$ , т.е., например,  $dU = TdS - pdV + \phi dG$ . Таким образом, химический потенциал  $\phi$  представляет собой частную производную от любого термодинамического потенциала системы по массе тела  $G$  при постоянных значениях соответствующих независимых переменных (при этом химический потенциал будет выражен через различные переменные), например,  $\phi = (\partial U / \partial G)_{V,S}$ . Из выражения для  $\phi$  ясно, что химический потенциал является интенсивной величиной.

Так как дифференциал любого из термодинамических потенциалов, взятый с обратным знаком, представляет собой максимальную полезную внешнюю работу, которая может быть в определенных условиях совершена системой при бесконечно малом процессе, то химический потенциал численно равен максимальной полезной работе, отдаваемой в данных условиях системой во вне при обратимом уменьшении массы системы на единицу. Применительно к химическим реакциям химический потенциал представляет собой максимальную полезную работу, которая может быть совершена реагирующим телом над внешним объектом при уменьшении массы тела на единицу, что вполне объясняет данное ему название.

Важно понять, что если состояние системы не меняется при постоянных внешних параметрах, а температура и давление во всех частях системы одинаковы, то такая система находится в состоянии термодинамического равновесия. Обратите внимание, что каждая термодинамическая система может находиться как в равновесном, так и в неравновесном состояниях. Среди термодинамически равновесных состояний различают (как и в механике) состояния *устойчивого (стабильного)* и *неустойчивого (лабильного)* равновесия. Устойчивое равновесие термодинамической системы характеризуется тем, что по

устранению причины, вызвавшей отклонение системы от состояния равновесия, система сама по себе возвращается в первоначальное равновесное состояние. Время, в течение которого устанавливается термодинамическое равновесие, называется временем *релаксации*. Стабильное состояние системы отвечает абсолютному максимуму или минимуму одной из характеристических функций:  $S$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $F$ ,  $\Phi$ . Лабильные состояния не встречаются на практике, так как из-за действия различных возмущающих факторов система не может быть в этом состоянии сколько-нибудь значительное время и неизбежно переходит в стабильное состояние.

Любой из возможных процессов изменения состояния системы должен удовлетворять неравенству Гиббса  $dU - TdS + pdV - \phi dG \leq 0$ , выражающему собой основные (первое и второе) начала термодинамики. Неравенство Гиббса позволяет установить, возможно ли в рассматриваемой системе то или иное изменение ее состояния. Для закрытых систем роль неравенства Гиббса играет неравенство Клаузиуса  $dU - TdS + pdV \leq 0$ . Например, условие термодинамического равновесия изолированной системы: в состоянии термодинамического равновесия энтропия изолированной системы имеет максимальное значение, а внутренняя энергия изолированной системы, энтропия которой постоянна, имеет в состоянии равновесия минимальное значение.

### Вопросы

1. Раскройте понятия термодинамической системы, окружающей среды, рабочего тела, компоненты системы.
2. Дайте определения гомогенной, гетерогенной системам.
3. Что такое фаза, контрольная поверхность.
4. Приведите примеры изолированной, закрытой, открытой и адиабатной системы.
5. Что такое простая термодинамическая система и сложная система.
6. Какие случаи удовлетворяют условию, когда система находится в состоянии термодинамического равновесия?
7. Каким свойством обладают так называемые характеристические функции?
8. Какие характеристические функции являются термодинамическими потенциалами?
9. Что представляет собой разность значений термодинамических потенциалов при обратимом переходе в соответствующих условиях из одного состояния в другое?
10. Что называют «связанной энергией» и почему?
11. Дайте определение и раскройте сущность химического потенциала, рассматривая процессы с изменением количества вещества.

12. Раскройте физический смысл устойчивого и неустойчивого равновесного термодинамического состояния.

13. Назовите и прокомментируйте условия равновесия термодинамических систем на примере изолированной системы, неизолированной закрытой системы при заданных неизменных  $T$  и  $V$  в одном случае и при  $T$  и  $p$  в другом случае.

Литература: [2, 3, 5, 14, 15]

#### **1.4. Равновесие фаз: условия равновесия фаз, термодинамические диаграммы и таблицы, правило фаз, теплота фазового перехода.**

##### Методические указания

Двухфазная гетерогенная система может рассматриваться как две соприкасающиеся гомогенные однородные системы. Для устойчивого равновесия гетерогенной системы должны соблюдаться условия равновесия ее составляющих однородных систем, представляющих различные фазы вещества.

Каждая из фаз является однородной системой с одинаковыми физическими свойствами во всех ее частях. Характерная особенность фаз – наличие границ, отделяющих данную фазу от соприкасающихся с ней других фаз. Вещество может переходить из одной фазы в другую. Переход вещества из одной фазы в другую, сосуществующую с первой, называется *фазовым переходом* или *фазовым превращением*. Необходимо рассмотреть сущность и разнообразие фазовых переходов: *испарение* или *парообразование*, *возгонка* или *сублимация*, *конденсация*, *плавление*, *затвердевание* или *кристаллизация*. Рассмотрите классификацию точек фазового перехода: *точка кипения* (она же точка конденсации) – переход жидкость–пар; *точка плавления* (она же точка затвердевания) – переход твердое тело–жидкость; *точка сублимации* – переход твердое тело–пар.

Фазовые переходы сопровождаются поглощением или выделением теплоты, называемой *теплотой фазового перехода*. Теплота фазового перехода тратится как на работу расширения, так и на преодоление сил межмолекулярного взаимодействия, выражающееся в разрушении ассоциированных комплексов (большого или меньшего числа молекул), при этом уменьшается и плотность вещества. При плавлении или сублимации теплота фазового перехода затрачивается на разрушение кристаллической решетки твердого тела.

Обратите внимание, что с ростом давления ассоциация в паровой фазе прогрессирует. Так как жидкая фаза находится под весьма большим внутренним давлением, то определяющим фактором является не давление, а температура. С ростом последней ассоциация уменьшается. Поэтому с ростом температуры и давления теплота парообразования уменьшается. И далее, так как процесс сублимации (переход твердое тело–газ) происходит

при очень низких давлениях, то теплота сублимации должна быть весьма велика (больше, чем теплота плавления или теплота парообразования).

Удельная теплота фазового перехода может быть определена при помощи одного из следующих уравнений:  $r = i_2 - i_1$ ;  $r = T(s_2 - s_1)$ .

Равновесное сосуществование нескольких соприкасающихся между собой различных фаз вещества называются *фазовым равновесием*.

Необходимо уяснить условия фазового равновесия на примере равновесного состояния системы, состоящей из двух фаз одного и того же вещества. Для того, чтобы было равновесие между обеими соприкасающимися фазами вещества, обязательно также, как и для однородного тела, выполнении условий механического и теплового равновесия – одинаковые *давление и температура обеих фаз*, т.е.  $p_1 = p_2$  и  $T_1 = T_2$ . В отличие от однородного тела для равновесия сосуществующих фаз, каждая из которых может переходить в другую, этих условий недостаточно. Для равновесия требуется, чтобы не происходил преимущественный рост одной фазы за счет другой, т.е. устойчивость фаз в состоянии равновесия была одинаковой. Это третье условие находится из общих условий равновесия при рассмотрении уравнения первого и второго начала термодинамики для систем с переменным количеством вещества:  $TdS = dU + pdV - \phi dG$ . Рассматривая выражение для полного дифференциала энтропии двух подсистем (двух фаз)  $dS_{\text{нео}} = dS_1 + dS_2 = 0$ , получаем известные условия равновесия одинаковых температуры и давления в обеих фазах, а также новое условие – равенство *химических потенциалов*  $\phi_1 = \phi_2$ . Таким образом, если две фазы находятся в равновесии, то *температуры, давления и химические потенциалы* этих фаз равны между собой. Отметим очень важный момент: из условия фазового равновесия предполагается, что давления и температуры обеих фаз в состоянии равновесия одинаковы, т.е.  $\phi_1(p, T) = \phi_2(p, T)$ . Решите это уравнение относительно  $p$  и найдете зависимость давления при фазовом равновесии от температуры  $p = p_s(T)$ , т.е. давление при фазовом равновесии есть функция от температуры. Из этого следует, что две фазы могут находиться в равновесии одна с другой не при любых  $p$  и  $T$ , а при вполне определенных значениях последних, причем задание одного из этих параметров вполне определяет значение другого. Из условий равновесия следует также, что и удельные объемы  $v_1$  и  $v_2$  равновесно сосуществующих фаз являются функциями только температуры  $T$ . Вид этих функций может быть найден из уравнения состояния каждой из фаз путем подстановки в них значения  $p$  из уравнения  $p = p_s(T)$ .

При анализе фазовых равновесий и процессов фазовых переходов важную роль играет правило фаз Гиббса. Оно устанавливает зависимость

между числом независимых интенсивных переменных, определяющих состояние термодинамической системы, находящейся в равновесии (их часто называют *степенями свободы системы*), числом фаз и числом компонентов системы:  $c = k - f + 2$ , где  $c$  – число степеней свободы термодинамической системы;  $k$  – число компонентов системы;  $f$  – число фаз в системе. На примере можно показать, что если число степеней свободы  $c = 2$  (однокомпонентная однофазная система), и независимыми переменными являются  $p$  и  $T$ , то это означает, что если для такой системы произвольно задать давление и температуру, то все другие интенсивные параметры системы (удельный объем, энтальпия, энтропия и др.) будут определены однозначно. Очень важный вывод можно сделать на следующем примере: система состоит из чистого вещества и содержит две фазы, находящиеся в равновесии между собой. В этом случае  $c = 1$ , т.е. система обладает только одной степенью свободы, а независимыми переменными, полностью определяющими равновесное состояние каждой фазы системы, могут являться, например, давление  $p$  или температура  $T$ . Таким образом, если мы знаем температуру фазового перехода, то она однозначно определяет собой все другие интенсивные термодинамические величины каждой из фаз.

Из правила фаз Гиббса вытекает очень важный вывод: поскольку число степеней свободы величина положительная и при равновесии рассматриваемых систем должно соблюдаться условие  $f \leq 2 + k$ , то невозможно для однокомпонентной системы одновременное существование более 3-х фаз или аллотропных модификаций вещества.

Если в координатах  $p - T$  построить кривую  $p = p_s(T)$ , то точки этой кривой будут представлять собой те состояния, в которых имеет место равновесие фаз. Поэтому кривая  $p_s(T)$  получила название *кривой равновесия фаз*, а сама диаграмма – *фазовой диаграммой*. Фазовая диаграмма может быть построена также в координатах  $p - v$ ,  $T - s$ ,  $i - s$  и т.д. Следует рассмотреть эти диаграммы на примере воды, как одного из наиболее распространенного теплоносителя и рабочего тела. Обратите внимание, что кривая фазового равновесия жидкой и газообразной фаз проходит всегда под острым углом к оси температур, так как давление насыщенного пара возрастает с температурой. Эта кривая имеет конечную протяженность и заканчивается в некоторой точке  $K$ , соответствующей вполне определенным для данного вещества значениям температуры и давления. Эта конечная точка получила название *критической точки*, а соответствующие ей значения температуры и давления – *критической температуры*  $T_k$  и *критического давления*  $p_k$ . Следовательно, при температуре выше критической сжижение газа и переход жидкости в пар

невозможно, т.е. между жидким и газообразным состояниями вещества не имеется принципиального различия.

Уясните фазовую диаграмму на примере воды, когда она может находиться, как и любое другое вещество, в трех агрегатных состояниях (фазах): твердой, жидкой и газообразной фазе. Три линии представляют собой геометрическое место точек, в которых находится в равновесном состоянии любая пара из трех агрегатных состояний вещества. Все три кривые равновесного состояния различных фаз вещества пересекаются в некоторой определенной для каждого вещества точке, называемой *тройной точкой*. В этой точке в термодинамическом равновесии находятся три различных фазы вещества – твердая, жидкая и газообразная.

Рассмотрите вывод уравнения кривой фазового перехода (уравнение Клапейрона–Клаузиуса), на примере двух фаз, вначале находящихся в равновесии при давлении  $p$  и  $T$ , а затем выведенных из состояния равновесия изменением в каждой из фаз температуры на величину  $dT$  и давления на величину  $dp$  таким образом, чтобы фазы при новой температуре продолжали оставаться в равновесии. В итоге получено уравнение Клапейрона–Клаузиуса  $dp/dT = r/[T(v_2 - v_1)]$ . Проиллюстрируйте это уравнение для трех конкретных видов фазовых переходов.

Отметьте, что есть некоторые особенности фазовых переходов. Теплоемкость  $c_p$  в процессе фазового перехода равна бесконечности  $c_p = dq/dT = \infty$ , так как  $dq \neq 0$ , а  $dT = 0$ . Коэффициенты объемного (изобарного) расширения и изотермического сжатия равны бесконечности.

Убедитесь, что термодинамический анализ различных процессов изменения состояния тел требует знания свойств этих тел. Термодинамические свойства наиболее важных в техническом отношении рабочих тел в настоящее время достаточно хорошо изучены. На основе точных опытов для ряда важнейших веществ составлены специальные таблицы, содержащие в систематизированном виде данные о термодинамических свойствах этих веществ. Термодинамические таблицы менее наглядны, чем диаграммы, но более точны в определении значений параметров. Диаграммы и таблицы дополняют друг друга.

Обратите внимание, что фазовые переходы делятся на переходы *первого* и *второго* родов. Разделение основано на различии внутрикристаллических изменений, оказывающих влияние на характер температурной зависимости термодинамических параметров минералов и их макроскопических свойств.

При *фазовых переходах первого рода* имеет место поглощение или выделение теплоты и скачкообразное изменение термодинамических параметров, которые при изобарно-изотермических процессах являются

зависимыми. Изменение давления при фазовых переходах первого рода осуществляется согласно уравнению Клапейрона–Клаузиуса.

При *фазовых переходах второго рода* происходит скачкообразное изменение макроскопических свойств минералов (теплоемкости и коэффициента теплового расширения). Изменение в расположении атомов в кристаллической решетке происходит непрерывно, что приводит к непрерывности изменения термодинамических параметров и отсутствию поглощения или выделения теплоты перехода.

Большая часть фазовых переходов в минералах относится к фазовым переходам первого рода, которые являются обратимыми, однако последствия обратимых процессов в отдельных минералах приводит к необратимым изменениям в породах в целом. Движущей силой фазовых переходов в горных породах является подводимая энергия в виде теплоты. При нагревании минералов породы тепловое движение частиц в узлах кристаллической решетки становится более интенсивным, связи между ними нарушаются и решетка перестраивается в новую более устойчивую форму. При этом внутренняя энергия минералов уменьшается, а часть подведенной теплоты и накопленной минералами энергии высвобождается, совершая внешнюю работу. Фазовые переходы в минералах происходят в основном в интервале температур 200-900°C, что сопровождается резким падением их упругости. Это приводит к увеличению энергоемкости их разрушения. С другой стороны, при фазовых переходах имеет место уменьшение прочности минералов, что наоборот, создает условия для повышения эффективности их разрушения.

#### Вопросы

1. Дать определение фазовому переходу и рассмотреть сущность и разнообразие фазовых переходов.
2. Что такое теплота фазового перехода, на что она расходуется? По каким зависимостям она может быть вычислена?
3. Как изменяется теплота фазового перехода с повышением давления и температуры?
4. Определите понятие фазового равновесия и обоснуйте условия фазового равновесия.
5. Какая существует зависимость давления при фазовом равновесии от температуры?
6. Какая функциональная зависимость существует для удельных объемов равновесно сосуществующих фаз?
7. Расскажите правило фаз Гиббса, приведите примеры. Какое условие вытекает из правила фаз Гиббса при рассмотрении равновесных систем?
8. Что такое кривая равновесия фаз и фазовая диаграмма? Приведите примеры фазовых диаграмм.
9. Какой физический смысл критической и тройной точки?

10. Выведите уравнение Клапейрона–Клаузиуса.
11. Проиллюстрируйте уравнение Клапейрона–Клаузиуса для трех конкретных видов фазовых переходов.
12. Поясните особенности некоторых величин при фазовых переходах, таких как изобарная теплоемкость, коэффициента объемного (изобарного) расширения и коэффициента изотермического сжатия.
13. Каким способом получены знания о свойствах веществ, приведенных в термодинамических таблицах?
14. В чем различие фазовых переходов первого и второго рода? К какому роду фазового перехода относятся фазовые переходы в породах и минералах?

*Литература:* [2-6, 14, 15]

**1.5. Основные термодинамические процессы и циклы: изотермический, изобарический, изохорический, адиабатический, политропический процессы, смешение идеальных газов, обратимые циклы, работа цикла, термодинамическая вероятность.**

*Методические указания*

Обратите внимание, что наиболее важная задача термодинамического анализа состоит в описании процессов, которые происходят телами вследствие внешнего энергетического воздействия, а также в определении свойств тел в состоянии равновесия. Далее подлежат определению величины конечного состояния тела, достигаемого в результате процесса, произведенная работа и количество полученной или отданной телом теплоты.

Следует провести исследование простых термодинамических процессов идеального газа, таких как изотермический, изобарный, изохорный, адиабатный, при этом теплоемкость газа считать постоянной. Сначала дать определение процессу, установить уравнение процесса. Затем изобразить линию процесса в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах. Установить связь между начальными и конечными основными параметрами состояния процесса. Определить изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Определить количество теплоты, работы изменения объема и полезной (располагаемой) работы. Кроме того для адиабатного процесса рассмотреть показатель адиабаты.

При исследовании политропного процесса необходимо выполнить выше изложенные рекомендации, но дополнительно определить, чему равен показатель политропы, теплоемкость политропного процесса. Кроме этого необходимо провести анализ и обобщение политропного процесса. Показать, что рассмотренные ранее простые процессы являются частным случаем политропного процесса. Провести совместное изображение перечисленных процессов в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах, что придает

определенность, большую информативность построению, облегчает понимание явлений, стоящих за изображаемыми процессами.

Необходимо иметь представление об идеальном газе.

В термодинамике часто встречаются смеси чистых веществ, например воздух, дымовые газы и т.д. Если между чистыми веществами, составляющими смесь, отсутствуют химические реакции, то такая смесь подчиняется основным газовым законам и уравнениям состояния и при этом для смеси соблюдается аддитивность термодинамических свойств компонентов. Следует изучить закон Дальтона и уяснить, что называется парциальным давлением компонента. Состав смеси является важнейшей ее характеристикой и может быть задан тремя видами: массовыми, объемными и молярными (мольными) концентрациями. Изучить понятие концентрация и рассмотреть все ее виды, а также, каким образом преобразовать один вид в другой. Рассмотреть кажущуюся молярную массу, газовую постоянную, плотность, теплоемкость смеси.

В качестве обратимых циклов необходимо рассмотреть прямой и обратный циклы Карно. Изобразить циклы в  $Ts$  и  $pV$  диаграммах. Для прямого цикла определить количество подводимого и отводимого тепла, работу цикла, КПД цикла через количества теплоты и температуры. Для обратного цикла определить количество подводимого тепла, затраченную работу на совершение цикла, холодильный коэффициент цикла через количества теплоты и температуры.

Существуют понятия математической и термодинамической вероятности. Следует ознакомиться с понятиями макроскопического и микроскопического состояний термодинамической системы. Изучите понятие термодинамической вероятности. Установить взаимосвязь между энтропией и термодинамической вероятностью.

### Вопросы

1. Что такое идеальный газ?
2. Дайте определение каждому из процессов.
3. Чем отличаются изотерма и адиабата в  $pV$  диаграмме?
4. Изобразите изобару и изохору в  $Ts$  диаграмме.
5. Чему равна работа изменения объема в изохорном процессе?
6. Как по-другому называют адиабатный процесс, используя параметр состояния, постоянный в этом процессе?
7. Чему равно изменение внутренней энергии и энтальпии в изотермическом процессе?
8. Чему равна работа изменения объема в изобарном процессе?
9. При показателе политропы равном 1, какой получится процесс?
10. Чему равен показатель политропы для изохорного процесса?
11. Если показатель политропы равен 0, то какой процесс является частным случаем политропного?

12. Расскажите закон Дальтона.
13. Дайте определение массовой, объемной и мольной концентрации.
14. Чему равен КПД прямого цикла Карно?

*Литература:* [2-7, 14, 15]

**1.6. Свойства газов, паров, жидкостей и твердых тел: реальные газы, уравнение состояния реальных газов, испарение и конденсация, насыщенный, влажный и перегретый пар, теплоемкость, теплопроводность и тепловое расширение твердых тел, упругие, прочностные, электрические и магнитные свойства твердых тел.**

*Методические указания*

Изучение начинают с рассмотрения понятия реальный газ. Существует множество уравнений состояния реальных газов, но наиболее простым уравнением, достаточно правильно передающим основные закономерности поведения реальных газов даже при переходе их в жидкое состояние, является уравнение Ван-дер-Ваальса.

Следует ознакомиться с такими понятиями как парообразование, конденсация, сублимация, десублимация, состояние насыщения, температура и давление насыщения, влажный пар, степень сухости и степень влажности пара, сухой пар, перегретый пар при этом рекомендуется пользоваться термодинамическими диаграммами для воды из п. 1.4.

При изучении теплоемкости следует обратиться к п. 1.2., затем рассмотрите такие свойства как теплопроводность и тепловое расширение тел, характер их изменения в зависимости от температуры. Упругие свойства горных пород характеризуются тремя параметрами: модулем упругости (Юнга), модулем сдвига и коэффициентом Пуассона. Ознакомьтесь с прочностными свойствами горных пород. К основным электрическим и магнитным свойствам относятся удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла (коэффициент) диэлектрических потерь, магнитная восприимчивость. Кроме того следует иметь представление об изменении комплексов физических свойств горных пород в зависимости от температуры.

*Вопросы*

1. Что называют реальным газом?
2. Каким образом выглядит уравнение состояния Ван-дер-Ваальса?
3. Дайте определение парообразованию, чем отличается от испарения?
4. Что такое конденсация и сублимация?
5. Что подразумевают под состоянием насыщения?
6. Расскажите, что называют влажным, сухим и перегретым паром.
7. Чем степень сухости отличается от степени влажности, их взаимосвязь?
8. Поясните термин теплопроводность и температуропроводность.

9. В чем отличие теплового расширения чистых минералов и горных пород? Расскажите о наличии остаточных деформаций после цикла «нагрев-охлаждение».

10. Расскажите об изменении упругих свойствах горных пород и минералов в зависимости от температуры.

11. В чем характерная особенность разрушения (потеря прочностных свойств) скальных пород как в области низких, так и в области высоких температур?

12. Как проявляется электронная и ионная проводимость минералов и горных пород с повышением температуры?

13. Назовите ряд комплексов физических свойств горных пород и что они характеризуют.

14. Как делят минералы и горные породы в зависимости от энергии активации?

*Литература:* [4-7].

**1.7. Изэнтропическое течение газов и жидкостей: основные уравнения течения, изэнтропическое течение газов и паров в каналах, сопло Лавалья.**

*Методические указания*

При изучении необходимо обратить внимание на следующие уравнения: уравнение неразрывности (сплошности) потока, в том числе и в дифференциальном виде, уравнение импульсов (Бернулли), уравнение первого закона термодинамики для установившегося потока. Затем рассмотрите понятия: скорость звука, максимальная и критическая скорости потока, критическое отношение давлений, сопло и диффузор, сопло Лавалья, число Маха. Изучите алгоритм расчета истечения из сопла для дозвукового, звукового и сверхзвукового режима, при этом необходимо рассмотреть изменение параметров (давления, температуры, скорости) по длине сопла.

*Вопросы*

1. Что представляет собой уравнение неразрывности?
2. Дайте определение скорости звука.
3. Что такое сопло, а также сопло Лавалья?
4. Расскажите, чем отличаются между собой дозвуковой и звуковой режимы.
5. Что называют числом Маха?
6. Что значит адиабатное течение?

*Литература:* [5, 7].

**2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ (СИНЕРГЕТИКА)**

**2.1. Основные постулаты термодинамики необратимых процессов: общее выражение для диссипативной функции, диссипативная функция вязкой и теплопроводящей жидкости, термодинамика термоэлектрических явлений.**

Методические указания

Необходимо предварительно уяснить, что действительные процессы в отличие от идеальных являются неравновесными. Степень необратимости реальных процессов, т.е. отклонение их от идеальных, может быть настолько значительной, что приближенное описание реальных процессов с помощью уравнений для идеальных процессов может привести к существенным ошибкам. С другой стороны важно знать развитие процесса во времени, что невозможно выяснить исходя из представления о квазистатическом, т.е. бесконечно медленном процессе.

Термодинамический анализ неравновесных процессов составляет главную задачу и содержание термодинамики необратимых процессов. Этот анализ основывается на втором начале термодинамики с использованием также первого и законов сохранения вещества, заряда, количества движения. Термодинамика необратимых процессов позволяет значительно глубже осветить сущность различных физических явлений и выяснить недоступные для обычного термодинамического анализа детали реальных процессов изменения состояния тел. Термодинамика необратимых процессов образовалась путем соединения методов теории переноса с классической термодинамикой.

Вначале обратитесь к основным феноменологическим соотношениям. Это *уравнение Гиббса* в самом общем случае для любой системы  $TdS = dU + pdV + \sum_{j=2} A_j da_j - \sum_k \phi_k dG_k$ . Затем рассмотрите

необратимый процесс изменения состояния системы, когда происходит прирост энтропии, который можно представить в виде двух слагаемых  $dS = dS_\Omega + dS_i$ : *потоком энтропии*, вызванным взаимодействием системы с окружающей средой; *производством энтропии* системы вследствие внутренних процессов переноса теплоты, вещества, импульса, электрического заряда и т.п. Первое слагаемое (количество энтропии, подводимое в систему через ее граничную поверхность  $\Omega$  за время  $\tau$ ) удобно представлять с помощью вектора плотности потока энтропии  $dS_\Omega/d\tau = -\int \vec{J}_s d\vec{\Omega}$  или с учетом теоремы Остроградского  $dS_\Omega/d\tau = -\int \text{div} \vec{J}_s dV$ . Второе слагаемое  $dS_i/d\tau = \int [\partial(\rho s)_i/\partial\tau] dV$ .

Подставив эти величины в уравнение прироста энтропии, будем иметь уравнение баланса энтропии. Оно, как вы убедитесь, показывает, что скорость изменения энтропии системы равна *производству энтропии* за вычетом *потока энтропии* по ограничивающей систему поверхности.

Усвойте также, что произведение производства энтропии на абсолютную температуру системы называется *обобщенной диссипативной функцией*  $\psi = T(\partial S_i / \partial \tau)$ .

Что касается осмысления понятий *обобщенных потоков* и *обобщенных сил*, то их можно усвоить при рассмотрении замкнутой системы, состояние которой определяется  $n$  термодинамическими параметрами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , исключая внутреннюю энергию и объем системы. Заметьте, что численная величина каждого из параметров  $x_j$  (выбрана как разность параметров в данном и равновесном состоянии) будет характеризовать степень неравновесности данного состояния. Скорость изменения параметра  $x_j$ , т.е. величина  $\partial x_j / \partial \tau$ , будет зависеть от значений всех параметров:  $\partial x_j / \partial \tau = f_x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . При разложении функции  $f_x$  в ряд по степеням  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в случае малого отклонения от равновесия ограничиваются первыми членами:  $\partial x_j / \partial \tau = \sum_{k=1}^n \varepsilon_{jk} x_k$ , где  $\varepsilon_{jk}$  –

постоянный коэффициент. Зная, что в состоянии равновесия энтропия изолированной системы имеет максимальное значение и частные производные от  $S$  по  $x_j$  равны нулю, а также обозначив  $\partial S_i / \partial x_j$  через  $X_j$ , то из разложения этой функции в ряд по степеням  $x_1, x_2, \dots, x_n$  дает

$X_j = -\sum_{k=1}^n \beta_{jk} x_k$ , где коэффициент  $\beta_{jk}$  определяется значением второй производной  $\partial^2 S_i / \partial x_j \partial x_k$  в состоянии равновесия, поэтому  $\beta_{jk} = \beta_{kj}$ . С помощью этих уравнений получено важная зависимость  $-\partial x_j / \partial \tau = \sum_{k=1}^n \gamma_{jk} X_k$ . Величины  $\gamma_{jk}$  называются *кинетическими*

*коэффициентами*, а также *коэффициентами переноса*. Эти коэффициенты симметричны относительно индексов  $j$  и  $k$ , т.е.  $\gamma_{jk} = \gamma_{kj}$ . Это равенства, называемое *соотношением взаимности*, составляет содержание теоремы **Онзагера**. Доказательство теоремы Онзагера основывается на обратимости динамических законов микромира. Производную  $-\partial x_j / \partial \tau$ , где  $x_j$  есть термодинамический параметр, называют *обобщенным потоком*, а величину  $X_j$  – соответствующей *обобщенной термодинамической силой*.

Обратите внимание. При рассмотрении диссипативной функции вязкой и теплопроводящей жидкости допускают, что диффузионные потоки, химические реакции и электрический ток отсутствуют. Тогда в этом случае действуют обобщенные силы:  $X_Q$  – связана с молекулярным переносом теплоты и является вектором;  $X_{ml}$  – связана с потоком

импульса и является тензором. Следовательно, выражение для плотности теплового потока  $\vec{q} = -\lambda \text{grad } T$ , переносимой посредством теплопроводности в движущейся жидкости, не должно содержать  $X_{ml}$ . Из этого не следует, что вязкость не влияет на количество переносимой в жидкости теплоты. От величины вязкости зависит распределение скорости и температуры жидкости, и далее, перенос количества теплоты, переносимой посредством теплопроводности. Следовательно, между  $q$  и  $X_{ml}$  существует косвенная связь. В связи с этим в выражении плотности потока энергии необратимой частью является наличие внутреннего трения и теплопроводности.

Рассматривая термодинамику термоэлектрических эффектов, обратите внимание, что при прохождении электрического тока по замкнутой цепи, наблюдаются следующие термоэлектрические эффекты: 1) возникновение электродвижущей силы в месте контакта, т.е. на стыке двух различных металлов, когда температура стыков различна (эффект Зеебека); 2) выделение или поглощение теплоты на стыке двух проводников в количестве, пропорциональном силе тока (эффект Пельтье); 3) выделение в металлическом проводнике, температура которого меняется от сечения к сечению, теплоты в количестве, пропорциональном градиенту температуры (эффект Томсона).

#### Вопросы

1. В чем различие действительных процессов от идеальных?
2. Что составляет главную задачу и содержание термодинамики необратимых процессов?
3. Опишите и расскажите об одном из основных феноменологических соотношений для любой системы – уравнении Гиббса.
4. Рассмотрите необратимый процесс изменения состояния системы, когда происходит прирост энтропии потоком энтропии и производством энтропии.
5. Что называется обобщенной диссипативной функцией?
6. Дайте понятия обобщенных потоков и обобщенных сил.
7. Расскажите о соотношении взаимности, которое составляет содержание теоремы Онзагера.
8. Раскройте содержание диссипативной функции вязкой и теплопроводящей жидкости.
9. В чем сущность термодинамики термоэлектрических эффектов.

Литература: [3, 5, 14].

**2.2. Теория теплопередачи: основные определения, передача теплоты теплопроводностью, распространение тепла в твердых телах, теплообмен при течении жидкости в трубе, теплообмен при кипении жидкости и конденсации пара, виды теплоносителей.**

### Методические указания

Первоначально обратитесь к выяснению методов изучения физических величин: феноменологического и статистического. Уясните достоинства и недостатки каждого из них. Тщательно разберите способы переноса теплоты – теплопроводностью, конвекцией и излучением – поймите их сущность. Следует изучить основные понятия: теплопередача, теплоотдача, конвекция, тепловой поток, плотность теплового потока.

Составьте представление на основе математических выражений для температурного поля и температурного градиента. Изучите закон Фурье и уясните сведения о коэффициенте теплопроводности веществ. Подробно усвойте вывод дифференциального уравнения теплопроводности, понятие о коэффициенте температуропроводности и условия однозначности (краевые условия) для процессов теплопроводности, в которые входят геометрические, физические, начальные (временные) и граничные условия. В свою очередь из граничных условий выделяют четыре рода.

Обратите внимание на процессы передачи теплоты через плоскую и цилиндрическую стенку при различных граничных условиях, на сущность закона Ньютона-Рихмана и коэффициента теплопередачи.

Рассматривая конвективный теплообмен, обратите внимание на сущность вынужденной и свободной (естественной) конвекции. Здесь же рассмотрите физические свойства жидкостей и газов как теплоносителей. Рассмотрите виды теплоносителей. Изучите вопросы о режимах течения и пограничном слое, особенности движения и теплообмена в трубах.

Обратите внимание на сущность лучистого теплообмена и изучите закон Стефана-Больцмана.

Ознакомьтесь с физическим смыслом и пределами применения следующих критериев подобия: Био, Рейнольдса, Пекле, Прандтля, Нуссельта.

Обратите внимание при рассмотрении вопросов конденсации пара, что существует пленочная и капельная конденсация. При рассмотрении процессов кипения также изучите сущность пузырькового и пленочного кипения, а также критического теплового потока.

### Вопросы

1. Дать понятия и содержание методов изучения физических величин.
2. Охарактеризуйте способы переноса теплоты и их физическую сущность.
3. Раскрыть понятия температурного поля, градиента и коэффициента теплопроводности.
4. Изложите закон Фурье.
5. Раскройте физический смысл закона Ньютона-Рихмана и коэффициента теплоотдачи.
6. Раскройте содержание закона Стефана-Больцмана.

7. Расскажите о физических свойствах жидкостей и газов, их зависимость от температуры, о видах теплоносителей.
8. Какие режимы течения реализуются при движении теплоносителей в трубах и дайте характеристику этим режимам.
9. Расскажите о числах подобия, физическом смысле их, приведите примеры подобных явлений.
10. Раскройте сущность процессов, связанных с конденсацией пара.
11. Раскройте сущность процессов, связанных с кипением жидкости.

Литература: [7, 10, 17].

### 3. ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

**3.1. Химическое равновесие: основные понятия, химические реакции, закон Гесса, закон действующих масс, максимальная работа реакции. Уравнение Кирхгофа.**

Методические указания

Необходимо отметить, что химическая термодинамика изучает условия применения законов термодинамики к химическим и физико-химическим явлениям. В ней рассматриваются главным образом: 1) тепловые балансы процессов, включая тепловые эффекты физических и химических процессов; 2) фазовые равновесия для индивидуальных веществ и смесей; 3) химическое равновесие. Кроме того, химическая термодинамика изучает системы, состав которых меняется в зависимости от условий, в которых находится система, т.е. *рассматриваются системы, состоящие из нескольких веществ с переменной массой*. Обратите внимание, что рассматриваются два типа систем с переменной массой: масса компонента не является постоянной вследствие химических реакций с образованием новых веществ и другие системы, когда общая масса каждого компонента является постоянной, но распределена по различным фазам, так что переменной является масса любой из фаз.

Важно подойти к пониманию определения состояния химического равновесия: это состояние, когда количество каждого из участвующих в реакции химически реагирующих веществ или компонентов с течением времени не меняется. То есть, химическое равновесие является подвижным, или динамическим равновесием, устанавливающимся в результате двусторонней реакции при равенстве скоростей протекания прямой и обратной реакции. И далее, состояние химического равновесия определяется только параметрами системы и не зависит от того, каким образом происходила реакция.

Уясните понятие теплового эффекта: если реакция протекает термодинамически необратимо и при постоянных  $p$  и  $V$ , а получаемые продукты имеют ту же температуру  $T$ , что и исходные вещества, то теплоту, выделяемую или поглощаемую при этом процессе, называют

*тепловым эффектом.* Обратите внимание, что термин «тепловой эффект» процесса не является синонимом термина «теплота процесса». Теплота процесса от пути его протекания, а тепловой эффект не зависит, т.е. тепловой эффект реакции определяется начальным и конечным состояниями системы. Независимость теплового эффекта реакции от пути перехода была установлена впервые русским академиком Г.Г. Гессом (1836 г.) и носит название *закона Гесса: тепловой эффект процесса не зависит от промежуточных стадий, а определяется лишь начальным и конечным состояниями системы.* Математическая формулировка закона Гесса выражается уравнениями:  $Q_V = U_2 - U_1$  при условии постоянства  $T$  и  $V$ ;  $Q_p = I_2 - I_1$  при условии постоянства  $T$  и  $p$ . При этом подразумевается, что единственной работой, совершаемой системой, является работа против сил внешнего давления. Ввиду того, что в химии и химической технологии чаще всего встречаются изобарные процессы, поэтому пользуются в основном изобарными тепловыми эффектами, т.е.  $\Delta I$ .

Отметьте важный момент, что из закона Гесса вытекают следующие выводы: 1) теплота образования соединения из исходных веществ не зависит от способа, каким это соединение получено; 2) теплота разложения соединения тех же исходных веществ равна по значению и противоположна по знаку теплоте образования соединения из этих же веществ; 3) если из двух разных систем в результате различных процессов образуются одинаковые продукты, то разность между значениями тепловых эффектов этих процессов равна теплоте перехода первой системы во вторую. Из третьего вывода вытекают два важные следствия: 1) *тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме теплот образования реагентов из простых веществ;* 2) *тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме теплот сгорания реагентов до одинаковых продуктов.* Заметьте, что *теплота (энтальпия) образования* сложного вещества есть *теплота (энтальпия) реакции синтеза* его из простых веществ, взятых в их наиболее устойчивых физических состояниях при заданных внешнем давлении и температуре. И далее, *теплота образования всех простых веществ* в их наиболее устойчивом состоянии равна нулю при любой температуре.

Также отметьте, что на основании выводов из закона Гесса можно решать ряд задач, представляющих практический интерес, например: 1) расчет тепловых эффектов реакций, недоступных для измерения ( $2C + O_2 = 2CO$ ); 2) вычисление тепловых эффектов таких реакций, осуществление которых в калориметре связано с различными трудностями (медленное протекание реакции влечет за собой рассеивание теплоты).

Отметьте, что термодинамика в приложении к химическим реакциям дает возможность установить направление реакции и условия химического

равновесия. Совокупность химических и физических факторов, обуславливающих возможность осуществления в данной системе химической реакции между несколькими веществами, называют *химическим средством* реакции, т.е. химическим средством называется величина, определяющая термодинамическую возможность (и направление) протекания данной реакции. Она характеризует способность различных веществ соединяться друг с другом. Обратите внимание на пример, когда мерой химического средства вступающих в реакцию веществ в изохорно-изотермической системе при установлении равновесия является энергия Гельмгольца, а в изобарно-изотермической – энергия Гиббса, так как эти энергии убывают, достигая в состоянии равновесия минимума. Поэтому в любой из этих систем возможны лишь те химические реакции, которые приводят к уменьшению упомянутых, соответствующих, энергий.

Важно отметить, что в химической термодинамике при рассмотрении химических процессов с участием идеальных газов имеет *закон действующих масс*. Рассмотрите пример, когда состояние равновесия некоторой химической реакции при постоянной температуре определяется соотношением  $n_1\phi_A + n_2\phi_B = n_3\phi_C + n_4\phi_D$ , где  $n_i$  – число молей вещества и  $\phi_i$  – химические потенциалы соответствующего реагента. Подчеркните, что химический потенциал моля идеального газа  $\phi_i = \phi_i^0 + RT \ln p_i$ , где  $\phi_i^0$  – стандартный химический потенциал компонента при 1 атм и температуре 298 К (постоянная величина). После простых преобразований и необходимых принятых обозначений обратите внимание на соотношение

$$\Delta\hat{O} = \Delta\hat{O}^0 + RT \ln \left( \frac{p_C^{n_3} \cdot p_D^{n_4}}{p_A^{n_1} \cdot p_B^{n_2}} \right) \text{ (уравнение изотермы химической реакции),}$$

в котором  $p_i$  – парциальные равновесные давления реагентов,  $\Delta\hat{O}^0$  – стандартная функция Гиббса химической реакции, а  $\Delta\hat{O}$  – функция Гиббса химической реакции, которая в состоянии равновесия  $\Delta\hat{O} = 0$ . Заметьте, что выражение под логарифмом в состоянии равновесия является постоянной величиной  $K_p$ , которую называют термодинамической константой равновесия, зависящую для данной реакции только от температуры и не зависящую от исходных давлений реагентов. Выражение

$$K_p = \left( \frac{p_C^{n_3} \cdot p_D^{n_4}}{p_A^{n_1} \cdot p_B^{n_2}} \right)_{eq}$$

является общим выражением *закона действующих масс*.

Обратите внимание, что с увеличением константы равновесия возрастает концентрация исходных продуктов реакции, т.е. реакция смещается в сторону распада конечных продуктов, и наоборот.

Следует учесть, что максимальная полезная внешняя работа, которая может быть произведена над внешним объектом работы в результате обратимой химической реакции, происходящей при постоянных  $T$  и  $p$ , равна разности энергий Гиббса системы в начальном и конечном состояниях, т.е. убыли Энергии Гиббса, а при постоянных  $T$  и  $V$  – убыли энергии Гельмгольца.

Зная, что химические реакции протекают при повышенных температурах, а не при стандартных, обратите внимание, что уравнение Кирхгофа определяет характер изменения тепловых эффектов изобарно-изотермических и изохорно-изотермических химических реакций в зависимости от температуры.

#### Вопросы

1. Что является предметом химической термодинамики?
2. Раскройте понятие состояния химического равновесия.
3. Чем отличаются экзотермические реакции от эндотермических реакций?
4. Что называют тепловым эффектом реакции?
5. Расскажите закон Гесса и дайте определение термину «теплота образования» веществ.
6. Какие выводы и следствия вытекают из закона Гесса, а также, какие задачи можно решать, имеющие практический интерес?
7. Что называют химическим сродством вступающих в реакцию веществ и что является мерой химического сродства любой системы, имеющей постоянные значения  $T$  и  $V$  или  $T$  и  $p$ ?
8. Поясните закон действующих масс.
9. Что называют максимальной полезной работой реакции?
10. В чем суть уравнения Кирхгофа?

Литература: [4, 8, 14, 16].

### **3.2. Растворы: условия равновесия в растворах, идеальные и разбавленные растворы, критические состояния.**

#### Методические указания

Вначале рассмотрите понятия и определения растворов, их классификацию. Уясните, что *раствором называют* термодинамически устойчивую гомогенную систему переменного состава, состоящую как минимум, из двух компонентов: растворенного вещества и растворителя (содержится в значительно большем количестве). Различают жидкие, твердые и газообразные растворы. Примерами растворов могут служить морская вода, воздух, некоторые сплавы.

Обратите внимание, что для выражения количества растворенного вещества в растворе вводится понятие – концентрация (количественный состав раствора). Общепринятые способы выражения состава: *мольные*

*доли* – отношение числа молей растворенного вещества к общему числу молей раствора; *весовая доля* – масса компонента в единице массы раствора; *объемная доля* – объем компонента в единице объема раствора; *мольность* (мольно-объемная концентрация) – число молей компонента в единице объема раствора (*молярность* – в 1 литре раствора). Отметьте, что применяется выражение концентрации, когда количество компонента раствора относят к определенному количеству растворителя (обычно на 1000 г или 55,51 моль воды) – это *мольно-весовое отношение*.

Внимательно рассмотрите вопрос о *растворимости* разных веществ друг в друге: газы обладают неограниченной растворимостью; жидкости – наиболее часто растворяются в определенных отношениях; твердые тела растворяются в жидкостях в ограниченной степени. Уясните, что *насыщенным раствором* называется раствор с максимально возможной в данных условиях концентрацией растворенного вещества. Заметьте, что насыщенный раствор находится в равновесии с чистым растворенным веществом и растворимость одного вещества в другом зависит от температуры и давления. Кроме того растворение вещества сопровождается выделением или поглощением некоторого количества теплоты. *Идеальными растворами* называются растворы, образование которых не сопровождается выделением или поглощением теплоты.

Важное обстоятельство связано с условиями равновесия растворов. Необходимо определять число степеней свободы рассматриваемого раствора согласно правилу Гиббса. В состоянии равновесия химические потенциалы каждого из компонентов имеют во всех фазах одно и то же значение. При равновесии двух фаз раствора пользуются уравнением, аналогичным уравнению Клапейрона-Клаузиуса.

Необходимо уяснить, что под *разбавленными растворами* понимают неидеальные растворы, в которых молярная концентрация одного из компонентов (а именно растворителя) близка к единице, а молярные концентрации всех остальных компонентов значительно меньше единицы. Здесь же необходимо отметить понятие *осмотического давления*: разность давлений, обусловленная бóльшим давлением в растворе перед полупроницаемой мембраной (проницаемой для растворителя, но не для растворенного вещества), чем давлением в чистом растворителе после мембраны. Осмотическое давление вычисляется по формуле Вант-Гоффа, схожим с уравнением состояния для идеального газа (вместо давления газа в формуле Вант-Гоффа стоит осмотическое давление, вместо объема газа – объем раствора и вместо количества газа – число молей растворенного вещества).

Следует разобраться с критическим состоянием раствора, состоящего из двух компонентов, когда состояние раствора определяется тремя независимыми параметрами: например, давлением, температурой и

массовой концентрацией растворенного вещества. Имеются область вокруг точки, когда обе фазы раствора имеют равные концентрации. Если при этом также исчезает различие между обеими фазами, т.е. если фазы являются идентичными, то такую точку называют *критической* (при данных давлении, температуре и концентрации), а область вокруг точки – *критическим состоянием* раствора.

#### Вопросы

1. Дать определение растворам, их классификацию. Приведите примеры.
2. Расскажите о понятии концентрация раствора и приведите примеры выражения количественного состава раствора.
3. Доложите о растворимости разных веществ. Что называется насыщенным раствором и идеальным раствором?
4. Расскажите об условиях равновесия растворов.
5. Что называется разбавленным раствором и осмотическим давлением?
6. Что такое критическое состояние раствора?

Литература: [4, 8, 14, 16].

## **4. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС**

**4.1. Процессы сушки в горной массе: виды воды в горной массе, условия протекания процессов сушки, тепло- и массообмен при сушке горной массы, поверхностное подсушивание кусков горной массы, техника и технология сушки горной массы.**

#### Методические указания

Обратите внимание, что процессы, связанные с удалением влаги (*обезвоживание* или *сушка*) с поверхности, а также из внутренних слоев различных веществ и материалов, включая уголь, руду, концентраты, можно отнести к числу наиболее распространенных процессов в технологиях промышленности и сельского хозяйства. Важно уяснить физическую сущность процесса обезвоживания: в материале могут происходить структурно-механические, реологические, химические и другие изменения, способствующие, например, повышению прочности материалов, увеличению теплоты сгорания топлив, уменьшению массы и объема транспортируемых материалов, удлинению срока хранения продуктов. Среди существующих методов обезвоживания выделяют физико-химический, механический и тепловой. Рассмотрите сущность каждого из перечисленных методов.

Сушка угля применяется на обогатительных фабриках, тепловых электростанциях и на углебрикетных фабриках. Сушка до заданной влажности аглоруды и концентратов является обязательным технологическим процессом. Энергетические затраты на сушку горной массы зависят от типа воды в ней и энергии связи. Согласно классификации П.А. Ребиндера, в основу которой положена энергия связи

влаги с материалом, выделяют по порядку убывания энергии связи три формы: химическую (вода, входящая в узлы кристаллической решетки минералов), физико-химическую (адсорбционная и осмотическая) и физико-механическую (капиллярная влага и влага смачивания). Последняя форма связи влаги делится на внутреннюю (физически связанная вода, содержащаяся в микропорах агрегатных кусков горной массы), поверхностную (физически связанная вода на поверхности агрегатных кусков горной массы) и гравитационную (стекающую под действием сил гравитации). Физико-механический тип связи оценивается коэффициентом поверхностного натяжения и капиллярным давлением. Поверхность минералов делится на *гидрофобную* и *гидрофильную*. Количественной мерой склонности к смачиванию является *краевой угол смачивания*.

Уясните, что к условиям протекания процессов сушки относится бóльшая относительная влажность воздуха у поверхности кусков горной массы по сравнению относительной влажности окружающего воздуха. В противном случае будет происходить поглощение паров воды горной массой. Эту способность называют *гигроскопичностью*.

Процесс сушки горной массы характеризуется кривыми сушки – изменением влажности и температуры горной массы во времени и изменением скорости сушки от влажности горной массы. С этим связаны определения критическая и равновесная влажность, а также периоды сушки. Подробно рассмотрите, что различают два периода при сушке горной массы. Первый период характеризуется линейным законом изменения влажности горной массы во времени, который продолжается до тех пор, пока влажность горной массы не станет равной критической, при высушивании ниже которой температура поверхности кусков горной массы начинает повышаться, а скорость сушки уменьшаться.

Подробно рассмотрите термины: сушка, смачиваемость, гигроскопичность, влажный материал, сушильный агент.

Следует рассмотреть конструкцию и принцип действия газовой барабанной сушилки, газовую трубу-сушилку, сушилку кипящего слоя и др. Кроме того необходимо обратить внимание на преимущества и недостатки каждого типа сушильной установки.

#### Вопросы

1. Что значит термин сушка?
2. Объясните, что называют гигроскопичностью.
3. Расскажите о критической и равновесной влажности.
4. Поясните принцип действия одной из сушилок.

Литература: [4, 9, 13].

**4.2. Термодинамические процессы обогатительного передела: необходимость окускования руд и концентратов, термообработка**

**брикетов, агломерация руды и обжиг окатышей, окислительные процессы при агломерации, магнетизирующий обжиг руд.**

Методические указания

Уясните, что необходимость предварительного окомкования и спекания руд – это требования, предъявляемые к качественной выплавке металла, например, выплавке чугуна в доменных печах. Эта необходимость продиктована тем, что шихта в доменной печи в процессе плавки непрерывно опускается, а навстречу ей движутся печные газы. Скорость движения газов 3-4 м/с, что превышает скорость витания частиц шихты крупностью 0,2-0,3 мм. Это способствует их выносу из доменной печи, что требует создания систем пылеулавливания.

Рассмотрите способы окускования руд и концентратов: брикетирование с последующим спеканием, агломерация и окомкование концентратов с последующим обжигом окатышей. Обратите внимание на оптимальный размер кусков руды, агломерата и окатышей.

Важно понять сущность окускования руд и концентратов брикетированием: прессование с последующей термической (обжиг) и химической обработкой брикетов. Рассмотрите подробно окислительные процессы при агломерации руд и магнетизирующий обжиг руд.

Вопросы

1. В чем сущность необходимости окускования руд и концентратов?
2. Расскажите о процессах термообработки брикетов.
3. Расскажите о процессе агломерации руды и обжиге окатышей на примере ленточной агломерационной машины.
4. Приведите примеры окислительных процессов при агломерации руд.
5. С какой целью проводится магнетизирующий обжиг руд.

Литература: [4, 9, 13].

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При решении задач необходимо приводить весь ход решения и математические преобразования. Решения задач сопровождать рисунками, краткими пояснениями и подробными вычислениями. При вычислении какой-либо величины нужно словами указать какую величину определяют и по какой формуле, на основе каких уравнений или законов. Записав формулу в общем виде и пояснив все входящие в нее величины, подставляют их численные значения, и затем результат вычислений. При записи заданных и полученных величин обязательно следует указывать единицы их измерения в системе СИ.

Контрольную работу выполняют в ученической тетради, в которой необходимо оставить поля для замечаний преподавателя. Условия задачи переписывают полностью, соблюдая последовательность, указанную в кон-

трольном задании. В конце работы следует указать список использованной литературы.

Если после проверки контрольная работа не зачтена, ее нужно выполнить повторно в соответствии с указаниями преподавателя.

Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, преподавателем не рецензируется.

К сдаче зачета или экзамена допускаются студенты, выполнившие контрольную работу и практические работы, предусмотренные планом.

При выполнении контрольной работы рекомендуется пользоваться литературой из списка, приведенного на страницах 7-8: для тем контрольных работ с 1 по 6 – [11, 12, 20, 21], для темы 7 – [13, 22], для тем 8 и 9 – [13]. Необходимые справочные данные для выполнения контрольной работы можно найти в литературе из списка [11-13, 20-22]. При решении задач из 9 темы использовать диаграмму состояния влажного воздуха (диаграмму Рамзина).

Согласно учебному плану студент-заочник выполняет контрольную работу, включающую 9 задач (по одной задаче из каждой темы). Номер задачи в теме определяют по последней цифре зачетной книжки, а номер варианта определяют по предпоследней цифре зачетной книжки. Например, две последние цифры номера зачетной книжки 60, – студент выполняет из каждой темы (их девять) десятую задачу и шестой вариант. Или, например, две последние цифры номера зачетной книжки 27, – студент выполняет из каждой темы седьмую задачу и второй вариант. Еще один пример, две последние цифры номера зачетной книжки 09, – студент выполняет из каждой темы девятую задачу и десятый вариант.

## 5. ЗАДАНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

### ТЕМА 1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

**Задача 1.1.** Манометр на паровом котле показывает  $p$ . Показание барометра  $B$ . Какое абсолютное давление в котле в паскалях (Па)? Какие были бы показания ртутного и водного манометров? Численные значения данных приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p$ , ат	3	4	3,5	5	6	4,5	5,3	3,8	6,7	7
$B$ , мм рт. ст	700	735	762	770	708	720	757	745	750	738

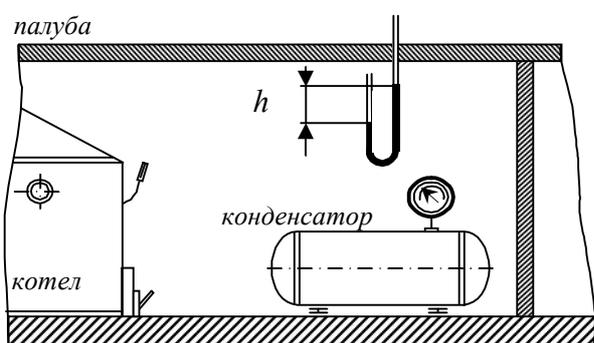


Рис. 1. К задаче 1.2

**Задача 1.2.** В машинном отделении миноносца (рис. 1) давление по водяному манометру  $h$ , показание палубного барометра  $B$ . Стрелка манометра

метра котла указывает  $p_m$ . По вакуумметру на конденсаторе отсчет  $p_v$ . Найти абсолютные давления: а) в помещении; б) в котле; в) в конденсаторе. Значения величин даны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h$ , мм вод. ст.	100	125	150	95	112	134	142	138	147	120
$p_m$ , ат.	19	11	14	18	15	20	23	17	22	10
$p_v$ , мм рт. ст.	640	600	550	620	573	562	557	584	590	632
$B$ , мм рт. ст.	750	770	738	720	757	745	735	755	740	745

### Задача 1.3.

Разрежение в газоходе 1 (рис. 2) измеряется тягомером 2 с наклонной трубкой. Определить абсолютное давление в газоходе 1, если длина столба жидкости равна  $l$  в трубке тягомера

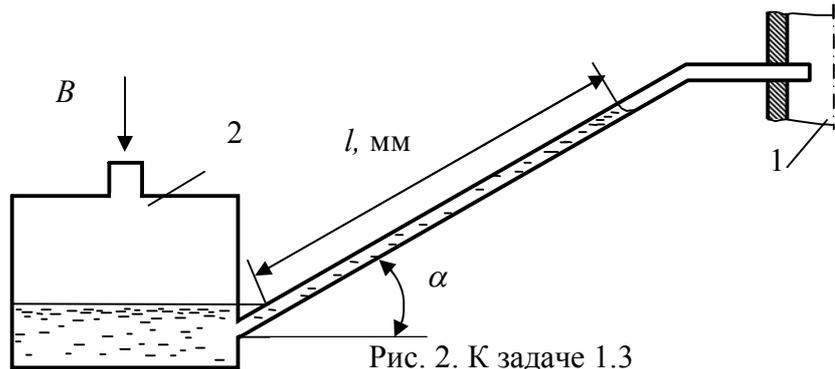


Рис. 2. К задаче 1.3

2, наклоненной под углом  $\alpha = 30^\circ$ . В тягомере находится вода с плотностью  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Показание барометра  $B$ . Давление выразить в Паскалях (Па), барах (бар), миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.) и килограммах силы на квадратный сантиметр ( $\text{кгс/см}^2$ ). Численные значения величин находятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l$ , мм	100	135	180	98	155	140	110	80	167	121
$B$ , мм рт. ст.	770	735	750	762	755	740	767	730	743	772

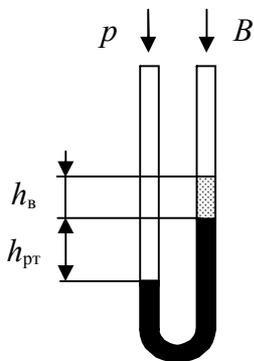


Рис. 3. К задаче 1.4

**Задача 1.4.** Ввиду вредного влияния оказываемого ртутными парами на человеческий организм при пользовании ртутными манометрами над уровнем жидкой ртути обычно наливается слой воды, препятствующий выделению паров ртути. Определить абсолютное давление в сосуде, если высота ртутного столба в U-образном манометре (рис. 3) составляет  $h_{рт}$ , высота столба воды над ним  $h_v$  и атмосферное давление  $B$ . Численные значения величин приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4.

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

$h_{рт}, \text{ мм}$	260	100	150	240	170	120	200	230	130	180
$h_B, \text{ мм}$	540	500	386	457	408	531	524	511	483	472
$B, \text{ бар}$	1,1	0,9	0,97	1,02	0,98	0,95	0,94	0,96	1	1,03

**Задача 1.5.** Определить массу газа, содержащегося в емкости объемом  $V$ , если давление газа по манометру равно  $p$ , а показание барометра  $B$  при температуре  $t$ . Значения величин даны в табл. 1.5.

Таблица 1.5

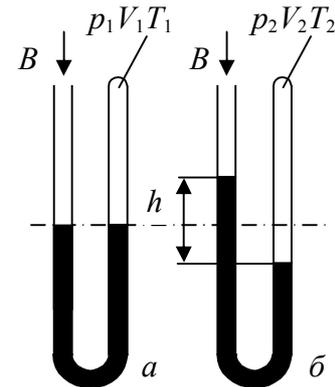
Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
$V, \text{ л}$	60	40	45	55	45	65	50	70	75	80
$p, \text{ МПа}$	1,08	2,1	1,2	0,5	0,9	1,12	2,5	1,5	1,9	1,3
$t, \text{ °C}$	18	25	23	19	20	28	15	22	26	32
$B, \text{ кПа}$	99	100	101	98	97,5	99,5	98,7	101,3	99,7	100,5

**Задача 1.6.** В сосуде находится газ под разрежением  $p$  при температуре  $t$ . Барометр показывает давление  $B$ . Определить удельный объем газа при этих условиях. Данные приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	Cl <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>
$p, \text{ кПа}$	10	15	13	8	29	35	25	40	12	19
$t, \text{ °C}$	19	28	22	18	26	25	15	23	20	30
$B, \text{ кПа}$	99,5	101	100	99	98,5	97,5	99,7	101,5	97,7	100,3

**Задача 1.7.** В калиброванную, U-образную, запаянную с одного конца трубку, заполненную ртутью, вводится воздух объемом  $V$  с температурой  $t_1$  (рис. 4 а). При этом мениски ртути в обоих коленах оказываются на одном уровне. Затем воздух в трубке подогревается до температуры  $t_2$  (рис. 4 б). Определить: 1) образовавшийся перепад давления  $h$  в мм рт. ст.; 2) давление подогретого воздуха  $p_2$ , если известно: барометрическое давление  $B$ , живое сечение трубки  $S = 1 \text{ см}^2$ , плотность ртути  $\rho = 13595 \text{ кг/м}^3$ . Данные приведены в табл. 1.7.

Рис. 4.  
К задаче 1.7

*Примечание.* Использовать уравнения законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака.

Таблица 1.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

$V, \text{ см}^3$	25	30	17	10	15	28	32	20	35	12
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	35	25	30	15	10	17	28	13	23
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	70	80	75	90	55	60	65	72	50	85
$B, \text{ мм рт. ст.}$	750	760	725	755	745	740	765	730	735	770

**Задача 1.8.** В сосуде объемом  $V$  находится газ при избыточном давлении  $p_{\text{ил}}$  и температуре  $t_1$ . Сколько газа надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило  $p_{\text{в2}}$  при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по барометру равно  $B$ . Данные приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3$	0,5	0,7	1,2	1,5	0,3	1,7	1,9	2	2,3	0,9
Газ	воздух	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{CH}_4$	$\text{NH}_3$	$\text{SO}_2$	$\text{Cl}_2$
$p_{\text{ил}}, \text{ МПа}$	0,2	0,3	0,4	0,25	0,35	0,42	0,15	0,22	0,37	0,18
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	22	34	26	32	19	12	18	25	14	21
$p_{\text{в2}}, \text{ кПа}$	54	63	42	56	48	61	45	58	50	40
$B, \text{ кПа}$	102	100	104	98	95	107	105	97	94	99

**Задача 1.9.** Сжатый воздух в баллоне имеет температуру  $t_1$  и избыточное давление  $p_{\text{ил}}$ . Во время пожара температура воздуха в баллоне поднялась до  $t_2$ . Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более  $p_{\text{кр}}$ ? Барометрическое давление равно  $B = 100$  кПа. Данные приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9.

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	15	20	17	22	18	23	16	21	19	24
$p_{\text{ил}}, \text{ МПа}$	2,3	2,5	1,8	2,1	1,9	1,7	2,2	2,0	2,4	2,6
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	450	460	470	455	465	475	445	430	440	435
$p_{\text{кр}}, \text{ МПа}$	9,8	10	10,2	9,9	10,1	10,3	9,7	9,4	9,6	9,5

**Задача 1.10.** В открытом резервуаре находится жидкость с плотностью  $\rho$ . Манометр, присоединенный в некоторой точке к стенке резервуара, показывает давление  $p_{\text{изб}}$ . На какой глубине относительно уровня (поверхности) жидкости в резервуаре находится манометр? Атмосферное давление равно  $B$ . Данные приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10.

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho, \text{ кг/м}^3$	1230	1500	910	760	890	950	1070	850	1530	1370
$p_{\text{изб}}, \text{ МПа}$	0,13	0,17	0,14	0,1	0,15	0,19	0,22	0,24	0,12	0,20
$B, \text{ кПа}$	105	100	102	99	96	98	95	107	94	97

## ТЕМА 2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

**Задача 2.1.** Сколько килограммов свинца можно нагреть от температуры  $t_1$  до температуры его плавления  $t = 327\text{ }^\circ\text{C}$  посредством удара молота массой  $m$  при падении его с высоты  $h$ ? Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в тепло, целиком поглощаемое свинцом. Теплоемкость свинца  $c_p = 0,1256\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Данные приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	15	22	18	23	19	14	24	16	25
$m, \text{ кг}$	180	200	190	185	205	195	210	215	170	175
$h, \text{ м}$	1,8	2,1	2,2	2,0	1,9	2,3	1,7	2,4	2,6	2,5

**Задача 2.2.** В канале произвольной формы течет воздух в количестве  $G$ . На входе в канал энтальпия газа, скорость потока и высота входного сечения над произвольной горизонтальной плоскостью соответственно равны  $i_1, \omega_1, h_1$  (рис. 5). На выходе из канала те же параметры равны  $i_2, \omega_2, h_2$ . Протекая в канале, газ получает извне энергию в форме тепла в количестве  $L$ . Какую техническую работу совершает поток газа? Данные приведены в табл. 2.2.

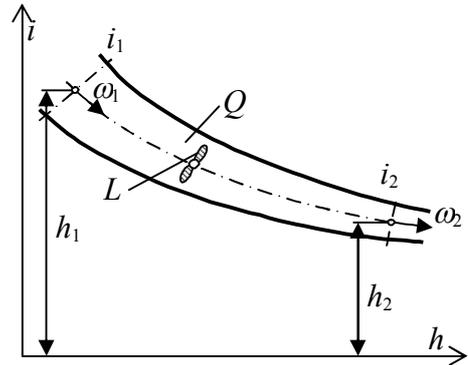


Рис. 5. К задаче 2.2

Таблица 2.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G, \text{ кг/с}$	3	4	2	5	7	8	6	9	11	13
$i_1, \text{ кДж/кг}$	273	288	278	293	284	304	311	265	297	300
$\omega_1, \text{ м/с}$	12	18	23	30	25	32	19	21	14	27
$h_1, \text{ м}$	35	17	25	30	26	45	40	37	29	20
$i_2, \text{ кДж/кг}$	287	293	285	300	295	310	324	278	308	311
$\omega_2, \text{ м/с}$	5	7	9	15	11	14	8	10	6	13
$h_2, \text{ м}$	11	5	7	10	8	15	13	12	9	6
$L, \text{ кДж/с}$	20	35	25	30	15	10	40	50	45	55

**Задача 2.3.** Свинцовый шар падает с высоты  $h$  (м) на твердую поверхность. При этом кинетическая энергия шара переходит в тепло, часть которого им усваивается в количестве  $\eta$  (%) от тепла. На сколько градусов нагревается при падении шар? Теплоемкость свинца  $c_p = 0,1256\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Данные приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h, \text{ мм}$	200	190	180	210	195	185	205	215	175	170
$\eta, \%$	32	26	30	23	36	20	28	34	38	25

**Задача 2.4.** При испытании двигателей для определения мощности необходимо их тормозить (рис. 6). При этом работа, произведенная двигателем, расходуется на преодоление сил трения и превращается в теплоту, часть которой (примерно 20 %) рассеивается в окружающей среде, а остальная часть отводится охлаждающей тормоз водой. Сколько воды необходимо подводить к тормозу за 1 ч, если крутящий момент на валу  $M_{кр}$ , частота вращения  $n$ , а допустимое повышение температуры воды  $\Delta t$ . Теплоемкость воды принять равной  $c_p = 4,19$  кДж/(кг·К). Данные в табл. 2.4.

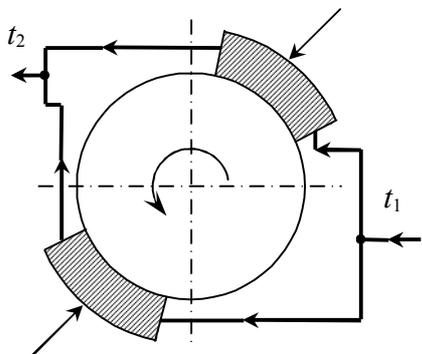


Рис. 6. К задаче 2.4

$n$  – об/мин,  $M_{кр}$  – Дж.

*Примечание.* Мощность двигателя, Вт, рассчитывается по формуле  $N=2\pi nM_{кр}/60$ , где

Таблица 2.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M_{кр}$ , кДж	2	3	2,5	3,5	4	5	4,5	5,5	6	6,5
$n$ , об/мин	1500	1400	1550	1450	1600	1650	1700	1750	1350	1300
$\Delta t$ , К	35	34	30	36	33	37	40	38	33	39

**Задача 2.5.** Определить КПД двигателя автомобиля мощностью  $N$  при расходе топлива  $G$ . Теплоту сгорания топлива принять равной  $Q^p$ . Данные приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N$ , кВт	44	40	42	38	36	34	32	46	48	30
$G$ , кг/ч	7,4	6,5	7,3	6,6	7,2	6,7	7,0	7,5	7,1	6,9
$Q^p$ , МДж/кг	40	23	28	35	30	42	20	25	32	37

**Задача 2.6.** Мощность электростанции на выходных шинах составляет  $N$ . Какое количество топлива  $b$ , кг/ч, сжигается в топках котлов электростанции, если все потери энергии на станции составляют  $(100 - \eta)$ , а теплота сгорания топлива  $Q^p$ . Данные приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N$ , МВт	12	10	14	8	16	20	15	18	13	11
$(100 - \eta)$ , %	70	75	60	64	72	68	74	62	69	65
$Q^p$ , МДж/кг	38	40	23	28	35	30	42	20	25	32

**Задача 2.7.** Паровая турбина расходует пар массой  $m$  на получение 1 кДж электроэнергии. На производство 1 кг пара необходимых параметров затрачивается теплота в количестве  $Q$ . Определить КПД паротурбинной установки. Данные приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m$ , г	1,1	1,3	1,2	1,4	1,6	1,8	1,5	1,7	1,9	2,1
$Q$ , кДж	3300	3500	3450	3250	3200	3350	3400	3550	3150	3100

**Задача 2.8.** Воздушный компрессор сжимает воздух в количестве  $G$ . Установлено, что при сжатии энтальпия воздуха увеличивается на  $\Delta I_1$ , а энтальпия охлаждающей компрессор воды – на  $\Delta I_2$ . Пренебрегая потерями и изменением кинетической и потенциальной энергии, найти мощность привода компрессора. Данные приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G$ , кг/ч	129	140	132	134	136	138	115	117	120	125
$\Delta I_1$ , МДж/ч	190	200	180	170	195	185	175	205	210	215
$\Delta I_2$ , МДж/ч	10	15	20	25	5	13	17	7	18	11

**Задача 2.9.** Мощность турбогенератора равна  $N$ , КПД генератора  $\eta$ . Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать  $t_{пр}$ ? Температура в машинном отделении равна  $t$ ; среднюю теплоемкость воздуха  $c_p$  принять равной 1,0 кДж/(кг·К). Данные приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N$ , МВт	12	10	14	11	13	9	15	8	16	7
$\eta$ , %	97	99	95	98	96	93	91	94	92	90
$t_{пр}$ , °С	55	57	59	56	54	52	58	50	53	51
$t$ , °С	20	22	24	26	18	16	23	25	27	21

**Задача 2.10.** В сосуд, содержащий воду объемом  $V$  при температуре  $t$ , помещен электронагреватель мощностью  $N$ . Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагрелась до температуры кипения  $t_k = 100$  °С. Потерями теплоты сосуда в окружающую среду пренебречь. Данные приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V$ , л	5	7	9	11	4	6	8	10	12	3
$t$ , °С	20	23	21	25	22	18	24	19	17	26

$N$ , Вт	800	850	700	740	830	710	840	720	750	810
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

### ТЕМА 3. СМЕСИ ГАЗОВ

**Задача 3.1.** Смесь из кислорода массой  $m_1$  и азота массой  $m_2$  имеет давление  $p$  и температуру  $t$ . Определить мольные доли каждого газа в смеси, кажущуюся молекулярную массу смеси, удельную газовую постоянную, общий объем смеси, парциальные давления и парциальные объемы. Значения данных приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_1$ , кг	12	11	10	10	12	10	12	15	13	11
$m_2$ , кг	16	13	15	17	17	19	20	20	20	19
$p$ , кПа	250	260	300	310	270	290	240	280	320	330
$t$ , °С	35	33	27	30	29	32	25	17	19	22

**Задача 3.2.** Воздух объемом  $V_1$  смешивается с углекислым газом массой  $m_2$ . Оба газа до смешения имели давление  $p$  и температуру  $t$ . Определить парциальное давление углекислого газа, газовую постоянную смеси, кажущуюся молекулярную массу смеси. Данные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_1$ , м <sup>3</sup>	15	13	10	12	14	16	18	17	11	9
$m_2$ , кг	19	17	15	18	20	22	24	25	21	23
$p$ , кПа	240	280	320	330	250	260	300	310	270	290
$t$ , °С	25	17	19	22	35	33	27	30	29	32

**Задача 3.3.** Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, а также газовую постоянную смеси и кажущуюся молекулярную массу смеси. Известно, что парциальное давление углекислого газа  $p_1$ , а давление смеси  $p_{см}$ . Значения в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , кПа	20	22	24	25	21	23	19	17	15	18
$p_{см}$ , кПа	330	250	260	300	310	270	290	240	280	320

**Задача 3.4.** Найти газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если общее давление смеси  $p_{см}$ , а объемный состав ее следующий: углекислый газ  $r_1$ , угарный газ  $r_2$ , водяной пар  $r_3$ , кислород  $r_4$ , азот  $r_5$ . Значения данных в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{см}, \text{кПа}$	250	260	300	310	330	290	270	320	240	280
$r_1, \%$	10	5	12	11	18	16	8	10	12	14
$r_2, \%$	15	12	53	15	9	50	13	17	3	8
$r_3, \%$	50	53	25	8	3	25	2	3	7	21
$r_4, \%$	20	20	5	45	55	4	31	61	48	5
$r_5, \%$	5	10	5	21	15	5	46	8	30	52

**Задача 3.5.** Определить газовую постоянную, плотность при нормальных условиях и объемный состав газовой смеси, если ее массовый состав следующий: водород  $g_1$ , метан  $g_2$ , этилен  $g_3$ , угарный газ  $g_4$ , углекислый газ  $g_5$ , кислород  $g_6$ , азот  $g_7$ . Найти парциальное давление азота, если известно давление газовой смеси  $p_{см}$ . Значения данных приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{см}, \text{кПа}$	310	300	260	250	290	270	280	240	320	330
$g_1, \%$	14	10	0	12	11	0	14	8	10	12
$g_2, \%$	0	14	12	53	0	9	50	13	0	3
$g_3, \%$	8	0	5	25	8	0	20	2	9	7
$g_4, \%$	5	50	20	5	45	55	0	31	58	0
$g_5, \%$	52	21	10	2	21	15	5	46	6	30
$g_6, \%$	0	4	2	3	0	3	4	0	3	48
$g_7, \%$	21	1	51	0	15	18	7	0	14	0

**Задача 3.6.** Смесь газов, которая образовалась при сжигании 1 кг мазута в топке парового котла, имеет следующий состав заданный парциальными объемами составляющих: углекислый газ  $V_1$ , кислород  $V_2$ , азот  $V_3$ . Определить кажущуюся молекулярную массу смеси, массовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление равно  $p$ . Значения данных приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_1, \text{м}^3$	1,8	2,2	2,3	1,6	1,5	1,3	2,1	1,4	1,7	1,9
$V_2, \text{м}^3$	0,7	1,5	0,8	1,2	1,1	0,6	1,3	0,8	1,2	1,1
$V_3, \text{м}^3$	12,8	15,1	12,3	13,4	12,5	11,9	13,8	11,8	14,3	13,2
$p, \text{кПа}$	95	100	110	104	98	90	120	112	92	101

**Задача 3.7.** Объемный состав горючего газа: угарный газ  $r_1$ , водород  $r_2$ , метан  $r_3$ , этилен  $r_4$ , углекислый газ  $r_5$ , азот  $r_6$ . Определить кажущуюся молекулярную массу, плотность, газовую постоянную смеси, массовые доли компонентов и парциальное давление метана, если давление смеси  $p_{см}$ . Данные в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_1, \%$	10	11	14	10	51	12	11	5	14	8
$r_2, \%$	14	3	1	14	12	53	15	9	50	13
$r_3, \%$	9	7	8	1	5	25	8	18	20	4
$r_4, \%$	58	1	5	50	20	5	45	50	7	27
$r_5, \%$	6	30	52	21	10	2	19	15	5	46
$r_6, \%$	3	48	20	4	2	3	2	3	4	2
$p_{см}, \text{кПа}$	98	90	120	112	92	101	95	100	110	104

**Задача 3.8.** Смесь состоит трех газов: углекислого газа с массовой долей  $g_1$ , кислорода –  $g_2$  и азота. Найти парциальное давление углекислого газа, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу смеси, а также ее плотность при давлении  $p$  и температуре  $t$ . Данные в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g_1, \text{кг/кг}$	5	45	50	16	27	58	1	5	50	20
$g_2, \text{кг/кг}$	15	19	15	5	46	6	30	52	21	10
$p, \text{кПа}$	110	104	98	90	120	112	92	101	95	100
$t, \text{°C}$	32	25	17	19	22	35	33	27	30	29

**Задача 3.9.** Газовая смесь имеет следующий массовый состав: кислород  $g_1$ , углекислый газ  $g_2$  и азот  $g_3$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы плотность ее составила  $\rho$ . Кроме того определите парциальное давление азота. Значения данных приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g_1, \%$	18	12	18	3	12	15	13	25	27	20
$g_2, \%$	12	8	7	12	18	11	5	7	17	2
$g_3, \%$	70	80	75	85	70	74	82	68	56	78
$\rho, \text{кг/м}^3$	1	1,6	1	1,6	1	1,6	1	1,6	1	1,6

**Задача 3.10.** Дымовые газы имеют следующий объемный состав: углекислый газ ( $\text{CO}_2$ )  $r_1$ , азот ( $\text{N}_2$ )  $r_2$ , кислород ( $\text{O}_2$ ). Определить их массовые доли, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу смеси. Значения данных приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_1, \%$	12	15	13	25	27	20	18	12	18	3
$r_2, \%$	18	11	5	7	17	2	12	8	7	12
$r_3, \%$	70	74	82	68	56	78	70	80	75	85

## ТЕМА 4. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

**Задача 4.1.** 1 кг воздуха при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  расширяется до давления  $p_2$ . Найти конечную температуру, количество теплоты и совершенную работу, если расширение происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателем политропы  $n$ . Представить процессы в  $p\nu$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,4	0,5	0,6	0,4	0,55	0,45	0,65	0,35	0,5	0,6
$t_1$ , °С	100	120	105	115	110	125	95	120	115	110
$p_2$ , МПа	0,1	0,2	0,15	0,1	0,15	0,15	0,2	0,09	0,09	0,1
$n$	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1

**Задача 4.2.** Определить, является ли политропным процесс сжатия газа, для которого параметры трех точек имеют следующие значения: давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ ,  $p_2$  и  $t_2$ ,  $p_3$  и  $t_3$ . Если политропный, то рассчитать показатель политропы. Представить процесс в  $p\nu$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,1	0,12	0,14	0,11	0,2	0,15	0,29	0,22	0,19	0,26
$t_1$ , °С	20	30	35	22	45	25	16	51	25	14
$p_2$ , МПа	0,25	0,36	0,38	0,26	0,36	0,31	0,46	0,38	0,35	0,43
$t_2$ , °С	82	91	96	90	107	88	77	112	90	75
$p_3$ , МПа	0,32	0,54	0,55	0,33	0,42	0,37	0,52	0,44	0,4	0,49
$t_3$ , °С	100	116	121	111	125	105	95	130	106	93

**Задача 4.3.** Газ при температуре  $t_1$  изотермически сжимается так, что объем его изменяется в  $n$  раз от начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления. Найти температуру газа в конце адиабатного расширения, работу, произведенную газом в результате обоих процессов. Представить процессы расширения и сжатия в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	воздух	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Cl <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>
$t_1$ , °С	127	130	125	135	137	140	142	120	115	122
$n$	1/4	1/3	1/5	1/4	1/3	1/5	1/4	1/3	1/5	1/4

**Задача 4.4.** Воздух объемом  $V_1$  при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  сжимают до давления  $p_2$  и объема  $V_2$ . Определить конечную температуру, показатель политропы, работу сжатия, количество отведенной теплоты и изменение внутренней энергии. Представить процесс сжатия в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_1, \text{ м}^3$	2	3	1,5	2,5	3,5	4	10	5	7	7,5
$p_1, \text{ МПа}$	0,20	0,23	0,25	0,3	0,35	0,38	0,42	0,38	0,35	0,40
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	40	35	20	25	15	10	5	30	45	50
$p_2, \text{ МПа}$	1,1	1,2	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,1	1,9
$V_2, \text{ м}^3$	0,5	1	0,2	1,2	2	2,3	5,3	1,7	2,7	3

**Задача 4.5.** При температуре  $t_1$  и давлении  $p_1$  газ объемом  $V_1$  адиабатно расширяется до конечного объема, который в  $n$  раз больше начального. Определить конечные параметры, работу расширения и изменение внутренней энергии. Представить процесс расширения в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	25	15	10	5	30	45	50	40	35
$p_1, \text{ МПа}$	0,7	1,1	1,2	1,0	1,3	1,5	0,8	0,6	0,9	1,4
Газ	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	воздух	NH <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
$V_1, \text{ м}^3$	0,8	1,3	2,4	2,2	1,7	2,6	0,5	0,7	1,5	2
$n$	3	2	3	2	4	3	4	2	3	2

**Задача 4.6.** Газ массой  $m$  сжимают политропно от давления  $p_1$  и температуры  $t_1$  до давления  $p_2$ , температура при этом повышается до  $t_2$ . Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенной теплоты. Представить процесс сжатия в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	NH <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	воздух	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>
$m, \text{ кг}$	1,2	2,3	1,5	2,5	1,7	1,9	1,6	2,2	2,6	2,8
$p_1, \text{ МПа}$	0,10	0,14	0,09	0,07	0,11	0,13	0,08	0,12	0,06	0,15
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	17	20	18	15	13	19	14	21	16	22
$p_2, \text{ МПа}$	0,8	1,3	1,2	0,6	0,8	1,5	0,9	1,4	1,3	1,4

$t_2, ^\circ\text{C}$	130	120	125	135	115	110	140	145	150	155
-----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Задача 4.7.** В процессе политропного сжатия газа затрачивается работа  $L$ , причем в одном случае от газа отводится теплота  $Q_1$ , а в другом – газу сообщается теплота  $Q_2$ . Определить показатели обеих политроп. Также вычислить массу газа, если его температура при сжатии изменяется на  $\Delta t$ . Представить процессы сжатия в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	O <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	воздух
$L$ , кДж	180	190	195	185	200	205	210	220	215	175
$Q_1$ , кДж	260	265	250	255	270	275	280	285	290	245
$Q_2$ , кДж	40	34	42	36	44	46	48	38	50	32
$\Delta t$ , °C	10	15	12	14	16	18	20	22	17	13

**Задача 4.8.** В баллоне объемом  $V$  находится газ при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$ . Давление окружающей среды  $p_2$ . Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне газом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и по адиабате. Найти также минимальную температуру, которую будет иметь газ в баллоне, если открыть вентиль и выпускать газ из баллона до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды и при условии, что теплообмен воздуха с окружающей средой будет отсутствовать. Представить процесс расширения в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	воздух	O <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
$V$ , л	90	95	100	105	110	115	120	125	80	85
$p_1$ , МПа	7	8	9	5	6	4	10	11	13	12
$t_1$ , °C	15	10	0	20	25	5	30	35	45	40
$p_2$ , МПа	0,09	0,11	0,10	0,11	0,09	0,10	0,11	0,09	0,10	0,11

**Задача 4.9.** В емкости объемом  $V$  находится газ при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$ . От газа отнимается теплота таким образом, что в конце процесса устанавливается температура  $t_2$ . Определить для двух процессов при постоянном давлении и постоянном объеме количество отнятой теплоты, конечный объем, конечное давление, изменение внутренней энергии, изменение энтальпии и работу процессов. Представить процессы в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V$ , л	200	500	300	400	250	350	550	450	100	150
Газ	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	воздух	O <sub>2</sub>
$p_1$ , МПа	1,0	1,2	0,8	0,6	1,4	1,6	1,8	1,5	1,7	1,9
$t_1$ , °C	500	470	550	450	570	400	430	530	480	520
$t_2$ , °C	5	10	15	0	20	7	2	4	8	6

**Задача 4.10.** 1 кг газа с начальным давлением  $p_1$  и температурой  $t_1$  сообщается теплота  $Q$ . Определить конечные температуру, давление, удельный объем, а также изменение внутренней энергии, изменение энтальпии, работу для двух процессов при постоянном давлении и постоянном объеме. Представить процессы в диаграммах  $pV$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	воздух	O <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
$p_1$ , МПа	0,24	0,32	0,38	0,26	0,20	0,28	0,22	0,30	0,36	0,34
$t_1$ , °C	15	10	5	12	17	19	4	12	16	20
$Q$ , кДж	837	853	917	877	915	888	905	842	864	893

## ТЕМА 5. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

**Задача 5.1.** 1 кг одного газа и 1 кг другого газа сжимаются изотермически при температуре  $t$  от давления  $p_1$  до давления  $p_2$ . Для какого газа изменение энтропии будет больше и во сколько раз (по отношению к изменению энтропии другого газа). Представить процессы в диаграммах  $pV$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>
Газ	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO
$t$ , °C	15	21	13	17	11	22	14	16	18	20
$p_1$ , МПа	0,1	0,2	0,15	0,13	0,17	0,19	0,14	0,16	0,18	0,12
$p_2$ , МПа	1,2	2,3	2	1,8	1,6	1,7	1,9	1,5	2,2	1,4

**Задача 5.2.** Определить энтропию 1 кг газа при температуре  $t$  и давлении  $p$ . Теплоемкость считать постоянной. Данные в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	CO	Cl <sub>2</sub>	воздух

$t, ^\circ\text{C}$	250	200	350	320	270	370	220	320	390	290
$p, \text{МПа}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,9	1,2	1,5	1,7	0,4	1,1

**Задача 5.3.** 1 кг газа при температуре  $t_1$  расширяется в  $n$  раз, температура его при этом падает до  $t_2$ . Определить изменение энтропии. Представить процесс в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Теплоемкость считать постоянной. Значения данных приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	CH <sub>4</sub>	воздух	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
$t_1, ^\circ\text{C}$	127	130	140	132	148	150	137	142	117	125
$n = \nu_2/\nu_1$	5	4	3	5,5	4,5	3,5	6	4,8	3,8	5,3
$t_2, ^\circ\text{C}$	27	40	50	23	25	30	32	27	20	20

**Задача 5.4.** 1 кг газа сжимается от начальных давления  $p_1$  и температуры  $t_1$  до конечных давления  $p_2$  и температуры  $t_2$ . Вычислить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной. Представить процесс в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Значения данных приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	CO	NH <sub>3</sub>	воздух	Cl <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
$p_1, \text{МПа}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,14	0,18	0,22	0,26	0,16	0,24
$t_1, ^\circ\text{C}$	15	17	19	21	16	18	22	20	13	25
$p_2, \text{МПа}$	0,5	0,65	0,55	0,6	0,64	0,7	0,73	0,58	0,62	0,72
$t_2, ^\circ\text{C}$	100	115	110	117	105	109	120	107	112	103

**Задача 5.5.** 1 кг газа сжимают по изотерме так, что объем его уменьшается в  $n$  раз, а затем при постоянном объеме давление повышают в  $m$  раз. Найти общее изменение энтропии газа, теплоемкость считать постоянной. Представить процессы в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ . Данные в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	CH <sub>4</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	воздух	Cl <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
$n = \nu_1/\nu_2$	6	5	6,5	4	4,5	7	7,5	3	3,5	5,5
$m = p_3/p_2$	2,5	2	2,5	1,5	2	2,5	3	1,5	2	1,5

**Задача 5.6.** Воздух объемом  $V$ , находящийся в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры  $t_2$ . Сжатие производится 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы  $n$ . Считая значение энтропии при нормальных

условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, найти изменение энтропии воздуха в каждом процессе. Представить процессы в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3$	10	15	20	12	14	16	18	13	17	11
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	400	500	450	420	430	460	480	410	440	490
$n$	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6

**Задача 5.7.** 1 кг воздуха сжимается по политропе от начальных давления  $p_1$  и температуры  $t_1$  до конечного давления  $p_2$  с показателем политропы  $n$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и затраченную работу. Представить процесс в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1, \text{ МПа}$	0,1	0,15	0,12	0,14	0,11	0,13	0,16	0,18	0,2	0,17
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	22	24	26	28	30	15	25	27	23
$p_2, \text{ МПа}$	0,8	1	1,1	0,9	1,2	1,3	1,5	1,7	1,4	1,6
$n$	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7

**Задача 5.8.** 1 кг газа, находящегося в начальном состоянии, сообщается теплота один раз при постоянном давлении и другой – при постоянном объеме так, что в обоих случаях конечные температуры одинаковы. Сравнить изменение энтропии в обоих процессах, если известны начальная и конечная температуры  $t_1$  и  $t_2$ . Теплоемкость считать постоянной. Представить процесс в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	$\text{Cl}_2$	воздух	$\text{CO}$	$\text{NH}_3$	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{SO}_2$
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	25	15	20	22	24	26	28	30	23	27
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	460	480	410	440	490	400	500	450	420	430

**Задача 5.9.** В сосуде объемом  $V$  заключен воздух при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$ . Параметры окружающей среды: давление  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ , температура  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить максимальную полезную работу (эксергию), которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде. Представить процесс в  $pV$  и  $Ts$  диаграммах. Значения данных приведены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Величины	№ варианта									
----------	------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V$ , л	370	220	320	390	290	250	200	350	320	270
$p_1$ , МПа	7	6	5	6,5	4	4,5	3,5	5,5	7,5	3
$t_1$ , °С	50	63	70	75	77	90	50	55	57	40

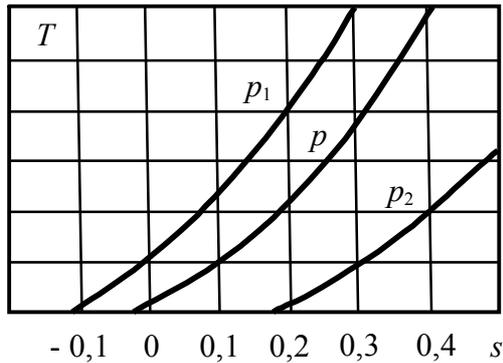


Рис. 7. К задаче 5.10

**Задача 5.10.** В диаграмме  $Ts$  (рис. 7) для идеального газа (неизвестного) нанесены три изобары. Две крайние изобары относятся к давлениям  $p_1$  и  $p_2$ . Определить какое давление соответствует средней изобаре. Значения данных приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	10	9	11	12	13	10	11	9	12	13
$p_2$ , МПа	0,1	0,3	0,22	0,3	0,13	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

## ТЕМА 6. СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

**Задача 6.1.** При степени сухости  $x_1$  водяной пар в количестве 1 кг имеет давление  $p_1$ . В результате расширения пар совершает работу равную  $L$ . Определить конечное состояние пара (влажный, сухой или перегретый) и подведенное количества тепла, если расширение происходит изобарно. Представить процесс в  $p_v$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения параметров заданы в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$ , кг/кг	0,1	0,15	0,2	0,25	0,1	0,2	0,3	0,25	0,3	0,35
$p_1$ , МПа	0,15	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,45	0,5
$L$ , кДж	120	100	110	130	95	100	110	120	95	100

**Задача 6.2.** В водяной экономайзер парового котла питательная вода поступает при температуре  $t_1$  и давлении  $p_1$ . Котел производит перегретый пар того же давления, имеющий температуру  $t_2$ . Определить начальные и конечные параметры состояния рабочего тела (удельный объем, энтальпия, энтропия), количество подведенной теплоты, а также рассчитать среднюю температуру рабочего тела при подводе тепла. Представить процесс в  $p_v$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения параметров заданы в табл. 6.2.

*Примечание.* Под средней температурой подвода тепла понимается температура того изотермического процесса, в котором подводится то же количества тепла, что и в действительном рассматриваемом процессе, при условии, что изотермический процесс совершается между теми же граничными значениями энтропии.

Таблица 6.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	15	20	25	15	20	25	15	20	25	10
$p_1, \text{МПа}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,1	0,15	0,2	0,25	0,1	0,15
$t_2, ^\circ\text{C}$	130	140	150	170	135	145	155	165	140	150

**Задача 6.3.** В сосуде находится влажный пар, имеющий массу  $m_1$ , температуру  $t_1$  и степень сухости  $x_1$ . В этом сосуде при постоянном давлении отсепарирована и удалена из влажного пара вода массой  $m_b$ . Определить параметры оставшегося в сосуде пара: давление, удельный объем, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию. Представить процесс в  $p_v$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Исходные данные приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_1, \text{кг}$	100	120	110	105	115	95	90	100	110	115
$t_1, ^\circ\text{C}$	220	230	225	235	210	215	205	200	195	190
$x_1, \text{кг/кг}$	0,64	0,52	0,72	0,54	0,74	0,68	0,66	0,56	0,58	0,62
$m_b, \text{кг}$	20	25	30	17	22	29	19	23	26	21

**Задача 6.4.** К 1 кг пара при начальном давлении  $p_1$  и степени сухости  $x_1$  изотермически подводится тепло в количестве  $Q$ . Определить начальные и конечные параметры состояния вещества: степень сухости, удельный объем, энтальпию, энтропию в конечном состоянии, а также работу, произведенную при расширении и изменение внутренней энергии. Представить процесс в  $p_v$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения данных в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1, \text{МПа}$	2	1,8	1,5	0,9	0,45	0,3	0,6	0,5	0,8	1,3
$x_1, \text{кг/кг}$	0,25	0,35	0,3	0,6	0,52	0,56	0,4	0,66	0,64	0,5
$Q, \text{кДж}$	1150	1500	1400	1300	1200	1100	1450	1350	1250	1000

**Задача 6.5.** К 1 кг пара при начальном давлении  $p_1$  и степени сухости  $x_1$  подводится при постоянном давлении теплота в количестве  $Q$ . Определить степень сухости, удельный объем, энтальпию, энтропию в

конечном состоянии, а также работу расширения и изменение внутренней энергии. Представить процесс в  $p\nu$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Данные в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,3	0,6	0,5	0,8	1,3	2	1,8	1,5	0,9	0,45
$x_1$ , кг/кг	0,56	0,25	0,35	0,3	0,6	0,52	0,4	0,66	0,64	0,5
$Q$ , кДж	1200	1100	1450	1350	1250	1000	1150	1500	1400	1300

**Задача 6.6.** Пользуясь таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара, определить энтальпию, удельный объем, энтропию и внутреннюю энергию а) сухого насыщенного пара при давлении  $p$ ; б) влажного насыщенного пара при давлении  $p$  и степени сухости  $x$ ; в) перегретого при давлении  $p$  и температуре  $t$ , значения которых в табл. 6.6. Пояснить процесс нахождения параметров в  $p\nu$ ,  $Ts$  или  $is$  диаграммах.

Таблица 6.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p$ , МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4	0,3	1	1,1	1,2
$x$ , кг/кг	0,8	0,75	0,7	0,85	0,65	0,6	0,9	0,5	0,55	0,95
$t$ , °C	250	300	350	350	300	200	250	400	450	400

**Задача 6.7.** 1 кг пара при начальном давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  нагревается при постоянном давлении до конечной температуры  $t_2$ . Определить затраченное количество теплоты, работу расширения, и изменение внутренней энергии, а также начальную и конечную энтальпии, удельные объемы, энтропии. Представить процесс в  $p\nu$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения исходных данных приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,2	1,2	0,5	0,8	1,5	2,5	2	1	3	4
$t_1$ , °C	100	160	120	150	140	180	170	140	200	190
$t_2$ , °C	150	230	200	220	300	350	310	250	420	350

**Задача 6.8.** 1 кг пара при начальном давлении  $p_1$  и степени сухости  $x_1$  нагревается при постоянном давлении до конечной температуры  $t_2$ . Определить начальную и конечную энтальпии, удельные объемы, энтропии, а также работу расширения, количество сообщенной теплоты и изменение внутренней энергии. Представить процесс в  $p\nu$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения параметров даны в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	2,5	2	1	3	4	0,2	1,2	0,5	0,8	1,5

$x_1$ , кг/кг	0,68	0,66	0,56	0,58	0,62	0,64	0,52	0,72	0,54	0,74
$t_2$ , °C	350	310	250	420	350	150	230	200	220	300

**Задача 6.9.** 1 кг пара при начальном давлении  $p_1$  и степени сухости  $x_1$  изотермически расширяется до конечного давления  $p_2$ . Определить начальную и конечную энтальпии, удельные объемы, энтропии, а также количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу расширения. Представить процесс в  $p\nu$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения параметров даны в табл. 6.9.

Таблица 6.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	0,8	1,5	2,5	2	1	3	4	0,2	1,2	0,5
$x_1$ , кг/кг	0,56	0,58	0,62	0,72	0,54	0,74	0,66	0,64	0,52	0,68
$p_2$ , кПа	0,2	0,8	1,3	1	0,3	1,6	2,2	0,1	0,5	0,2

**Задача 6.10.** 1 кг пара расширяется адиабатно от начального давления  $p_1$  и температуры  $t_1$  до конечного давления  $p_2$ . Найти начальную и конечную энтальпии, удельные объемы, энтропии, внутренние энергии, а также степень сухости в конечном состоянии и работу расширения. Представить процесс в  $p\nu$ ,  $Ts$  и  $is$  диаграммах. Значения исходных величин даны в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , МПа	3	8	10	12	14	10	9	13	15	16
$t_1$ , °C	350	500	450	600	450	350	500	450	350	400
$p_2$ , кПа	4	3	6	5	60	20	10	70	80	90

## ТЕМА 7. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

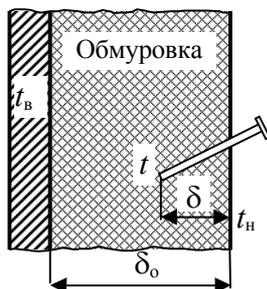


Рис. 8. К задаче 7.1

**Задача 7.1.** Найти температуру  $t_b$  внутренней поверхности обмуровки аппарата (рис. 8), если температура на наружной поверхности ее  $t_n$ . Толщина обмуровки  $\delta_o$ . Термометр, заделанный на глубину  $\delta$  от наружной поверхности, показывает  $t$ . Значения данных приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_n$ , °C	35	30	25	33	40	37	32	27	29	22
$\delta_o$ , мм	260	270	300	280	290	250	265	275	305	310
$\delta$ , мм	50	40	55	60	45	35	30	65	70	75
$t$ , °C	75	65	80	85	73	60	70	82	79	77

**Задача 7.2.** Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной  $\delta$  равна  $q$ . Определить разность температур на поверхностях стенки и численные значения градиента температуры в стенке, если она выполнена: а) из латуни (коэффициент теплопроводности  $\lambda = 70$  Вт/(м·К)); б) из красного кирпича ( $\lambda = 0,7$  Вт/(м·К)); в) из пробки ( $\lambda = 0,07$  Вт/(м·К)). Провести сравнение. Значения данных приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta$ , мм	50	55	60	65	70	60	75	70	65	75
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	70	80	75	85	90	95	105	100	110	115

**Задача 7.3.** Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при ее толщине  $\delta$  и разности температур на поверхностях  $\Delta t$  плотность теплового потока равна  $q$ . Значения данных приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta$ , мм	40	35	40	45	50	60	55	70	65	60
$\Delta t$ , °С	127	120	122	125	130	132	135	137	129	139
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	145	130	135	150	140	155	165	160	170	175

**Задача 7.4.** Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпичей, между которыми расположена засыпка из диатомита (рис. 9). Толщина шамотного слоя  $\delta_1$ , диатомитовой засыпки  $\delta_2$  и красного кирпича  $\delta_3$ . Коэффициенты теплопроводности соответственно равны:  $\lambda_1 = 0,93$  Вт/(м·К);  $\lambda_2 = 0,13$  Вт/(м·К);  $\lambda_3 = 0,7$  Вт/(м·К).

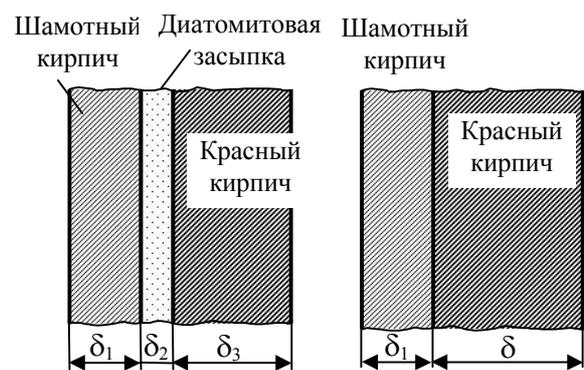


Рис. 9. К задаче 7.4

Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича  $\delta$ , если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку оставался неизменным? Значения данных приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

$\delta_1$ , мм	120	125	130	160	140	135	145	130	140	155
$\delta_2$ , мм	50	45	40	50	55	40	45	50	55	40
$\delta_3$ , мм	250	260	255	240	245	250	270	275	260	265

**Задача 7.5.** Определить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  кирпичной стены помещения толщиной  $\delta$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м·К)}$ . Температура воздуха внутри помещения  $t_{в1}$ ; коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки  $\alpha_1$ ; температура наружного воздуха  $t_{в2}$ ; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2$ . Вычислить также температуры на поверхностях стены  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ . Значения данных приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta$ , мм	510	500	530	525	535	520	515	505	540	545
$t_{в1}$ , °С	18	20	15	22	25	23	17	27	13	10
$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	7,5	7	5,8	7,2	6,4	6	7,7	6,6	6,8	7,4
$t_{в2}$ , °С	-30	-27	-32	-24	-34	-31	-26	-25	-37	-38
$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	20	23	25	20	22	28	18	24	22	23

**Задача 7.6.** Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной  $\delta_1$  и слоя строительного войлока. Температуры на внешней поверхности кирпичного слоя  $t_{c1}$  и на внешней поверхности войлочного слоя  $t_{c3}$ . Коэффициенты теплопроводности красного кирпича  $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/(м·К)}$  и строительного войлока  $\lambda_2 = 0,0465 \text{ Вт/(м·К)}$ . Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и толщину войлочного слоя при условии, чтобы тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  стенки камеры не превышали  $q$ . Значения данных приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_1$ , мм	250	255	260	240	265	230	235	245	225	265
$t_{c1}$ , °С	110	105	100	115	120	125	130	135	140	145
$t_{c3}$ , °С	25	20	25	30	35	20	25	30	35	30
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	100	110	105	120	110	115	100	120	115	105

**Задача 7.7.** Слой льда на поверхности воды имеет толщину  $\delta_1$ , температуры на нижней и верхней поверхностях соответственно  $t_1$  и  $t_2$ . Определить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  поверхности льда, если его коэффициент теплопроводности  $\lambda_{л} = 2,25 \text{ Вт/(м·К)}$ . Как изменится тепловой поток, если лед покроется слоем снега толщиной  $\delta_2$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{с} = 0,465 \text{ Вт/(м·К)}$  и температура на поверхности снега будет  $t_{2с}$ ? Значения данных приведены в табл. 7.7.

Таблица 7.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_1$ , мм	250	205	215	240	245	210	220	225	230	235
$t_1$ , °С	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0
$t_2$ , °С	-15	-17	-18	-16	-10	-13	-11	-12	-14	-19
$\delta_2$ , мм	150	125	130	135	140	155	145	160	120	115
$t_{2c}$ , °С	-20	-22	-23	-21	-15	-18	-16	-17	-19	-24

**Задача 7.8.** Определить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  поверхности кирпичной стенки и глубину ее промерзания до температуры  $t \leq 0 \text{ °С}$ . Толщина стенки  $\delta_1$ , температура на ее внутренней поверхности  $t_1$ , а наружной  $t_2$ . Коэффициент теплопроводности кирпича  $\lambda = 0,55 \text{ Вт/(м·К)}$ . Значения данных приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_1$ , мм	235	250	205	215	240	245	210	220	225	230
$t_1$ , °С	20	22	23	21	25	18	26	27	19	24
$t_2$ , °С	-27	-25	-24	-34	-31	-26	-32	-38	-37	-30

**Задача 7.9.** Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича с толщиной  $\delta_1$  и строительного кирпича с толщиной  $\delta_2$ . Температура внутри печи  $t_1$ , температура окружающего пространства  $t_2$ . Определить 1) потери теплоты с  $1 \text{ м}^2$  поверхности стенки и 2) температуру на грани между огнеупорным и строительным кирпичом (предел применимости строительного кирпича  $800 \text{ °С}$ ). Коэффициент теплоотдачи от печных газов к поверхности стенки  $\alpha_1$ ; коэффициент теплоотдачи от поверхности стены к воздуху  $\alpha_2$ . Коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича  $\lambda_1 = 1,16 \text{ Вт/(м·К)}$ , строительного кирпича  $\lambda_2 = 0,58 \text{ Вт/(м·К)}$ . Значения данных приведены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_1$ , мм	500	510	480	490	520	515	485	495	505	525
$\delta_2$ , мм	250	245	240	255	260	270	230	235	275	280
$t_1$ , °С	1300	1350	1100	1250	1450	1400	1150	1200	1300	1500
$t_2$ , °С	20	22	23	21	25	18	26	27	19	24
$\alpha_1$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )	37,2	32,8	30,6	34,8	35,4	32,6	35,8	37,7	35,5	31,5
$\alpha_2$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )	15,5	17,2	13,5	16,2	14,3	14,8	15,2	17,4	16,8	15,8

**Задача 7.10.** Определить температуры внутренней и наружной поверхностей стенки аппарата, а также температуру на наружной поверхности изоляции, которой покрыт аппарат. Температура среды внутри аппарата  $t_1$ , температура наружного воздуха  $t_2$ . Аппарат сделан из стали с толщиной стенки  $\delta_c$ , толщина слоя изоляции  $\delta_{из}$ . Коэффициент

теплопроводности стали  $\lambda_c = 46,5$  Вт/(м·К), изоляции  $\lambda_{из} = 0,12$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от среды к стенке аппарата  $\alpha_1$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху  $\alpha_2$ . Значения данных приведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	95	105	100	110	115	70	80	75	85	90
$t_2, ^\circ\text{C}$	15	10	17	20	22	19	25	16	12	14
$\delta_c, \text{мм}$	7	5	3	4	6	5	7	3	6	5
$\delta_{из}, \text{мм}$	45	50	60	55	45	40	50	65	60	40
$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	240	232	238	236	245	248	223	220	246	235
$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	13,5	10,4	14,3	13,8	11,2	9,8	11,8	12,5	10,8	12,3

### ТЕМА 8. СУШКА. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

**Задача 8.1.** Найти влагосодержание, энтальпию, парциальное давление водяного пара, температуру мокрого термометра и точку росы для воздуха, покидающего сушилку при  $t$  и  $\varphi$ , значения которых даны в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	50	45	30	35	50	55	30	35	45	60
$\varphi, \%$	90	80	85	60	65	50	55	70	75	45

**Задача 8.2.** Температура воздуха по сухому термометру  $t_c$ , по мокрому  $t_m$ . Найти все характеристики воздуха: энтальпию, влагосодержание, относительную влажность, парциальное давление водяного пара, температуру точки росы. Численные значения приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_c, ^\circ\text{C}$	25	35	30	30	40	40	35	45	50	60
$t_m, ^\circ\text{C}$	15	20	20	15	25	30	25	30	35	35

**Задача 8.3.** Найти влагосодержание, относительную влажность, энтальпию паровоздушной смеси при  $t$ , если известно, что парциальное давление водяного пара в смеси  $p$ . Определить температуру мокрого термометра и точку росы. Значения исходных данных приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	90	40	70	50	45	80	75	60	55	65
$p, \text{мм рт.ст.}$	20	10	25	15	30	35	40	45	50	55

**Задача 8.4.** Начальное состояние влажного воздуха при атмосферном давлении задано параметрами  $t$  и  $\varphi$ . Воздух охлаждается (адиабатически) до температуры  $t_1$ . Определить сколько влаги выпадет из воздуха массой  $m$ . Исходные данные приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	55	30	35	45	60	50	45	30	35	50
$\varphi, \%$	50	55	70	75	45	90	80	85	60	65
$t_1, ^\circ\text{C}$	90	80	60	85	95	85	70	75	70	80
$m, \text{кг}$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1

**Задача 8.5.** В калорифере сушильной установки производится нагрев воздуха при атмосферном давлении от начальной температуры  $t_0$  и относительной влажности  $\varphi_0$  до температуры  $t_1$ . Определите необходимое количество тепла для нагревания воздуха массой  $m$ . Значения в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_0, ^\circ\text{C}$	45	60	55	30	35	35	50	50	45	30
$\varphi_0, \%$	75	45	50	55	70	60	65	90	80	85
$t_1, ^\circ\text{C}$	85	95	90	80	60	70	80	85	70	75
$m, \text{кг}$	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

**Задача 8.6.** Наружный воздух, имеющий температуру  $t_0$  и влагосодержание  $d_0$ , подогревается до температуры  $t_1$ . Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Значения параметров приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_0, ^\circ\text{C}$	20	15	40	35	30	45	50	35	40	30
$d_0, \text{г/кг}$	10	8	12	16	14	20	22	24	26	18
$t_1, ^\circ\text{C}$	70	75	85	70	80	85	95	90	80	85

**Задача 8.7.** Воздух с температурой  $t_0$  и относительной влажностью  $\varphi_0$  нагревается в калорифере до  $t$ . Найти энтальпию и влагосодержание воздуха на выходе из калорифера. Значения данных приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_0, ^\circ\text{C}$	35	50	50	45	30	45	60	55	30	35
$\varphi_0, \%$	60	65	90	80	85	75	45	50	55	70
$t, ^\circ\text{C}$	65	70	80	85	75	70	85	95	90	80

**Задача 8.8.** Определить относительную влажность, энтальпию паровоздушной смеси (воздуха), парциальное давление водяного пара в смеси, температуру мокрого термометра и точку росы, если известны температура воздуха  $t$  и влагосодержание  $d$ . Значения даны в табл. 8.8.

Таблица 8.8

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	50	45	60	55	35	30	35	55	50	45
$d, \text{г/кг}$	20	22	24	26	18	10	8	12	16	14

**Задача 8.9.** Определить по показаниям психрометра влагосодержание, относительную влажность, энтальпию воздуха, парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе, если температура сухого термометра  $t$ , температура мокрого термометра  $t_m$ . Найти температуру точки росы. Значения данных приведены в табл. 8.9.

Таблица 8.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	50	60	25	35	30	30	40	40	35	45
$t_m, ^\circ\text{C}$	35	35	15	20	20	15	25	30	25	30

**Задача 8.10.** Состояние влажного воздуха при температуре  $t$  определяется с помощью гигрометра, которым измерена точка росы, равная  $t_p$ . Найти влагосодержание, относительную влажность, энтальпию воздуха, парциальное давление водяного пара в воздухе и температуру мокрого термометра. Исходные данные приведены в табл. 8.10.

Таблица 8.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	35	30	30	40	40	35	45	50	60	25
$t_p, ^\circ\text{C}$	20	20	15	25	30	25	30	35	35	15

## ТЕМА 9. СУШКА. ПРОЦЕССЫ

**Задача 9.1.** Определить расход воздуха, расход и необходимое давление греющего пара влажностью 6 % для непрерывнодействующей противоточной сушилки, работающей по нормальному сушильному варианту. Известны производительность сушилки по влажному материалу  $G_n$ , начальная  $u_n$  и конечная  $u_k$  влажность материала (на общую массу

влажного материала), температура материала, поступающего на сушку  $\vartheta_1$  и выходящего из сушилки  $\vartheta_2$ , температура и относительная влажность воздуха, поступающего в калорифер  $t_0$ ,  $\varphi_0$  и после сушилки  $t_2$ ,  $\varphi_2$ , удельная теплоемкость высушенного материала  $c_k = 2,35$  кДж/(кг·К), масса транспортирующего устройства (транспортера)  $G_{тр} = 600$  кг, тепловые потери  $Q_{пот}$  сушилки и калорифера в окружающую среду в процентном отношении от суммы всех остальных слагаемых  $Q$  теплового баланса равны 12 %. Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения данных приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_n$ , кг/ч	200	250	100	150	300	400	450	500	350	550
$u_n$ , %	40	48	50	38	52	44	46	36	42	54
$u_k$ , %	8	10	12	7	14	10	8	12	11	14
$\vartheta_1$ , °С	20	22	16	15	25	23	20	22	18	25
$\vartheta_2$ , °С	50	53	44	57	60	60	53	50	47	58
$t_0$ , °С	25	20	15	25	20	15	25	20	15	25
$\varphi_0$ , %	70	75	65	60	70	75	65	65	70	75
$t_2$ , °С	50	55	40	45	50	55	40	45	45	55
$\varphi_2$ , %	45	60	40	40	45	50	60	50	60	60

**Задача 9.2.** В сушилке производительностью  $G_{сух}$  (по абсолютно сухому продукту) высушивается материал от начальной  $u'_n$  до конечной  $u'_k$  влажности (считая на абсолютно сухое вещество). Температура воздуха, поступающего в калорифер,  $t_0$ , а его точка росы  $t_p$ . Процесс сушки в теоретической сушилке шел бы при энтальпии  $I$ . Температура воздуха на выходе из сушилки  $t_2$ . Нормальный сушильный вариант. Определить расход греющего пара и поверхность нагрева калорифера, если давление (абсолютное) греющего пара  $p$  и влажность его 5 %, а коэффициент теплопередачи  $K$ . Сумма всех потерь теплоты  $Q_{пот}$  составляет 15 % от расхода теплоты  $Q$  в теоретической сушилке. Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения величин сведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_{сух}$ , кг/ч	250	500	300	400	550	450	350	600	650	500
$u'_n$ , %	54	42	48	50	38	52	40	44	46	36
$u'_k$ , %	14	9	10	12	7	14	8	10	8	12
$t_0$ , °С	20	20	25	25	30	30	20	25	30	25
$t_p$ , °С	15	8	15	20	18	22	12	17	17	12
$I$ , кДж/кг	120	125	130	135	115	110	105	140	110	130
$t_2$ , °С	55	45	50	40	45	50	55	40	45	55
$p$ , МПа	0,3	0,2	0,25	0,3	0,2	0,25	0,3	0,25	0,2	0,3

$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

**Задача 9.3.** В сушилке, работающей по нормальному сушильному варианту, удаляется из материала влага в количестве  $W$ . Атмосферный воздух, имеющий температуру  $t_0$  и относительную влажность  $\varphi_0$ , нагревается в паровом калорифере, абсолютное давление греющего пара в котором  $p$ . Психрометр на воздухопроводе после сушилки показывает температуру воздуха по сухому термометру  $t_2$  и мокрому термометру  $t_m$ . Приняв удельный расход теплоты в действительной сушилке на 13 % больше, чем в теоретической, определить: 1) расход воздуха (в  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), 2) расход греющего пара, имеющего влажность 5 %, и 3) площадь поверхности нагрева калорифера, если коэффициент теплопередачи в нем равен  $K$ . Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Значения в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W, \text{кг}/\text{ч}$	1000	1500	1250	1200	800	1300	1450	1350	900	1100
$t_0, \text{°C}$	10	20	25	22	15	20	22	25	10	15
$\varphi_0, \%$	78	70	80	75	65	70	80	75	70	70
$p, \text{кгс}/\text{см}^2$	4	5	2	1	1	2	6	5	3	4
$t_2, \text{°C}$	50	55	45	55	40	45	50	55	40	45
$t_m, \text{°C}$	37	40	40	30	32	32	42	42	35	37
$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	48	30	40	42	44	46	32	34	36	38

**Задача 9.4.** Определить расход воздуха, расход греющего пара и требуемое его давление для противоточной воздушной сушилки, работающей по нормальному сушильному варианту. Производительность сушилки по влажному материалу  $G_n$ , начальная  $u_n$  и конечная  $u_k$  влажность материала (считая на общую массу). Воздух, поступающий в калорифер, имеет температуру  $t_0$  и относительную влажность  $\varphi_0$ ; воздух выходит из сушилки с температурой  $t_2$  и относительной влажностью  $\varphi_2$ . Температуру греющего пара выбрать. Влажность греющего пара 6 %. Расчет произвести: а) для теоретической сушилки, б) для действительной, принимая в ней температуру материала на входе  $\vartheta_1$ , на выходе  $\vartheta_2$ . Удельная теплоемкость высушенного материала  $c_k = 1,68 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Масса транспортного устройства (стальной транспортер), несущего часовую загрузку сырого материала,  $G_{\text{тр}} = 450 \text{ кг}$ . Потери теплоты сушилкой в окружающую среду  $Q_{\text{пот}}$  в процентном отношении от суммы всех остальных слагаемых теплового баланса  $Q$  составляют 10 %. Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Значения величин даны в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_n, \text{кг}/\text{ч}$	650	500	600	250	500	300	400	550	450	350

$u_n, \%$	40	52	50	54	42	48	50	36	44	46
$u_k, \%$	8	14	9	14	9	10	12	12	10	8
$t_0, ^\circ\text{C}$	15	25	10	25	20	20	15	20	15	25
$\varphi_0, \%$	65	60	80	70	75	65	70	70	75	65
$t_2, ^\circ\text{C} I$	40	45	50	50	55	45	45	50	55	40
$\varphi_2, \%$	40	40	50	45	60	50	60	45	50	60
$\vartheta_1, ^\circ\text{C}$	22	16	16	15	25	22	18	23	20	20
$\vartheta_2, ^\circ\text{C}$	53	44	55	57	60	50	47	60	53	50

**Задача 9.5.** В теоретическую сушилку, работающую с промежуточным (ступенчатым) подогревом воздуха, поступает влажный материал в количестве  $G_n$  его начальная влажность  $u_n$ , конечная –  $u_k$  (на общую массу). Воздух на выходе из сушилки имеет температуру  $t_2$ . Температура атмосферного воздуха  $t_0$ . Всего в сушильной установке три калорифера, в каждом из которых воздух нагревается до  $t_1$ . После каждого калорифера воздух в сушилке насыщается водяным паром до относительной влажности  $\varphi_2$ . Определить расход сухого воздуха и греющего пара, если его абсолютное давление  $p = 0,3$  МПа, а влажность 5 %. Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Значения в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_n, \text{кг/ч}$	1500	1100	1200	1800	1600	1700	1300	1400	1900	2000
$u_n, \%$	48	50	36	44	52	50	54	42	44	40
$u_k, \%$	10	12	12	10	14	9	14	9	10	8
$t_2, ^\circ\text{C}$	50	45	50	45	50	45	50	45	50	45
$t_0, ^\circ\text{C}$	15	30	25	20	25	27	32	25	35	25
$t_1, ^\circ\text{C}$	75	65	80	70	75	65	80	70	65	80
$\varphi_2, \%$	45	60	50	70	55	65	60	50	40	80

**Задача 9.6.** Известен расход греющего пара  $D$  в калорифере сушилки при его давлении  $p = 0,3$  МПа и влажности 7 %. Площадь поверхности нагрева калорифера  $F$ . Атмосферный воздух имеет температуру  $t_0$  и его точка росы  $t_p$ . Процесс сушки идет при энтальпии  $I$ . Парциальное давление водяного пара в воздухе, покидающем сушилку,  $p_p$ . Определить коэффициент теплопередачи в калорифере и производительность сушилки по влажному материалу, если поступающий в сушилку материал имеет влажность  $u_n$ , а выходящий из сушилки  $u_k$  (считая на общую массу). Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Значения даны в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p, \text{МПа}$	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
$D, \text{кг/ч}$	230	210	250	180	200	190	160	240	170	220
$F, \text{м}^2$	50	52	45	48	41	43	54	52	38	44

$t_0, ^\circ\text{C}$	27	30	25	20	25	23	32	30	22	27
$t_p, ^\circ\text{C}$	18	20	17	12	10	15	17	20	16	15
$I, \text{кДж/кг}$	120	125	130	135	100	110	105	140	115	130
$p_{\text{п}}, \text{мм рт. ст.}$	27	32	20	30	25	27	25	37	22	25
$u_{\text{н}}, \%$	54	42	44	40	60	48	50	36	44	14
$u_{\text{к}}, \%$	14	9	10	8	10	10	12	12	10	50

**Задача 9.7.** В сушилке производительностью  $G_{\text{к}}$  (по высушенному материалу) высушивается материал от начальной  $u_{\text{н}}$  до конечной  $u_{\text{к}}$  влажности (считая на общую массу). Показания психрометра атмосферного воздуха: температура сухого термометра  $t_0$ , мокрого  $t_{\text{м}}$ . Из сушилки воздух выходит с температурой  $t_2$  и относительной влажностью  $\varphi_2$ . Потери теплоты в сушилке и калорифере составляют 8 % от расхода теплоты в теоретической сушилке. Определить площадь поверхности нагрева калорифера и расход греющего водяного пара, если он имеет давление (абсолютное)  $p = 0,3 \text{ МПа}$  и влажность 5 %. Коэффициент теплопередачи в калорифере равен  $K$ . Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения величин сведены в табл. 9.7.

Таблица 9.7

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_{\text{к}}, \text{кг/ч}$	400	450	480	510	540	500	520	460	470	430
$u_{\text{н}}, \%$	68	66	72	56	60	70	74	58	54	64
$u_{\text{к}}, \%$	8	12	9	11	13	10	14	11	8	9
$t_0, ^\circ\text{C}$	30	20	25	30	25	20	20	25	25	30
$t_{\text{м}}, ^\circ\text{C}$	22	12	17	17	12	15	8	15	20	18
$t_2, ^\circ\text{C}$	45	45	50	55	40	40	45	50	50	55
$\varphi_2, \%$	50	60	45	50	60	40	40	50	45	60
$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	40	42	44	46	32	35	48	30	38	37

**Задача 9.8.** Определить расход воздуха, расход греющего пара, требуемое его давление и поверхность калорифера для сушилки, производительность которой по влажному материалу  $G_{\text{н}}$ , с начальной  $u_{\text{н}}$  и конечной  $u_{\text{к}}$  влажностью материала (считая на общую массу). Показания психрометра для воздуха, поступающего в калорифер: температура сухого термометра  $t_0$ , мокрого  $t_{\text{м}}$ . Воздух на выходе из сушилки имеет температуру  $t_2$  и относительную влажность  $\varphi_2$ . Температуру греющего пара принять на  $\Delta t = 15 ^\circ\text{C}$  выше температуры воздуха на выходе из калорифера. Влажность греющего водяного пара 6 %. Расход теплоты на 10 % больше расхода теплоты в теоретической сушилке. Коэффициент теплопередачи в калорифере равен  $K$ . Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения величин сведены в табл. 9.8.

Таблица 9.8

Величины	№ варианта
----------	------------

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_{\text{н}}$ , кг/ч	700	550	650	500	680	580	600	620	520	550
$u_{\text{н}}$ , %	70	74	58	54	68	66	50	64	72	58
$u_{\text{к}}$ , %	10	14	11	8	8	12	9	9	10	11
$t_0$ , °C	25	30	20	25	20	25	10	30	25	20
$t_{\text{м}}$ , °C	20	22	12	17	8	15	5	17	12	15
$t_2$ , °C	50	45	45	50	45	50	50	55	40	40
$\varphi_2$ , %	45	50	60	45	40	50	50	50	60	40
$K$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	46	32	40	42	44	48	30	35	37	50

**Задача 9.9.** В теоретической сушилке производительностью  $G_{\text{сух}}$  (по абсолютно сухому продукту) высушивается материал от начальной  $u_{\text{н}}$  до конечной  $u_{\text{к}}$  влажности (считая на общую массу). Показания психрометра для атмосферного воздуха: температура сухого термометра  $t_0$ , мокрого  $t_{\text{м}}$ . Выходящий из сушилки воздух имеет температуру  $t_2$  и относительную влажность  $\varphi_2$ . Определить расход греющего пара в калорифере и площадь поверхности нагрева, если давление (абсолютное) греющего пара  $p = 0,2$  МПа и коэффициент теплопередачи  $K$ . Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения величин сведены в табл. 9.9.

Таблица 9.9

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G_{\text{сух}}$ , кг/ч	550	540	700	550	650	620	520	600	680	580
$u_{\text{н}}$ , %	58	54	42	50	40	64	58	35	55	45
$u_{\text{к}}$ , %	11	8	6	9	6	9	11	8	10	8
$t_0$ , °C	20	25	30	25	25	30	10	18	20	25
$t_{\text{м}}$ , °C	12	17	17	12	20	22	5	15	8	15
$t_2$ , °C	45	50	55	40	50	45	50	40	45	50
$\varphi_2$ , %	60	45	50	60	45	50	50	65	40	50
$K$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	37	46	32	40	42	44	48	33	50	35

**Задача 9.10.** Определить производительность по высушенному материалу и поверхность нагрева калорифера в теоретической сушилке. Расход воздуха  $L$ . На выходе из сушилки воздух имеет энтальпию  $I$ , парциальное давление водяного пара в нем  $p_{\text{п}}$ . Начальная влажность материала  $u_{\text{н}}$ , конечная  $u_{\text{к}}$  (считая на общую массу). На входе в калорифер воздух имеет температуру  $t_0$  и влагосодержание  $d$ . В калорифере воздух нагревается до температуры  $t_2$ . Коэффициент теплопередачи равен  $K$ . Давление (абсолютное) греющего пара  $p = 0,4$  МПа. Дать схему процесса на диаграмме Рамзина. Численные значения величин сведены в табл. 9.10.

Таблица 9.10

Величины	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L$ , кг/ч	6100	6200	5800	5900	5500	6400	6500	6000	6300	5400
$I$ , кДж/кг	140	120	125	130	135	130	100	110	105	115

$p_{\text{п}}, \text{мм рт. ст.}$	37	27	32	20	30	25	25	27	25	22
$u_{\text{н}}, \%$	40	64	58	35	55	45	45	40	54	42
$u_{\text{к}}, \%$	6	9	11	8	10	8	8	7	8	6
$t_0, ^\circ\text{C}$	30	27	30	25	20	27	25	23	32	22
$d, \text{кг/кг}$	16	13	15	14	8	9	10	8	12	11
$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	47	56	42	50	52	54	58	43	40	45

Составители

Александр Романович Богомолов

Елена Юрьевна Темникова

## ТЕРМОДИНАМИКА

Программа, методические указания  
по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы  
для студентов специальности 130405 «Обогащение полезных ископаемых»  
заочной формы обучения

Рецензент Г. С. Михайлов

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 01.12.2010. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 4,0.

Тираж 76 экз. Заказ

ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.