

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ



Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова

Б.М. Гришко

П.А. Трубаев

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Часть 1

Основы термодинамики

для студентов заочной формы обучения  
с применением дистанционных технологий



Белгород 2009

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ  
КОМПЛЕКС



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова

**Б.М. Гришко**

**П.А. Трубаев**

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

## **Часть 1**

### **Основы термодинамики**

Учебное пособие для студентов заочной формы обучения  
с применением дистанционных технологий специальности  
140105 – Энергетика теплотехнологий

Белгород 2009

УДК 536.7

ББК 31.31

Г 85

**Гришко Б.М.**

- Г 85      Теоретические основы теплотехники. Часть 1. Техническая термодинамика: Учеб. пособие / Б.М. Гришко, П.А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 137 с.

Рассмотрены основные понятия и законы термодинамики, термодинамические процессы, свойства идеальных и реальных газов, свойства водяного пара и влажного воздуха, положения о теплоемкости.

Издание содержит примеры решения задач, контрольные задачи и контрольные вопросы.

Ил. 35. Табл. 5. Библиогр.: 10 назв.

УДК 536.7

ББК 31.31

© Б.М. Гришко, П.А. Трубаев, 2009

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г.Шухова, 2009

## Предисловие

В учебном пособии излагается содержание первого раздела дисциплины «Теоретические основы теплотехники».

Термодинамика – наука о превращении энергии – является теоретической базой теплоэнергетики. Она относится к фундаментальным наукам, ее содержание приняло законченный облик уже к началу XX века. Классическая (феноменологическая) термодинамика изучает законы взаимного превращений различных видов энергии. Техническая термодинамика рассматривает взаимопревращение теплоты и работы.

Название «термодинамика» определяет не учение о движении теплоты (как на первый взгляд вытекает из ее названия), а науку о «движущих силах», возникающих при тепловых процессах. Первое сочинение по термодинамике, написанное в 1824 году французским физиком и инженером Сади Карно, называлось «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Теоремы Карно, определяющие наибольший коэффициент полезного действия тепловых машин, позволили впоследствии сформулировать один из основных законов термодинамики – второе начало. В 40-х годах XIX века в результате исследований немецкого врача и физика Р. Майера и английского физика Дж. Джоуля был установлен механический эквивалент теплоты и на этой основе открыт закон сохранения и превращения энергии, называемый в термодинамике ее первым началом.

В виде оформленной научной системы, исходящей из работ Карно и закона сохранения и превращения энергии, термодинамика появилась в 50-х годах XIX века в трудах немецкого физика Р. Клаузиуса и английского физика У. Томсона (лорда Кельвина). Они дали современные формулировки второго начала термодинамики и ввели важнейшие понятия – энтропии и абсолютной температуры. Основным методом исследования термодинамики XIX века был *метод круговых процессов*.

Большое значение для термодинамики имели появившиеся в конце XIX века работы американского физика-теоретика Дж. У. Гиббса, в которых был создан новый метод термодинамических исследований (*метод термодинамических потенциалов*), установлены общие условия термодинамического равновесия, развита теория фаз и капиллярности. В 1906 г. на основе многочисленных исследований свойств тел при температурах близких к 0К, был установлен новый закон природы – третье начало термодинамики, согласно которому при температурах, стремящихся к 0К, равновесные изотермические процессы проходят без изменения энтропии. Это закон позволяет определить численные значения энтропии, имеющей большое значение в термодинамических расчетах.

Основываясь на трех началах, термодинамика исследует свойства реальных систем, состоящих из большого числа частиц, и превращения энергии в них. Все способы получения энергии заключаются в её превращении из первичной (например внутренней энергии топлива, геотермальной или ядерной энергии, энергии электромагнитного поля) в форму, используемую людьми (электрическую, механическую и тепловую) и в полезную работу. С помощью термодинамики можно производить анализ процессов этих превращений, определять направления протекания физических и химических процессов, оценивать энергетическую эффективность процессов и аппаратов.

На основе теоретической базы термодинамики разрабатываются методы ее применения к практическим задачам, прежде всего к тепловым машинам (устройствам для передачи теплоты от теплоотдатчика к теплоприемнику с использованием постоянного количества рабочего тела, подвергающегося преобразованиям в цикле). Из практических применений термодинамики хочется отметить введенное профессором из Лионского университета Ж. Гюи и словацким инженером и ученым-теплотехником А. Стодолой понятие работоспособности теплоты, которой югославский ученый З. Рант дал название «эксергия». Эксергия – это полезная работа, которую можно получить из системы с учетом параметров окружающей среды. Энергия в реальных (необратимых процессах) сохраняется неизменной, энтропия всегда возрастает, а эксергия – убывает. Это показывает, что любое преобразование энергии ведет к ухудшению ее работоспособности.

Термодинамический метода исследования имеет следующие особенности.

1. Термодинамика использует дедуктивный метод, то есть переход от общего к частному. Как отмечалось выше, в основе термодинамики лежат три закона (начала), установленные опытным путем: первый является законом сохранения и превращения энергии; второй устанавливает качественную направленность процессов; третий. Практические задачи решаются с помощью соотношений, полученных их уравнений этих законов путем математического преобразования.

2. Термодинамика рассматривает макроскопические системы, то есть состоящие из большого числа частиц. Получить закономерности для микроструктур термодинамика не позволяет.

3. Термодинамика рассматривает равновесные системы, то есть имеющие одинаковые и не изменяющиеся во времени параметры в любой точке системы. Процессы в термодинамике представляются как непрерывная последовательность равновесных состояний системы (так называемые квазистатические процессы).

Согласно государственному образовательному стандарту направления «Теплоэнергетика» в раздел «Термодинамика» дисциплины «Теоретические основы теплотехники» входят следующие вопросы: первый закон термодинамики; второй закон термодинамики; реальные газы; водяной пар; термодинамические свойства реальных газов;  $p$ ,  $\pi$  - диаграмма; таблицы термодинамических свойств веществ; истечения из сопел; дросселирование; циклы паротурбинных установок; тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки; газовые циклы; схемы, циклы и термический КПД двигателей и холодильных установок; эксергетический анализ циклов; основы химической термодинамики; основы термодинамики необратимых процессов.

В первой части учебного пособия рассмотрены основные понятия и определения термодинамики, законы идеального и реального газов, понятие о теплоемкости, первый и второй законы термодинамики, основные термодинамические процессы идеальных газов, фазовые переходы, свойств водяного пара и влажного воздуха.

Каждая глава учебного пособия сопровождается контрольными вопросами, примерами решения задач и контрольными задачами. При подготовке учебного пособия использованы работы [1, 2].

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. ПРЕДМЕТ И МЕТОД ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика – наука, занимающаяся изучением законов взаимного преобразования различных видов энергии. В её основу положены уравнение состояния и три экспериментальных закона: **первый закон** (первое начало термодинамики), определяющий закон сохранения и превращения энергии; **второй закон** (второе начало термодинамики), описывающий протекание естественных явлений в природе; **третий закон** (третье начало термодинамики) утверждающий, что абсолютный нуль температуры недостижим.

Термодинамика вскрывает глубокие связи между свойствами вещества. Например, по теплоёмкости вещества можно вычислить плотность вещества и наоборот.

В термодинамике для исследования процессов используются два метода: метод круговых процессов (метод циклов); метод характеристических функций и геометрических построений.

Первый метод используется в технической термодинамике. Он позволяет обосновать второй закон термодинамики, приводит к понятию абсолютной температуры и энтропии для идеального газа, помогает доказать недостижимость абсолютного нуля температур.

Второй метод разработан Гиббсом и широко используется в химической термодинамике.

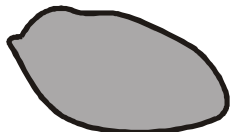
## 1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Объектом изучения термодинамики являются различные термодинамические системы.

**Термодинамическая система** – это тело, способное обмениваться с другими телами энергией и веществом.

Термодинамическая система, между любыми частями которой нет поверхностей раздела, называется **гомогенной**.

Термодинамическая система, состоящая из отдельных частей, разграниченных поверхностями раздела, называется **гетерогенной**. Однородная часть гетерогенной системы называется **фазой**.



Гомогенная система



Гетерогенная система

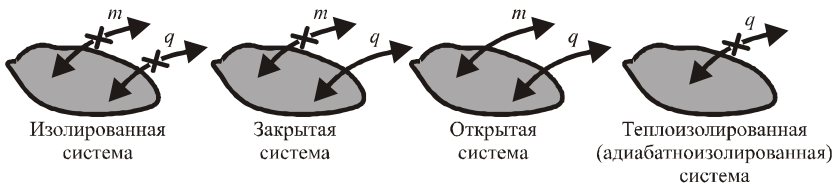
В зависимости от условий взаимодействия с другими системами различают изолированную, замкнутую, открытую и адиабатно изолированную термодинамические системы.

Термодинамическая система, которая не может обмениваться энергией и веществом с другими системами, называется *изолированной*.

Термодинамическая система называется *закрытой*, если она не может обмениваться веществом с другими системами.

Термодинамические системы, которые могут обмениваться веществом и энергией с другими системами, называются *открытыми*.

Термодинамическая система, которая не может обмениваться теплотой с другими системами, называется *теплоизолированной* или *адиабатно изолированной*.



Совокупность физических свойств системы в рассматриваемых условиях называют термодинамическим состоянием системы.

Различают равновесное (стационарное) и неравновесное (нестационарное) состояния термодинамической системы.

**Равновесным состоянием** термодинамической системы называется такое состояние, которое характеризуется при постоянных внешних условиях неизменностью параметров во времени и отсутствием в системе потоков. Состояние термодинамической системы, при котором во всех её частях температура одинакова, называют **термическим равновесным состоянием**.

Изолированная термодинамическая система независимо от своего начального состояния с течением времени всегда приходит в состояние равновесия, из которого самопроизвольно выйти она не может (это основной постулат термодинамики – нулевое начало).

Состояние термодинамической системы, при котором значения параметров во всех частях ее остаются неизменными во времени благодаря внешнему воздействию потоков вещества, энергии, импульса, заряда и т. п., называется **стационарным**. Если значения параметров изменяются во времени, то состояние термодинамической системы называется **нестационарным**.



Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из её параметров, называется **термодинамическим процессом**.

Различают равновесные и неравновесные процессы. **Равновесным процессом** называется термодинамический процесс, представляющий собой непрерывную последовательность состояний. Все части такой системы имеют одинаковые температуру и давление. **Неравновесным процессом** называется термодинамический процесс, представляющий собой последовательность состояний, среди которых не все являются равновесными. В неравновесном процессе различные части системы имеют разные температуры, давления, плотности, концентрации.

Термодинамический процесс, происходящий при постоянной температуре системы, называется **изотермическим**.

Термодинамический процесс, происходящий при постоянном давлении в системе, называется **изобарным**.

Термодинамический процесс, происходящий при постоянном объёме системы, называется **изохорным**.

Термодинамический процесс, в котором система не обменивается теплотой с окружающей средой, называется **адиабатным**.

$T = \text{const}$	$\rightarrow$	изотермический процесс
$p = \text{const}$	$\rightarrow$	изобарный процесс
$v = \text{const}$	$\rightarrow$	изохорный процесс
$q = \text{const}$	$\rightarrow$	адиабатный процесс

Преобразование теплоты в механическую работу или наоборот осуществляется в термодинамическом процессе посредством какого-либо упругого тела, называемого **рабочим**. Оно может быть в твердом, жидком или газообразном агрегатных состояниях.

### 1.3. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

Для того чтобы определить состояние рассматриваемого вещества, вводятся удобные характеристики состояния вещества – так называемые **параметры состояния**.

Свойства вещества могут быть интенсивными и экстенсивными. Интенсивными называются свойства, не зависящие от количества вещества в системе (температура, давление и др.). Свойства, зависящие от количества вещества, называются экстенсивными. Пример экстенсивных свойств – объем, который изменяется пропорционально количеству вещества.

Удельные, то есть отнесенные к единице вещества, экстенсивные свойства приобретают смысл интенсивных свойств. Интенсивные свойства, определяющие состояние тела или группы тел (термодинамической системы) называют **термодинамическими параметрами состояния** тела (системы).

Наиболее распространенными параметрами состояния являются абсолютная температура, абсолютное давление и удельный объем (или плотность) тела.

Температура характеризует тепловое состояние тела. С точки зрения молекулярно-кинетической теории температура есть мера интенсивности теплового движения молекул. Для идеального газа температура определяется из уравнения:

$$T = \frac{3}{2k} \frac{mw^2}{2}. \quad (1.1)$$

Температура  $T$ , определяемая таким образом, называется **абсолютной**. Другое определение – температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, называется **абсолютной**, а шкала температур называется шкалой Кельвина.

Температуры тел определяют направление возможного самопроизвольного перехода тепла между этими телами. Измерение температуры производится с помощью термометров, которые должны быть отградуированы в соответствии с твердо установленной температурной шкалой. В основу приборов, измеряющих температуру, положено явление зависимости от температуры какого-либо свойства вещества (например, теплового расширения, электрического сопротивления, электродвижущей силы, теплового излучения и др.) и по величине изменения этих свойств судят об изменении температуры.

Численный отсчет температуры производится по шкале температур. За основную единицу измерения температуры принимают градус, имеющий разную величину в различных температурных шкалах. Шкала температур устанавливается путем деления разности показаний термометра в двух произвольно выбранных постоянных температурных точках, называемых реперными, на некоторое число равных частей – градусов. Так как выбор постоянных температурных точек и цены деления шкалы является произвольным, имеется ряд шкал температур.

В настоящее время наряду со шкалой Кельвина применяются температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта, Реомюра, Ренкина.

**Историческая справка.** Первый современный термометр, основанный на опорных точках, был описан в 1724 г. голландцем Д. Фаренгейтом. Температуру таяния смеси из льда, поваренной соли и нашатырного спирта, имитирующую самую низкую зимнюю температуру, он принял за 0°F. В качестве второй точки им использована температура

таяния льда. Между этими точками Фаренгейт разделил шкалу на 32 деления. Дополнительно тарировку термометров он проверял по температуре человеческого тела ( $98^{\circ}\text{F}$ ) и кипения воды ( $212^{\circ}\text{F}$ ). Температурная шкала Фаренгейта используется в Англии и США.

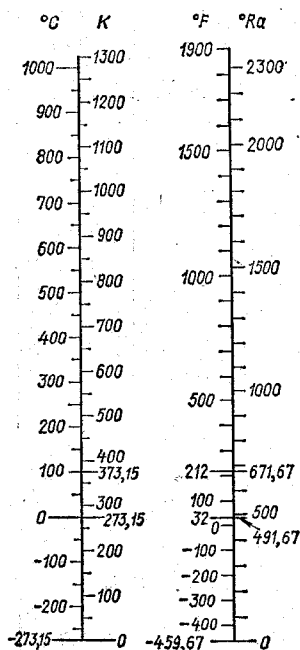
Шкала Реомюра, употреблявшаяся во Франции с 1740 г., построена на точках заморзания ( $0^{\circ}\text{R}$ ) и кипения ( $80^{\circ}\text{R}$ ) воды. Эта шкала была принята в дореволюционной России и заменена на шкалу Цельсия в 30-х годах XX века.

В шкале Цельсия, предложенной 1742 г. шведским физиком, за опорные точки приняты температуры таяния льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Между этими точками шкала разбита на 100 градусов.

Термодинамическая температурная шкала, предложенная лордом Кельвином (У. Томсоном) в 1848 г., в качестве абсолютного нуля принимает наинизшую возможную термодинамическую температуру, называемую абсолютным нулем. Цена деления в шкале Кельвина равна делению шкалы Цельсия. В США пользуются термодинамической температурной шкалой шотландца У. Дж. Ранкина (предложена в середине XIX века), в которой отсчет начинается от абсолютного нуля, а единица деления равна шкале Фаренгейта.

С 1954 г. термодинамическая температурная шкала (шкала Кельвина) определяется одной реперной точкой – тройной точкой воды, определяемой более точно, чем точка плавления льда, которой установлена температура  $273,16\text{ K}$  ( $0,01^{\circ}\text{C}$ ).

В табл. 1.1 и на рис. 1.1 приведены соотношения между различными температурными шкалами, пользуясь которыми можно пересчитать температуру тела из одной температурной шкалы в другую.



Шкала	Абсолютный ноль	Заморзание воды	Кипение воды
Кельвина	0K	273,15K	373,15K
Цельсия	$-273,15^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C}$
Фаренгейта	$-459^{\circ}\text{F}$	$32^{\circ}\text{F}$	$212^{\circ}\text{F}$
Ранкина	$0^{\circ}\text{Ra}$	$491,67^{\circ}\text{Ra}$	$671,67^{\circ}\text{Ra}$

Рис. 1.1. Соотношения между температурными шкалами

Таблица 1.1

## Соотношения между температурными шкалами

Наименование шкалы	Кельвина $T, K$	Цельсия $t, ^\circ C$	Ранкина $T, ^\circ Ra$	Фаренгейта $t, ^\circ F$
Кельвина, K	–	$t + 273,15$	$5/9 T$	$(t - 32)/1,8 + 273,15$
Цельсия, $^\circ C$	$T - 273,15$	–	$5/9 T - 273,15$	$(t - 32)/1,8$
Ранкина, $^\circ Ra$	$1,8 T$	$1,8 (t + 273,15)$	–	$t + 459,67$
Фаренгейта, $^\circ F$	$1,8 (T - 273,15) + 32$	$1,8 t + 32$	$T - 459,67$	–

Наиболее употребительной является международная стоградусная температурная шкала (шкала Цельсия). В термодинамике используется универсальная шкала температур – шкала Кельвина, которая установлена на основе второго закона термодинамики. Абсолютная температура, определённая по универсальной шкале температур Кельвина, является параметром состояния термодинамической системы, так как не зависит от свойств термодинамического вещества.

Другой важный параметр состояния – **абсолютное давление**, представляющее собой силу, действующую по нормали к поверхности тела и отнесенную к единице площади этой поверхности.

Единицей давления в СИ является паскаль – давление вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup> ( $Па = Н/м^2$ ).

Абсолютное давление  $p_a$  отсчитывается от нуля (абсолютного вакуума). Для удобства в технике используют также избыточное или манометрическое давление  $p_{изб}$  и разрежение или вакуум  $p_p$ . Эти виды давления равны отклонению измеряемого давления от барометрического (атмосферного) давления  $p_б$  (рис. 1.2).

Давление  $p_б$ , создаваемое атмосферным воздухом, называется **барометрическим** или **атмосферным**.

**Избыточным**, или **манометрическим**, **давлением** называется давление сверх атмосферного, то есть избыточное давление – это разность между абсолютным и барометрическим давлениями:

$$p_{изб} = p_a - p_б. \quad (1.2)$$

Избыточное давление не определяет состояния вещества и не является параметром состояния, поскольку зависит от состояния окружающей среды.

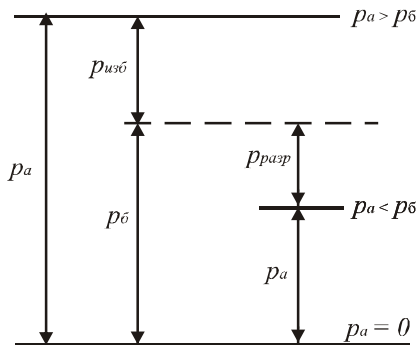


Рис. 1.2. К измерению давления

**Разрежением, или вакуумом** называется разность между атмосферным и абсолютным давлением той среды, где измеряется давление. Вакуум показывает, насколько давление газа меньше давления окружающей среды:

$$p_p = p_б - p_a. \quad (1.3)$$

Термин вакуум обычно применяют для давлений, значительно ниже атмосферного.

В термодинамических уравнениях всегда используют значения абсолютного давления, так как только оно является параметром, характеризующим состояние термодинамической системы.

Атмосферное давление – величина переменная, поэтому в технике применяется **нормальное атмосферное давление**,  $p_0 = 101325$  Па (760 мм рт. ст.).

В технике и промышленности часто используются единицы измерения давления, отличные от системы СИ.

На практике часто измеряют давление высотой столба  $h$  какой-либо жидкости (воды, ртути, спирта и др.). Связь между высотой столба жидкости и давлением определяется уравнением гидростатики

$$p = \rho gh, \text{ или } h = \frac{p}{\rho g}, \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения.

Перевод единиц в этом случае следующий:

$$1 \text{ м вод. ст.} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1 = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Па,}$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 9,81 \text{ Па,}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = 133,3 \text{ Па,}$$

$$1 \text{ Па} = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ м вод. ст.,}$$

$$1 \text{ Па} = 0,102 \text{ мм вод. ст.,}$$

$$1 \text{ Па} = 0,0075 \text{ мм рт. ст.}$$

Техническая атмосфера, кгс/см<sup>2</sup>, показывает массу тела в килограммах, производящего давление на 1 см<sup>2</sup> поверхности. Для перевода в систему СИ достаточно перевести размерность силы из килограмма в ньютоны и площади из 1/см<sup>2</sup> в 1/м<sup>2</sup>, таким образом,

$$\begin{aligned} 1 \text{ кгс/см}^2 &= 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}, \\ 1 \text{ Па} &= 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2. \end{aligned}$$

Высоту столба жидкости можно перевести в кгс/см<sup>2</sup>, используя в качестве промежуточной единицы Паскаль:

$$\begin{aligned} 1 \text{ м вод. ст.} &= \frac{9,81 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 10^4} = 0,1 \text{ кгс/см}^2, \\ 1 \text{ кгс/см}^2 &= 10 \text{ м вод. ст.} \end{aligned}$$

Для перевода высоты столба разных жидкостей используется соотношение, получаемые из выражения (1.4):

$$h_2 = h_1 \frac{r_1}{r_2}. \quad (1.5)$$

Перевод единиц давления представлен в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Перевод единиц давления

Размерность	Па	кгс/см <sup>2</sup>	м вод. ст.	мм вод. ст.	мм рт. ст.
Па	—	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	0,102 (9,81 <sup>-1</sup> )	0,0075
кгс/см <sup>2</sup>	98 100	—	10	10 000	735,3
м вод. ст.	9 810	0,1	—	1000	73,53
мм вод. ст.	9,81	$10^{-4}$	0,001	—	0,07353
мм рт. ст.	133,3	0,00136	0,0136	13,6	—

Пример: 1 мм рт. ст. = 133,3 Па; 7 мм рт. ст. = 7 · 133,3 = 933,1 Па.

**Удельный объем** вещества представляет собой объем, занимаемый единицей массы вещества. Удельный объем  $v$  связан с массой  $m$  и его объемом  $V$  следующим соотношением:

$$v = \frac{V}{m}. \quad (1.6)$$

Удельный объем вещества измеряется в м<sup>3</sup>/кг.

**Плотность** – величина обратная удельного объема:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}. \quad (1.7)$$

Она измеряется в кг/м<sup>3</sup>.

При отсутствии внешних воздействий на систему состояние чистого вещества однозначно определено, если заданы два интенсивных параметра. Любой другой параметр является однозначной функцией двух заданных параметров. Удельный объем данного вещества однозначно определяется величиной давления  $p$  и температуры  $T$ :

$$v = f(p, T). \quad (1.8)$$

Температура вещества однозначно определена соотношением

$$T = f(p, v), \quad (1.9)$$

а давление – соотношением

$$p = f(T, v). \quad (1.10)$$

Таким образом, любые три параметра состояния (например,  $p$ ,  $v$ ,  $T$ ) чистого вещества однозначно связаны между собой.

### ЗАДАЧИ

1. В сосуде объемом  $1,2 \text{ м}^3$  находится  $1,2 \text{ кг}$  кислорода. Определить удельный объем и плотность кислорода при указанных условиях.

2. Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает  $0,4 \text{ МПа}$ , а атмосферное давление равно  $740 \text{ мм. рт. ст.}$

3. Разрежение в газоходе парового котла, измеряемое тягомером, равно  $20 \text{ мм. вод. ст.}$  Определить абсолютное давление газов, если показание барометра  $745 \text{ мм. рт. ст.}$ , и выразить его в  $\text{МПа}$ .

4. Какая высота ртутного столба соответствует  $90 \text{ кПа}$ ?

5. Какая высота водяного столба соответствует  $98 \text{ Па}$ ?

6. Определить абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно  $700 \text{ мм. рт. ст.}$ , а показание барометра  $740 \text{ мм. рт. ст.}$ , при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

7. В газгольдер объемом  $100 \text{ м}^3$  подается газ по трубопроводу диаметром  $100 \text{ мм}$  со скоростью  $5 \text{ м/с}$ . Удельный объем газа –  $0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ . За какое время наполнится газгольдер, если плотность газа, заполнившего газгольдер, равна  $1,4 \text{ кг/м}^3$ ?

8. Для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное действие на человеческий организм, обычно при пользовании ртутными манометрами над уровнем ртути наливают слой воды. Определить абсолютное давление в сосуде, если разность столбов ртути в U-образном манометре составляет  $500 \text{ мм}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$ , а высо-

та столба воды над ртутью равна 200 мм. Показание барометра 740 мм. рт. ст. при температуре 0°C.

**9.** Переведите  $2 \text{ кгс/см}^2$  в МПа; в мм вод. ст.; в мм рт. ст.

**10.** Какая температура таяния льда и температура кипения воды по шкале Фаренгейта?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется термодинамической системой?
2. Какая термодинамическая система называется изолированной?
3. Что называется равновесным состоянием термодинамической системы?
4. Что называют термодинамическими параметрами состояния системы?
5. Что называют абсолютным давлением?
6. Что называется термодинамическим процессом?
7. Какие процессы называют равновесными, а какие – неравновесными?
8. Что называют рабочим телом?
9. Какая термодинамическая система называется гомогенной, а какая – гетерогенной?
10. Что называется абсолютной температурой?
11. Какое число независимых параметров определяет состояние рабочего тела? Почему?
12. Какое давление можно определить по манометру?
13. Какое давление показывает вакуумметр?
14. Какие шкалы температур можно использовать при проведении термодинамических расчетов?



## 2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

### 2.1. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В 1662 г. Р. Бойлем, а в 1676 г. независимо от него Э. Мариоттом было показано, что при постоянной температуре произведение давления газа на его объем постоянно, то есть в изотермическом процессе расширения или сжатия газа

$$pv = \text{const.} \quad (2.1)$$

Это соотношение носит название **закона Бойля-Мариотта**.

В 1802 г. Ж. Гей-Люссак установил, что если давление газа в процессе его нагрева поддерживать неизменным (осуществлять изобарный процесс), то объем газа при нагреве будет увеличиваться с ростом температуры, причем эта зависимость оказывается линейной и имеет вид

$$V = V_0(1 + \alpha t). \quad (2.2)$$

Это соотношение называется **законом Гей-Люссака**. Здесь  $V_0$  – объем газа при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;  $V$  – объем газа при температуре  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент объемного расширения газа.

Для любого состояния газа с параметрами  $p$ ,  $v$ ,  $T$ , подчиняющегося указанным двум законам, можно установить, что

$$\frac{pv}{T} = \text{const.} \quad (2.3)$$

Постоянная величина в уравнении не зависит от состояния газа. Она зависит только от свойств газа и является индивидуальной для каждого газа (так называемая газовая постоянная). Обозначая газовую постоянную через  $R$ , запишем уравнение в следующем виде:

$$pv = RT, \quad (2.4)$$

или

$$p = \rho RT. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.4), однозначно связывающее между собой параметры  $p$ ,  $v$ ,  $T$  газа, называется **уравнением Клапейрона**, также оно называется **термическим уравнением состояния идеальных газов** или **характеристическим уравнением**.

Газ, строго подчиняющийся уравнению (2.5), называется **идеальным**, а уравнение (2.5) называют **уравнением состояния идеального газа**.

Представление об идеальном газе основано на том, что:

- идеальный газ строго подчиняется уравнению Клапейрона (основное определение идеального газа);
- идеальный газ является предельным состоянием реального газа при  $p \rightarrow 0$ ;
- молекулы идеального газа рассматриваются как материальные точки, взаимодействие которых между собой ограничено соударениями.

## 2.2. ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ УДЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ. УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ

Характеристики ряда газов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Свойства газов

Газ	Молекулярная масса $\mu$ , г/моль	Плотность при нормальных условиях $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)	Молярный объем при нормальных условиях $V_\mu^*$ , м <sup>3</sup> /кмоль
Азот N <sub>2</sub>	28,0134	1,251	296,8	22,40
Аммиак N <sub>3</sub> N	17,0304	0,771	488,4	22,09
Аргон Ar	39,94	1,783	208,2	22,39
Водород H <sub>2</sub>	2,0158	0,0899	4124,0	22,42
Воздух	28,964	1,293	287,1	22,4
Гелий He	4,00260	0,179	2078,0	22,42
Кислород O <sub>2</sub>	31,9988	1,429	260,0	22,4
Метан CH <sub>4</sub>	16,0426	0,717	517,8	22,37
Оксид углерода CO	28,0104	1,250	296,7	22,40
Углекислый газ CO <sub>2</sub>	44,0098	1,977	188,8	22,26
Хлор Cl <sub>2</sub>	70,906	3,22	117,2	22,02

\* Для идеального газа 22,40 м<sup>3</sup>/кмоль

Если в цилиндре нагревать газ при постоянном давлении от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ , то объем его  $v_1$  увеличится до объема  $v_2$ . При этом газ выполнит работу  $l$  и поднимет поршень на высоту  $h$ .

Уравнения для двух состояний рабочего тела:

$$p_1 v_1 = RT_1 ; \quad (2.6)$$

$$p_2 v_2 = RT_2 . \quad (2.7)$$

Вычитая уравнения получаем

$$p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1), \quad (2.8)$$

Отсюда

$$R = \frac{p(v_2 - v_1)}{T_2 - T_1}. \quad (2.9)$$

Так как  $l = p(v_2 - v_1)$ , имеем

$$R = \frac{l}{T_2 - T_1}. \quad (2.10)$$

Следовательно, удельная газовая постоянная есть работа, совершаемая 1 кг газа в процессе при постоянном давлении и изменении температуры на один градус.

Газовая постоянная, отнесенная к одному молю, для всех газов имеет одно и тоже значение. Эту величину называют универсальной газовой постоянной  $R_\mu$  (или  $\mu R$ )

$$R_\mu = \mu R = 8,3142 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} = 8314,2 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Зная молярную масса газа и универсальную газовую постоянную, можно найти газовую постоянную для газа  $R$ :

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314,2}{\mu}.$$

### 2.3. ПОНЯТИЕ О СМЕСЯХ. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

В термодинамике часто используется понятие чистого вещества и смеси. **Чистым веществом** называется вещество, все молекулы которого одинаковы. Чистые вещества, составляющие смесь, называются компонентами. Смесь, состоящая из нескольких чистых веществ, называется **раствором**. Частными случаями смесей (растворов) являются смеси различных газов – так называемые газовые смеси. Большой интерес представляет рассмотрение газовой смеси, каждый из компонентов которой может рассматриваться как идеальный газ.

Основным законом, определяющим поведение газовой смеси, является **закон Дальтона**, который гласит, что каждый отдельный газ ведет себя в газовой смеси так, как будто он один (при температуре смеси) занимает весь этот объем смеси. Каждый отдельный газ, входящий в газовую смесь, имеет такое давление, какое он имел бы, если бы он один занимал весь объем газовой смеси. Это давление является **парци-**

**альным давлением данного газа** и обозначается для каждого газа соответственно  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ .

Закон Дальтона может быть представлен и в следующей формулировке – сумма парциальных давлений идеальных газов, входящих в газовую смесь, равна полному давлению газовой смеси, то есть

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (2.11)$$

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми или объемными долями.

Массовая доля определяется отношением массы отдельного газа, входящего в состав смеси, к массе всей смеси:

$$m_i = \frac{M_i}{M}. \quad (2.12)$$

где  $M_i$  – масса отдельного газа и  $M$  – масса всей смеси.

Объемной долей газа называют отношение объема каждого компонента, входящего в смесь, к объему всей газовой смеси при условии, что объем каждого компонента газовой смеси отнесен к давлению и температуре смеси (приведенный объем):

$$r_i = \frac{V_i}{V}. \quad (2.13)$$

где  $V_i$  – приведенный объем компонентов газов, входящих в смесь;  $V$  – общий объем газовой смеси.

Для перевода массовых долей в объемные доли пользуются формулой

$$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i}}. \quad (2.14)$$

Объемные доли переводят в массовые по формуле

$$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}. \quad (2.15)$$

Плотность газовой смеси определяют из выражения

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}}, \quad (2.16)$$

или, если известен объемный состав газовой смеси, по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i . \quad (2.17)$$

Значение так называемой кажущейся молекулярной массы газовой смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i , \quad (2.18)$$

или через массовый состав газовой смеси

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i}} . \quad (2.19)$$

Газовую постоянную смеси газов  $R_{\text{см}}$  можно выразить через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в газовую смесь

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n m_i R_i , \quad (2.20)$$

или через кажущуюся молекулярную массу газовой смеси

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i} . \quad (2.21)$$

Парциальные давления определяются, если известны объемные доли отдельных компонентов, входящих в смесь:

$$p_i = p r_i , \quad (2.22)$$

где  $p_i$  - парциальное давление любого газа, входящего в газовую смесь;  
 $p$  – общее давление газовой смеси.

Если известны массовые доли газовой смеси, то парциальное давление любого газа, входящего в смесь,

$$p_i = m_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} p . \quad (2.23)$$

## ЗАДАЧИ

**1.** Определить плотность азота при давлении  $p = 0,15$  МПа и температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ .

**2.** Определить удельный объем кислорода при давлении  $p = 0,25$  МПа и температуре  $t = 220^\circ\text{C}$ .

3. Определить массу двуокиси углерода находящегося в сосуде объемом  $2 \text{ м}^3$  при температуре  $t = 80^\circ\text{C}$ .

4. Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются от  $1250$  до  $200^\circ\text{C}$ . Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газоходов одинаково?

5. В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором  $110000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $t = 27^\circ\text{C}$ . Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если он нагревается до  $t = 427^\circ\text{C}$  при постоянном давлении.

6. Какой объем занимает  $2 \text{ кг}$  азота при температуре  $t = 70^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 0,2 \text{ МПа}$ ?

*Решение*

Из характеристического уравнения для  $1 \text{ кг}$  газа имеем

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{8314(273 + 70)}{28,016 \cdot 0,2 \cdot 10^6} = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

7. Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью  $80$  литров, если давление кислорода по манометру равно  $1,2 \text{ МПа}$ , а показание барометра  $740 \text{ мм рт ст}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

8. Баллон с кислородом емкостью  $40$  литров находится под давлением  $5 \text{ МПа}$  при температуре  $17^\circ\text{C}$ . После израсходования части кислорода давление понизилось до  $3,2 \text{ МПа}$ , а температура упала до  $7^\circ\text{C}$ . Определить массу израсходованного кислорода.

*Решение*

Из характеристического уравнения можно определить массу газа при заданных параметрах

$$M = \frac{pV}{RT}.$$

Следовательно, до расходования кислорода масса его составляла

$$M_1 = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0,04}{259,8 \cdot 290} = 2,655 \text{ кг},$$

а после расходования

$$M_2 = \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 0,04}{259,8 \cdot 280} = 1,760 \text{ кг}.$$

Таким образом, расход кислорода составляет

$$2,655 - 1,760 = 0,895 \text{ кг}.$$

9. Для автогенной сварки использован баллон кислорода емкостью 100 литров. Найти массу кислорода, если его давление  $p = 10$  МПа, а температура  $t = 12^\circ\text{C}$ .

10. Определить диаметр воздуховода для подачи 7000 кг/ч воздуха при абсолютном давлении 1,1 МПа, если температура этого воздуха  $17^\circ\text{C}$ . Скорость воздуха в газоходе 5 м/с.

11. Объемный состав газообразного топлива следующий:  $\text{CH}_4 = 85\%$ ;  $\text{CO} = 10\%$ ;  $\text{H}_2 = 5\%$ . Определить среднюю молекулярную массу и газовую постоянную смеси.

12. Объемный состав продуктов сгорания  $\text{CO}_2 = 9\%$ ;  $\text{O}_2 = 5\%$ ;  $\text{N}_2 = 84\%$ . Определить плотность и удельный объем при температуре  $t = 200^\circ\text{C}$ .

13. Генераторный газ имеет следующий объемный состав:  $\text{H}_2 = 7\%$ ;  $\text{CH}_4 = 2,0\%$ ;  $\text{CO} = 27,6\%$ ;  $\text{CO}_2 = 4,8\%$ ;  $\text{N}_2 = 58,6\%$ . Определить массовые доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при температуре  $t = 27^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 0,1$  МПа.

14. Атмосферный воздух имеет следующий массовый состав:

$$m_{\text{O}_2} = 23,2\%; \quad m_{\text{N}_2} = 76,8\% .$$

Определить объемный состав воздуха, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу.

*Решение*

Из уравнения (2,15) определяем объемный состав воздуха

$$r_{\text{O}_2} = \frac{\frac{m_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}}}{\frac{m_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} + \frac{m_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{N}_2}}} = \frac{\frac{23,2}{32}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28,02}} = 0,21 ;$$

$$r_{\text{N}_2} = \frac{\frac{m_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{N}_2}}}{\frac{m_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} + \frac{m_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{N}_2}}} = \frac{\frac{76,8}{28,02}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28,02}} = 0,79 .$$

Газовую постоянную находим по уравнению (2,20)

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n m_i R_i = m_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + m_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} = 0,232 \cdot 260 + 0,768 \cdot 295 = 287 \text{ Дж/(кг К)} .$$

Кажущуюся молекулярную массу определяем из уравнения (2.21)

$$\mu_{\text{см}} = \frac{8314}{R_{\text{см}}} = \frac{8314}{287} = 28,9 .$$

**15.** Газовая смесь имеет следующий массовый состав:  $\text{CO}_2 = 14\%$ ;  $\text{O}_2 = 6\%$ ;  $\text{N}_2 = 80\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы её плотность стала  $1,75 \text{ кг/м}^3$ ?

**16.** Плотность воздуха при нормальных условиях равна  $1,293 \text{ кг/м}^3$ . Определить удельный объем воздуха при этих условиях. Как изменится плотность и удельный объем воздуха, если температура увеличится на  $40^\circ\text{C}$ ?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой газ называют идеальным?
2. Какие известны уравнения состояния идеального газа?
3. Какой физический смысл удельной газовой постоянной?
4. В чем различие между удельной газовой постоянной и универсальной газовой постоянной?
5. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную массовыми долями?
6. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную объемными долями?
7. Что такое кажущаяся молекулярная масса? Как получить значение так называемой кажущейся молекулярной массы газовой смеси?
8. Как перевести массовые доли газовой смеси в объемные?
9. Как перевести объемные доли газовой смеси в массовые?
10. Как определяется плотность газовой смеси заданная объемными и массовыми долями?
11. Дайте определение парциального давления.
12. Какой закон устанавливает связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями её отдельных компонентов?



## 3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

### 3.1. ПОНЯТИЕ О ТЕПЛОЕМКОСТИ

**Теплоемкостью** тела называется количество теплоты, необходимое для нагрева тела на один градус.

Различают: массовую, мольную и объемную теплоемкости. **Массовой теплоемкостью**  $c_m$  называется количество тепла, необходимое для изменения температуры единицы массы вещества на  $1^\circ\text{C}$ .

**Мольной теплоемкостью**  $c_\mu$  называется теплоемкость, отнесенная к одному молю (или киломолю) вещества.

**Объемной теплоемкостью** называется теплоемкость, отнесенная к единице объема вещества (обычно  $1\text{ м}^3$ ).

Теплоемкость единицы количества вещества называют **удельной теплоемкостью**. Из приведенного определения теплоемкости следует, что

$$c = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}, \quad (3.1)$$

где  $t_1$  – начальная температура;  $t_2$  – конечная температура;  $q_{1-2}$  – теплота, подведенная к единице количества вещества в процессе нагрева от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ . Теплоемкость определяемая по выше приведенной формуле, называется **средней теплоемкостью** в интервале температур  $t_1 - t_2$ .

В зависимости от характера процесса подвода тепла, которое необходимо подвести к телу для того, чтобы повысить его температуру на  $1$  градус, количество тепла будет различным. Учитывая, что система участвует в бесчисленном множестве процессов, сопровождающихся теплообменом, величина теплоемкости для одного и того же тела может иметь различные значения. В общем случае значение теплоемкости  $c$  лежит в интервале от  $-\infty$  до  $+\infty$ , то есть она может быть любой положительной или отрицательной величиной.

Теплоемкость не является постоянной величиной, а зависит от температуры.

**Истинную теплоемкость** определяют как производную от количества тепла, подводимого к телу в процессе его нагрева, по температуре этого тела:

$$c = \frac{dq}{dt}, \quad (3.2)$$

откуда

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) определяет удельную теплоту, сообщенную телу или отведенную от него. Для определения количества теплоты  $q$  по данному выражению необходимо знать зависимость  $c = f(t)$ .

### 3.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ИСТИННОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Теплоемкость реальных газов зависит как от температуры, так и от давления, то есть  $c = f(p, t)$ . Поэтому истинные теплоемкости реальных газов удобно выражать в виде суммы двух слагаемых:

$$c = c_0 + \Delta c. \quad (3.4)$$

Первое слагаемое представляет собой теплоемкость рассматриваемого газа в условиях, когда он становится близким к идеальному ( $p \rightarrow 0$ ) или ( $v \rightarrow \infty$ ). При этом  $c_0$  зависит только от температуры. Второе слагаемое определяет зависимость теплоемкости от давления или удельного объема и связано с изменением потенциальной составляющей внутренней энергии реального газа. Для реальных газов, имеющих невысокое давление (значительно ниже критического), и имеющих высокую температуру, превышающую критическую, зависимость теплоемкости от давления оказывается пренебрежимо маленькой величиной. Для таких состояний газа  $c \approx c_0$ . В практике тепловых расчетов широкое применение получила следующая приближенная зависимость истинной теплоемкости от температуры:

$$c = a + bt + dt^2 + et^3, \quad (3.5)$$

где  $b, d, e$  – постоянные коэффициенты, которые зависят от природы рабочего тела и определяются на основании экспериментальных данных;  $a$  – экспериментальное значение истинной теплоемкости при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

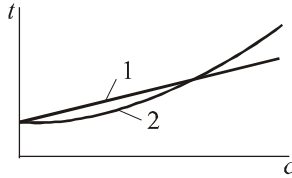
Для менее точных расчетов зависимость между истинной теплоемкостью и температурой выражают уравнением второй степени:

$$c = a + bt + dt^2. \quad (3.6)$$

Для двухатомных газов часто ограничиваются первыми двумя членами уравнения:

$$c = a + bt. \quad (3.7)$$

На рис. 3.1 показаны линейная (1) и нелинейная (2) зависимости теплоемкости от температуры, полученные по уравнениям (3.7) и (3.6).



**Рис 3.1. Зависимость теплоемкости от температуры:**

1 – по уравнению  $c = a + bt$ ; 2 – по уравнению  $c = a + bt + ct^2$

### 3.3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Зная зависимость массовой истинной теплоемкости  $c_m$  от температуры, нетрудно определить **среднюю теплоемкость** в данном интервале температур

$$c_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1}. \quad (3.8)$$

Если  $t_1 = 0$ , то средняя теплоемкость процесса определяется из выражения

$$c_m = \frac{q}{t} = \frac{1}{t} \int_0^t c dt, \quad (3.9)$$

где  $t$  – конечная температура процесса.

Если истинная теплоемкость линейно зависит от температуры, то

$$c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (a + bt) dt = a + \frac{b}{2} (t_2 + t_1) = a + bt_{cp}. \quad (3.10)$$

Если зависимость теплоемкости от температуры нелинейная, то

$$c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (a + bt + dt^2) dt = a + bT_{cp} + \frac{1}{3} d(t_2^2 + t_1 t_2 + t_1^2), \quad (3.11)$$

где  $t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2)$ ;  $T_{cp} = 273,15 + t_{cp}$ .

В интервале температур от 0 до  $t$  уравнения приобретают вид

$$c_m = a + \frac{bt}{2}; \quad (3.12)$$

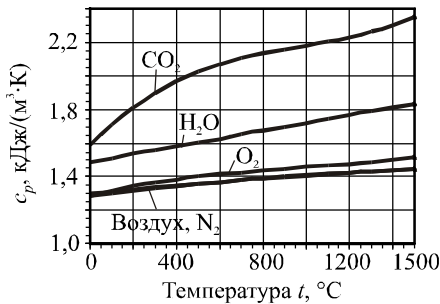
$$c_m = a + \frac{b}{2}t + \frac{d}{3}(t_2^2 + t_2) \quad (3.13)$$

Средняя теплоемкость в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  определяется соотношением

$$c_m = \frac{c_{m_2}t_2 - c_{m_1}t_1}{t_2 - t_1}. \quad (3.14)$$

### 3.4. ИЗОБАРНАЯ И ИЗОХОРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Наиболее часто на практике используются теплоемкости изобарного ( $p = \text{const}$ ) и изохорного ( $V = \text{const}$ ) процессов; эти теплоемкости называются **изобарной** и **изохорной теплоемкостями**. Они обозначаются соответственно  $c_p$  и  $c_v$ . Массовые и объемные теплоемкости некоторых газов приведены в табл. 3.1 и на рис. 3.2.



**Рис. 3.2. Средняя на интервале  $0...t$  объемная теплоемкость некоторых газов**

Между теплоемкостями  $c_p$  и  $c_v$  существует зависимость

$$c_p - c_v = \left[ p + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \right] \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p. \quad (3.15)$$

Таблица 3.1.

Теплоемкость газов при постоянном давлении  $c_p, c'_p$   
и постоянном объеме  $c_v, c'_v$

Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)								
$t, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2$		$\text{N}_2$		$\text{CO}_2$		Воздух	
	$c_p$	$c_v$	$c_p$	$c_v$	$c_p$	$c_v$	$c_p$	$c_v$
0	0,9148	0,6548	1,0392	0,7423	0,8148	0,6259	1,0036	0,7164
100	0,9232	0,6632	1,0404	0,7427	0,8658	0,6770	1,0061	0,7193
200	0,9353	0,6753	1,0434	0,7465	0,9102	0,7214	1,0115	0,7243
300	0,9500	0,6900	1,0488	0,7519	0,9487	0,7599	1,0191	0,7319
400	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599	0,9826	0,7938	1,0283	0,7415
500	0,9793	0,7193	1,0660	0,7691	1,0128	0,8240	1,0387	0,7519
600	0,9927	0,7327	1,0760	0,7792	1,0396	0,8508	1,0496	0,7624
700	1,0048	0,7448	1,0869	0,7900	1,0639	0,8746	1,0605	0,7733
800	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005	1,0852	0,8964	1,0710	0,7842
900	1,0258	0,7658	1,1078	0,8110	1,1045	0,9157	1,0815	0,7942
1000	1,0350	0,7750	1,1179	0,8210	1,1225	0,9332	1,0907	0,8039
1100	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302	1,1384	0,9496	1,0999	0,8127
1200	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395	1,1530	0,9638	1,1082	0,8215
1300	1,0580	0,7984	1,1447	0,8478	1,1660	0,9772	1,1166	0,8294
1400	1,0647	0,8051	1,1526	0,8558	1,1782	0,9893	1,1242	0,8369
1500	1,0714	0,8114	1,1602	0,8633	1,1895	1,0006	1,1313	0,8441
Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)								
$t, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2$		$\text{N}_2$		$\text{CO}_2$		Воздух	
	$c'_p$	$c'_v$	$c'_p$	$c'_v$	$c'_p$	$c'_v$	$c'_p$	$c'_v$
0	1,3059	0,9349	1,2987	0,9278	1,5998	1,2288	1,2971	0,9261
100	1,3176	0,9466	1,3004	0,9295	1,7003	1,3293	1,3004	0,9295
200	1,3352	0,9642	1,3038	0,9328	1,7373	1,4164	1,3071	0,9362
300	1,3561	0,9852	1,3109	0,9399	1,8627	1,4918	1,3172	0,9462
400	1,3775	1,0065	1,3205	0,9496	1,9297	1,5587	1,3289	0,9579
500	1,3980	1,0270	1,3322	0,9613	1,9887	1,6178	1,3427	0,9718
600	1,4168	1,0459	1,3452	0,9743	2,0411	1,6701	1,3565	0,9856
700	1,4344	1,0634	1,3586	0,9877	2,0884	1,7174	1,3708	0,9998
800	1,4499	1,0789	1,3716	1,0006	2,1311	1,7601	1,3842	1,0312
900	1,4645	1,0936	1,3845	1,0136	2,1692	1,7982	1,3976	1,0262
1000	1,4775	1,1066	1,3971	1,0178	2,2035	1,8326	1,4097	1,0387
1100	1,4892	1,1183	1,4089	1,0379	2,2349	1,8640	1,4214	1,0505
1200	1,5005	1,1296	1,4202	1,0492	2,2638	1,8929	1,4327	1,0618
1300	1,5106	1,1396	1,4306	1,0597	2,2898	1,9188	1,4432	1,0722
1400	1,5202	1,1493	1,4407	1,0697	2,3136	1,9427	1,4528	1,0819
1500	1,5294	1,1585	1,4499	1,0789	2,3354	1,9644	1,4620	1,0911

Для идеального газа

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}. \quad (3.16)$$

Подставляя эти значения в уравнение (3.15), получаем

$$c_p - c_v = R. \quad (3.17)$$

Уравнение (3.17) называется **уравнением Майера**.

Для реальных газов теплоемкость зависит от давления и температуры, поэтому

$$c_p - c_v > R. \quad (3.18)$$

## ЗАДАЧИ

**1.** Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах  $200 - 800^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

*Решение*

По уравнению (3.14)

$$(c_{pm})_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь таблицей (3.1), получим для воздуха

$$(c_{pm})_0^{800} = 1,0710 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$(c_{pm})_0^{200} = 1,0115 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)},$$

отсюда средняя теплоемкость  $c_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах  $200 - 800^\circ\text{C}$

$$c_{pm} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

**2.** Вычислить среднюю массовую теплоемкость  $c_{pm}$  для кислорода при постоянном давлении в пределах температур от  $350$  до  $1000^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры: а) нелинейной; б) линейной.

*Решение*

а) По уравнению (3.14)

$$(c_{pm})_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь таблицей (3.1), получим для кислорода

$$(c_{pm})_0^{350} = 0,9576 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); (c_{pm})_0^{1000} = 1,0350 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

отсюда

$$c_{pm} = \frac{1,035 \cdot 1000 - 0,9576 \cdot 350}{1000 - 350} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

б) Пользуясь таблицей (3.1) и уравнением (3.12) найдем

$$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724(350 + 1000) = 1,085 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

**3.** Газовая смесь имеет следующий состав по объему:  $\text{CO}_2=9\%$ ,  $\text{O}_2=5\%$ ,  $\text{N}_2=84\%$ . Определить для данной смеси среднюю массовую теплоемкость  $c_{pm}$  в интервале температур от  $t_1 = 200^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 400^\circ\text{C}$ .

**4.** В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от  $100^\circ\text{C}$  до  $600^\circ\text{C}$ . Найти количество теплоты, сообщенной воздуху в единицу времени, если расход его составляет  $720 \text{ кг/ч}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

**5.** Для использования теплоты газов, уходящих из паровых котлов, в газоходах последних устанавливают воздухоподогреватели. Воздух нагревается в воздухоподогревателе от  $25$  до  $200^\circ\text{C}$ , а продукты сгорания при этом охлаждаются от  $300$  до  $150^\circ\text{C}$ . Объемный состав продуктов сгорания :  $\text{CO}_2=9\%$ ,  $\text{O}_2=5\%$ ,  $\text{N}_2=76\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}=10\%$ . Принять, что вся теплота, отдаваемая газами, воспринимается воздухом и процесс теплопередачи происходит при постоянном давлении. Определить расход воздуха, если известно, что расход газов при нормальных условиях –  $70000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**6.** Воздух охлаждается от  $1000$  до  $100^\circ\text{C}$  в процессе с постоянным давлением. Какое количество теплоты теряет  $1 \text{ кг}$  воздуха? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое теплоемкость? Какие существуют теплоемкости?
2. В чем разница между средней и истинной теплоемкостями?
3. В чем физический смысл уравнения Майера?
4. Какая размерность объемной и массовой теплоемкости?
5. Как определяется средняя теплоемкость от  $t_1$  до  $t_2$ ?

## 4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

### 4.1. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Закон сохранения и превращения энергии – фундаментальный закон природы, носящий всеобщий характер. Он утверждает: энергия не исчезает и не возникает вновь, а лишь переходит из одного вида в другой в различных физических и химических процессах. Это означает, что для любой изолированной термодинамической системы, которая не обменивается с окружающей средой ни теплотой, ни работой, ни веществом, количество энергии, заключенное в ней, сохраняется постоянным.

Закон сохранения энергии был давно известен в механике применительно к механической энергии. После того как работами Джоуля и других ученых был установлен принцип эквивалентности теплоты и работы, закон сохранения был распространен и на другие виды энергии и в соответствии с его содержанием стал называться законом **сохранения и превращения** энергии.

В настоящее время известны различные виды энергии: энергия теплового движения микрочастиц, составляющих тело; кинетическая энергия всего тела в целом; энергия гравитационного поля; энергия электрического поля; энергия магнитного поля; энергия электромагнитного излучения; внутриядерная энергия и др. Закон сохранения и превращения энергии устанавливает однозначную связь между всеми видами энергии в процессе их взаимопревращений.

Закон сохранения и превращения энергии носит также название **первого закона термодинамики**.

### 4.2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ

Любая термодинамическая система имеет определенный запас энергии. В общем случае полный запас энергии системы можно представить в виде суммы

$$E = E_k + E_n + U_0, \quad (4.1)$$

где  $E_k$  – кинетическая энергия движения системы;  $E_n$  – потенциальная энергия рабочего тела системы;  $U_0$  – внутренняя энергия. Величины  $E_k$  и  $E_n$  определяются по законам механики. Например, для потока жидкости плотностью  $\rho$ , находящегося на высоте  $h$  и движущегося со скоростью  $w$ , кинетическая и потенциальная энергии имеют вид:

$$E_k = \frac{w^2}{2}\rho; \quad E_n = \rho gh.$$



В термодинамике рассматриваются системы, для которых отсутствует внешнее поле сил ( $E_{\text{п}} = 0$ ), и имеющих настолько медленное движение, что внешней кинетической энергией можно пренебречь ( $E_{\text{к}} = 0$ ). В этом случае полная энергия системы  $E = U$ .

Внутренняя энергия системы есть сумма всех видов энергии движения и взаимодействия частиц, составляющих систему:

$$U = U_{\text{к}} + U_{\text{п}} + U_0, \quad (4.2)$$

где  $U_{\text{к}}$  – внутренняя кинетическая энергия теплового движения молекул;  $U_{\text{п}}$  – внутренняя потенциальная энергия взаимодействия молекул;  $U_0$  – нулевая энергия (внутренняя энергия при температуре абсолютного нуля).

В термодинамике рассматриваются не абсолютные значения внутренней энергии, а ее относительные изменения, происходящие в различных процессах. Учитывая это,  $U_0$  можно рассматривать как нулевой уровень, и условно считать  $U_0 = 0$ .

В общем случае внутренняя энергия зависит от температуры и объема, то есть

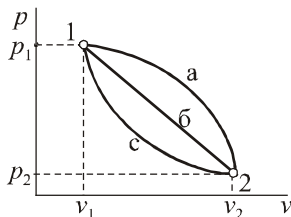
$$U = f(V, T). \quad (4.3)$$

В идеальном газе силы взаимодействия между молекулами отсутствуют и потенциальная энергия равна нулю. Поэтому внутренняя энергия идеального газа состоит только из кинетической энергии движения молекул и определяется температурой –  $U = f(T)$ .

Изменение внутренней энергии термодинамической системы не зависит от характера процесса (рис 4.1) и полностью определяется ее начальным и конечным состояниями:

$$U_2 - U_1 = f_2(p_2, v_2, T_2) - f_1(p_1, v_1, T_1),$$

то есть во всех термодинамических процессах 1–а–2, 1–б–2, 1–с–2, представленных на рис. 4.1, изменение внутренней энергии будет одно и то же.



**Рис. 4.1** Различные изменения состояния газа в процессе 1-2

Для кругового процесса, в котором начальное и конечное состояния совпадают, изменение внутренней энергии равно нулю:

$$\oint du = 0. \quad (4.4)$$

Из математического анализа известно, что если значение криволинейного интеграла не зависит от пути интегрирования, а определяется лишь начальной и конечной точками интегрирования, то подынтегральное выражение представляет собой полный дифференциал некоторой функции, то есть внутренняя энергия является функцией состояния термодинамической системы.

Для термодинамической системы, состояние которой определяется двумя независимыми параметрами  $p, v$ ;  $p, T$  или  $T, v$  выражения для  $du$  имеют вид

$$du(p, v) = \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_v dp + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_p dv; \quad (4.5)$$

$$du(p, T) = \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p dT; \quad (4.6)$$

$$du(T, v) = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv. \quad (4.7)$$

### 4.3. РАБОТА И ТЕПЛОТА – ФОРМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Передача энергии между термодинамическими системами осуществляется двумя способами.

Первый способ заключается в передаче энергии в форме работы. Для осуществления этого способа рабочее тело должно обязательно либо изменить свой объем, либо переместиться в пространстве под воздействием внешних силовых факторов. Наиболее общим видом работы является механическая работа.

При втором способе энергия передается в форме теплоты. Сам процесс передачи энергии называется теплообменом. Теплота может передаваться от одного (более нагретого) тела к другому (менее нагретому) телу, либо непосредственным контактом между телами (теплопроводностью, конвекцией), либо на расстоянии (лучистым переносом энергии). Количество тепловой энергии, которое передается от одного тела к другому, называется **количеством теплоты** или просто **теплотой**.

Работа  $L$  и теплота  $Q$  имеют размерность энергии. Однако они не являются ни энергией, ни одним из ее видов. Работа и теплота – это лишь различные формы передачи энергии от одного тела к другому. Работа  $L$  и теплота  $Q$  отличаются от нуля только в протекающем термодинамическом процессе. Если процесса нет, то работа  $L$  и теплота  $Q$  равны нулю. Поэтому нельзя говорить о запасе работы и теплоты в рабочем теле, а можно утверждать, что ему сообщена или от него отведена определенная теплота или определенная работа. Различие между теплотой и работой состоит в том, что они являются двумя принципиально различными способами передачи энергии от одного тела к другому. В общем случае оба эти способа передачи энергии могут реализоваться одновременно.

В 1842 г. немецкий ученый Р. Майер показал эквивалентность теплоты и механической работы и приближенно определил численное значение механического эквивалента теплоты. Он показал, что между количеством теплоты  $Q$  и количеством механической работы  $L$  существует не зависящее от характера процесса превращения соотношение:  $Q = AL$ , где  $A$  – тепловой эквивалент механической работы.

В 1843 г. английский ученый Д. Джоуль провел опыты, экспериментально подтверждающие эквивалентность теплоты и механической работы, и нашел точное значение эквивалента. Если теплота измеряется в ккал, а работа в кГ·м, то тепловой эквивалент механической работы  $A = 1/427$  ккал/кГ·м. Если работа и теплота измеряются в одинаковых единицах, то эквивалент равен единице.

Элементарное количество теплоты  $dQ$ , подведенное к термодинамической системе при изменении ее температуры на  $dT$ , определяется из выражения

$$dQ = mc dT, \quad (4.8)$$

где  $m$  – масса рабочего тела;  $c$  – теплоемкость рабочего тела.

Полная теплота процесса определяется интегрированием уравнения

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c dT. \quad (4.9)$$

Отнеся теплоту к единице массы рабочего тела, получим

$$dq = \frac{dQ}{m} = c dT. \quad (4.10)$$

При этом необходимо знать функциональную зависимость  $c = f(T)$ . Теплота, подведенная к системе, считается положительной, а отведенная – отрицательной.

#### 4.4. РАБОТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЪЕМА РАБОЧЕГО ТЕЛА

Из различных форм передачи энергии (тепловой, электрической, магнитной, химической, механической и др.) наибольшее значение в технической термодинамике имеет работа, связанная с изменением объема рабочего тела.

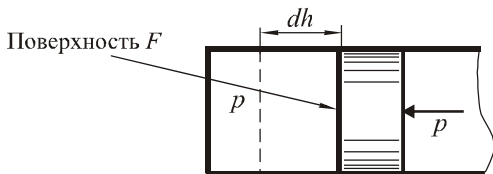
В общем случае элементарная работа равна произведению силы на бесконечно малое перемещение точки по направлению этой силы

$$dL = Fdx, \quad (4.11)$$

где  $F$  – обобщенная сила,  $x$  – обобщенная координата.

В зависимости от характера процесса выражения для  $dL$  различны.

Рассмотрим работу системы, совершаемую при изменении объема рабочего тела (схема приведена на рис.4.2).



**Рис. 4.2 К определению работы совершаемой газом под поршнем**

Работа, совершаемая газом под поршнем, при перемещении поршня на расстояние  $dh$ , составляет

$$dL = pFdh. \quad (4.12)$$

Произведение  $Fdh = dV$  – элементарное уменьшение объема газа. Произведенная над газом работа при перемещении поршня

$$dL = pdV. \quad (4.13)$$

Работу газа при конечном изменении объема можно получить, если проинтегрировать уравнение (4.13):

$$L = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \quad (4.14)$$

В формуле (4.14) давление  $p$  и объем  $V$  величины переменные, поэтому интегрирование, а следовательно, и определение работы  $L$  возможны только тогда, когда известна функциональная зависимость между давлением и объемом. Работа  $L$ , направленная против сил внешнего

давления и связанная с увеличением объема системы, называется **работой расширения**. Работа расширения совершается над окружающей средой. При расширении работа системы положительна, то есть система сама совершает работу. При сжатии работа системы отрицательна, так как на ее сжатие затрачивается энергия извне. Величину работы расширения системы, определяемую уравнением (4.14), удобно подсчитывать с помощью  $p, v$  - диаграммы. Рассмотрим изображение в этой диаграмме процесса изменения объема системы (рис. 4.3).

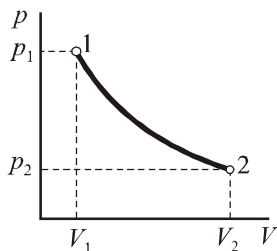


Рис. 4.3.  $p, V$  - диаграмма термодинамического процесса

Объем системы изменяется от  $V_1$  до  $V_2$ . Состояния, которые проходит система в процессе изменения объема, располагаются на кривой процесса между точками 1 и 2. Величина работы расширения системы равна площади под кривой процесса 1-2 (площадь 1-2- $V_2$ - $V_1$ -1).

Важно подчеркнуть, что величина работы расширения системы от состояния  $V_1$  до состояния с объемом  $V_2$  зависит не только от параметров этих состояний, но и от того, по какому пути осуществляется процесс расширения.

## 4.5. РАСПОЛАГАЕМАЯ РАБОТА

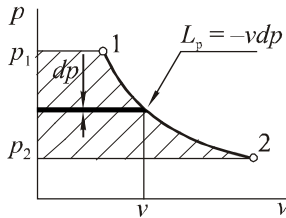
Работа, совершаемая потоком движущегося газа за счет изменения кинетической энергии газа, называется **располагаемой работой**. Эта работа обозначается  $L_p$  (Дж) и  $l_p$  (Дж/кг). Элементарная располагаемая работа равна

$$dl_p = -vdp \quad (4.15)$$

Для термодинамического процесса 1-2 располагаемая работа 1 кг рабочего тела равна

$$l_{p1-2} = - \int_{p_1}^{p_2} vdp = \int_{p_2}^{p_1} vdp. \quad (4.16)$$

Располагаемая работа изображается в  $p, v$  - диаграмме площадью, ограниченной линией процесса, осью ординат и крайними абсциссами процесса (рис. 4.4).



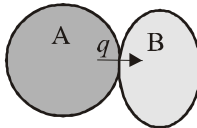
**Рис. 4.4. К определению располагаемой работы**

Знак располагаемой работы зависит от знака  $dp$ . В процессе расширения (например 1–2 на рис. 4.4)  $dp < 0$  и  $l_p > 0$ , а в процессе сжатия (например 2–1 на рис. 4.4)  $dp > 0$  и  $l_p < 0$ . Располагаемая работа, так же как и работа изменения объема, является характеристикой процесса, то есть зависит от характера процесса.

#### 4.6. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики является математическим выражением количественной стороны закона сохранения и превращения энергии в применении к термодинамическим системам.

Рассмотрим две системы: А и В (рис. 4.4). Предположим, что система А взаимодействует с системой В только в тепловом отношении. Пусть температура системы А выше температуры системы В ( $T_A > T_B$ ), тогда разность температур  $T_A - T_B$  приведет к передаче теплоты от системы А к системе В.



**Рис. 4.4. К выводу первого закона термодинамики**

Подводимая к системе В теплота  $\Delta Q$  расходуется на изменение внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение всех видов работы, то есть

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta L. \quad (4.17)$$

Если затрачивается бесконечно малое количество теплоты, при этом совершается бесконечно малая работа и будет бесконечно малым изменение внутренней энергии, то уравнение можно записать в виде

$$dQ = dU + dL. \quad (4.18)$$

Для одного килограмма рабочего тела уравнение записывается в виде

$$dq = du + dl \quad (4.19)$$

или

$$dq = du + p dv, \quad (4.20)$$

если единственным видом работы является работа расширения.

Уравнения (4.18)–(4.20) являются математическим выражением первого закона термодинамики.

Для кругового процесса выражение первого закона термодинамики в интегральной форме запишется как

$$\oint dQ = \oint dU + \oint dL. \quad (4.21)$$

В круговом процессе изменение внутренней энергии равно нулю, то есть

$$\oint dU = 0. \quad (4.22)$$

Следовательно, все количество теплоты, подведенное к термодинамической системе или отведенное от нее в таком процессе, полностью расходуется на совершение системой внешней работы

$$\oint dQ = \oint dL, \quad (4.23)$$

то есть в круговом термодинамическом процессе теплота и работа взаимопревращаются в эквивалентных количествах. Если бы оказалось, что

$$\oint dQ < \oint dL, \quad (4.24)$$

то можно было бы осуществить вечный двигатель первого рода – двигатель, который совершал бы работу без затраты энергии.

Таким образом, первый закон термодинамики, указывая на эквивалентность между теплотой и работой, свидетельствует о невозможности создания такой машины, которая производила бы работу, не затрачивая ни какой энергии.

Из первого закона термодинамики вытекает несколько важных формулировок.

1. Энергия не возникает и не уничтожается.
2. Вечный двигатель первого рода невозможен (то есть нельзя создать машину, производящую больше энергии, чем потребляющую).
3. Энергия изолированной системы – величина постоянная.
4. Все виды энергии могут взаимно превращаться в строго равных между собой количествах.
5. Теплота и механическая работа – формы передачи энергии от одних тел к другим, то есть относятся к процессам.

## 4.7. ЭНТАЛЬПИЯ

Если в уравнении первого закона термодинамики представленного в виде

$$dU = dQ - pdV \quad (4.25)$$

к правой части прибавить и отнять произведение  $Vdp$ , то ему можно придать следующий вид:

$$d(U + pV) = dQ + Vdp. \quad (4.26)$$

В полученном соотношении содержится сумма

$$I = U + pV, \quad (4.27)$$

которая была введена в практику тепловых расчетов Дж. У. Гиббсом. По предложению нидерландского физика и химика, нобелевского лауреата Х. Камерлинг-Оннеса ее назвали **энтальпией**. **Удельной энтальпией** называют величину, равную отношению энтальпии тела к его массе:

$$i = \frac{I}{m} = u + pv. \quad (4.28)$$

Единицей энтальпии в СИ является джоуль (Дж), единицей удельной энтальпии – Дж/кг. Иногда в технических расчетах применяют единицу теплоты системы МКГСС – калория:

$$1 \text{ кал} = 4,186 \text{ Дж}.$$

Во многих книгах энтальпия обозначается символом  $H$ , а удельная энтальпия – символом  $h$ .

Для идеального газа

$$i = u + pv = u + RT. \quad (4.29)$$

Из этого уравнения видно, что поскольку внутренняя энергия идеального газа является функцией одной температуры, то и его энтальпия



также зависит только от его температуры. Так как входящие в сумму параметры  $u, p, v$  являются параметрами (функциями) состояния, то и сама энтальпия  $i$ , будет также параметром (функцией) состояния системы. Следовательно,  $di$  есть полный дифференциал. Полные дифференциалы энтальпии имеют вид

$$di = \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_v dp + \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p dv; \quad (4.30)$$

$$di = \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_T dv + \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_v dT; \quad (4.31)$$

$$di = \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT. \quad (4.32)$$

Уравнение (4.26) с учетом выражения (4.27) может быть записано в виде:

$$dq = di - vdp. \quad (4.33)$$

С учетом выражения (3.2) можно записать

$$di = c_p dT + \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp. \quad (4.34)$$

Если давление не меняется, то

$$dq_p = di, \quad (4.35)$$

и теплота, подводимая к системе в изобарном процессе расходуется только на изменение энтальпии системы, то есть

$$di = c_p dT. \quad (4.36)$$

Выражение (4.32) является одним из производных из закона Джоуля, устанавливающего, что внутренняя энергия идеального газа не зависит от давления, а только от температуры.

Энтальпия  $i$  является аддитивной величиной, то есть энтальпия сложной системы равна сумме энтальпий ее независимых частей

$$i = \sum_{k=1}^n i_k. \quad (4.37)$$

В термодинамике внутренняя энергия, энтальпия, теплоемкость называются калорическими свойствами вещества, а удельный объем, давление, температура – термическими свойствами.

Начало отсчета энтальпии связано с началом отсчета внутренней энергии, в которой  $U = 0$ . В этой точке  $i = pv$ . Для идеального газа энтальпию принимают равной нулю при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

## ЗАДАЧИ

1. Найти часовый расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 100 МВт, если теплота сгорания топлива  $Q_n = 34 \text{ МДж/м}^3$  и известно, что на превращение тепловой энергии в механическую используется только 35% теплоты сожженного топлива.

2. Мощность турбогенератора 25 МВт, к. п. д. генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать  $50^\circ\text{C}$ ? Температура в машинном отделении равна  $20^\circ\text{C}$ ; среднюю температуру воздуха  $c_p$  принять равной  $1,0 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

3. Сосуд, содержащий 6 литров воды при температуре  $12^\circ\text{C}$ , имеет электронагреватель мощностью 1 кВт. Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагрелась до температуры кипения  $100^\circ\text{C}$ . Потерями теплоты сосуда в окружающую среду пренебречь.

4. В котельной электростанции за 24 ч работы сожжено 288 т каменного угля с теплотой сгорания  $Q_n = 7000 \text{ ккал/кг}$ . Найти количество выработанной электроэнергии и среднюю мощность станции за указанный период работы, если к. п. д. процесса преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 25%.

5. Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при охлаждении его от температуры  $300^\circ\text{C}$  до температуры  $100^\circ\text{C}$ .

6. Определить изменение внутренней энергии  $5 \text{ м}^3$  воздуха при нормальном давлении, если температура его понижается от  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Учесть зависимость теплоемкости от температуры.

7. В калориметр, содержащий 1,2 кг воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ , опустили стальной образец массой 0,8 кг, нагретый до  $200^\circ\text{C}$ . Найти теплоемкость стали, если температура воды повысилась на  $12,5^\circ\text{C}$ . Массой калориметра пренебречь.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое внутренняя энергия?
2. Как зависит изменение внутренней энергии термодинамического процесса от характера процесса?
3. Чему равно изменение внутренней энергии для кругового процесса?
4. Работа и теплота являются энергией или одним из ее видов?
5. Что такое тепловой эквивалент механической работы?
6. В каком случае теплота считается положительной, а в каком - отрицательной?
7. Что называется работой расширения?
8. Зависит ли работа расширения от пути осуществления процесса?
9. Что называется располагаемой работой и как она определяется на  $p, v$  - диаграмме?
10. Является ли располагаемая работа характеристикой процесса и что это означает?
11. Что называется энтальпией рабочего тела?
12. При каких условиях энтальпию идеального газа принимают равной нулю?
13. От каких параметров зависит энтальпия идеального газа?
14. От каких параметров зависит изменение внутренней энергии идеального газа?
15. Как перевести 1 кал в Дж и наоборот.

## 5. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

### 5.1. ПРОЦЕСС ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ (ИЗОХОРНЫЙ)

При изохорном процессе выполняется условие постоянного объема  $dv = 0$  или  $v = \text{const}$ . Уравнение изохорного процесса следует из термического уравнения состояния идеальных газов (2.5) при  $v = \text{const}$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{v} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.1)$$

Из этого уравнения видно, что в процессе при  $v = \text{const}$  давление газа пропорционально абсолютной температуре. При подводе теплоты давление увеличивается, при отводе – уменьшается.

В  $p, v$ -диаграмме (рис. 5.1) изохора 1–2 – это вертикальная прямая, параллельная оси  $p$ . В процессе 1–2 теплота подводится к газу, давление повышается, а следовательно, увеличивается температура. В обратном процессе 2–1 теплота от газа отводится, в результате чего уменьшается внутренняя энергия газа и понижается его температура. Таким образом в процессе 1–2 происходит нагревание газа, а в процессе 2–1 – его охлаждение.

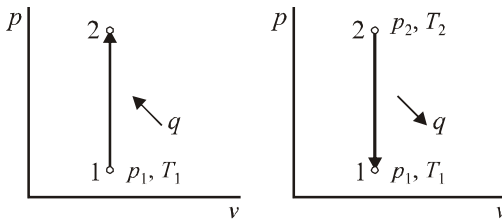


Рис. 5.1. Изохорный процесс идеального газа

В изохорном процессе, при  $c_v = \text{const}$ , изменение внутренней энергии газа  $u$  определяется по формуле

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1). \quad (5.2)$$

Проинтегрировав выражение  $q_v = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$ , получим

$$q_v = c_v (T_2 - T_1). \quad (5.3)$$

Так как в процессах при  $v = \text{const}$  газ не совершает работы ( $dl = 0$ ), то уравнение первого закона термодинамики для изохорного процесса примет вид:

$$dq_v = du = c_v dT. \quad (5.4)$$

Из уравнения (5.4) видно, что в процессе при  $v = \text{const}$  вся теплота, подводимая к рабочему телу, расходуется на увеличение внутренней энергии, то есть на повышение температуры газа. При охлаждении газа его внутренняя энергия уменьшается на величину отводимой теплоты.

Располагаемая удельная работа изохорного процесса

$$l_0 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = -v \int_{p_1}^{p_2} dp = v(p_1 - p_2). \quad (5.5)$$

Доля теплоты, расходуемая на изменение внутренней энергии, равна

$$\phi = \frac{\Delta u}{q_v} = 1, \quad (5.6)$$

а доля теплоты, расходуемая на совершение работы

$$\psi = \frac{l}{q} = 0. \quad (5.7)$$

## 5.2. ПРОЦЕСС ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ (ИЗОБАРНЫЙ)

При изобарном процессе выполняется условие  $p = \text{const}$ ,  $dp = 0$ .

Уравнение изобарного процесса можно получить из уравнения состояния идеального газа (2.5) при  $p = \text{const}$ . В этом случае

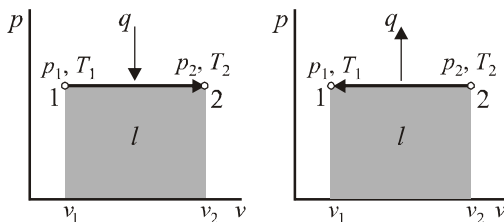
$$\frac{v}{T} = \frac{R}{p} = \text{const}$$

или

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.8)$$

Из уравнения видно, что в процессе при  $p = \text{const}$  объем газа пропорционален его температуре, то есть при расширении газа при  $p = \text{const}$  температура газа, а следовательно, и его внутренняя энергия увеличиваются, а при сжатии – уменьшаются.

На рис. 5.2. приведена изобара в  $p, v$ -диаграмме, в которой процессы при  $p = \text{const}$  изображаются прямыми, параллельными оси  $v$ .



**Рис. 5.2. Изобарный процесс идеального газа**

Площадь прямоугольника  $v_1-1-2-v_2$  определяет величину работы газа  $l$ . Работа газа в изобарном процессе определяется интегрированием

выражения  $l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$  при  $p = \text{const}$ . Тогда получим

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p \int_{v_1}^{v_2} dv = p(v_2 - v_1). \quad (5.9)$$

Поскольку  $p v_1 = R T_1$  и  $p v_2 = R T_2$  то, подставив эти выражения в уравнение (5.9), получим

$$l = R(T_2 - T_1), \quad (5.10)$$

то есть работа газа в изобарном процессе положительная только в том случае, если температура газа увеличивается.

В процессе 1–2 к газу подводится теплота, так как удельный объем увеличивается, а следовательно, увеличивается температура. В обратном процессе 2–1 теплота от газа отводится, в результате уменьшается внутренняя энергия и понижается его температура, то есть процесс 1–2 – нагревание газа; а процесс 2–1 – его охлаждение.

Располагаемая работа в изобарном процессе равна нулю.

Изменение внутренней энергии определяется по формуле

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v (T_2 - T_1). \quad (5.11)$$

Количество теплоты, сообщенное газу при нагревании (или отдаваемое при охлаждении), может быть вычислено по формуле при условии, что  $c_p = \text{const}$ :

$$q = \int_1^2 c_p dT = c_p (T_2 - T_1) = i_2 - i_1. \quad (5.12)$$

Из выражения видно, что теплота, подведенная к рабочему телу в изобарном процессе, идет на увеличение его энтальпии, то есть в изобарном процессе  $dq_p$  является полным дифференциалом.

Уравнение первого закона термодинамики при изобарном процессе имеет вид

$$dq = du + pdv \quad \text{или} \quad dq = c_v dT + pdv. \quad (5.13)$$

Доля теплоты, расходуемая на изменение внутренней энергии в процессе при  $p = \text{const}$ ,

$$\phi = \frac{\Delta u}{q} = \frac{c_v(T_2 - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} = \frac{1}{k}. \quad (5.14)$$

Доля теплоты, расходуемая на выполнение работы в процессе при  $p = \text{const}$

$$\psi = \frac{l}{q} = 1 - \phi = 1 - \frac{1}{k}. \quad (5.15)$$

### 5.3. ПРОЦЕСС ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ (ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ)

Из уравнения состояния идеального газа (2.5) при  $T = \text{const}$  получим

$$pv = RT = \text{const} \quad (5.16)$$

или

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5.17)$$

Следовательно, в процессе при постоянной температуре давление газа обратно пропорционально объему, так что при изотермическом расширении давление газа падает, а при сжатии – возрастает.

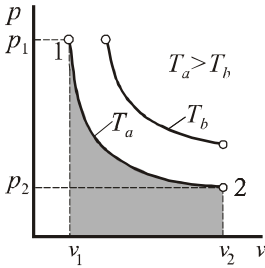
На рис. 5.3 приведен изотермический процесс в  $p, v$  - диаграмме, который представляет собой равностороннюю гиперболу. Чем выше температура  $T$ , тем выше в  $p, v$  - диаграмме располагается изотерма.

При  $T = \text{const}$  изменение  $dT = 0$ , и, следовательно, изменение внутренней энергии и энтальпии равно нулю:

$$du = c_v dT = 0, \quad (5.18)$$

$$di = c_p dT = 0, \quad (5.19)$$

тогда  $u = \text{const}$  и  $i = \text{const}$ .



**Рис. 5.3. Изотермы идеального газа**

Таким образом, изотермический процесс идеального газа одновременно является процессом при постоянной внутренней энергии  $u = \text{const}$  и при постоянной энтальпии  $i = \text{const}$ .

Уравнение первого закона термодинамики для изотермического процесса при  $T = \text{const}$  имеет вид  $dq_T = dl$ . Из этого выражения видно, что вся сообщаемая газу теплота в изотермическом процессе расходуется на работу расширения.

В обратном процессе – процессе сжатия от газа отводится теплота, равная внешней работе сжатия, что обеспечивает постоянство температуры газа в процессе.

Удельная работа в изотермическом процессе

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT}{v} = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Теплота, сообщаемая газу в процессе 1-2,

$$\begin{aligned} q_{1-2} = l &= \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT}{v} = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \\ &= p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \end{aligned}$$

На рис. 5.3 площадь  $v_1-1-2-v_2$  под кривой 1-2 дает в данном случае как величину работы газа  $l$ , так и величину сообщаемой газу теплоты  $q$ .

В изотермическом процессе для идеального газа располагаемая работа  $l_0$  равна работе процесса  $l$ .

Для изотермического процесса, у которого подвод (или отвод) тепла к системе не приводит к изменению температуры системы, теплоемкость является бесконечно большой величиной

$$c_t = \pm \infty, \quad (5.20)$$

где знак плюс соответствует подводу тепла к системе, знак минус – отводу тепла от системы. Следовательно, определить количество теплоты, подведенное к рабочему телу при изотермическом процессе, с помощью удельной теплоемкости невозможно.



## 5.4. ПРОЦЕСС БЕЗ ТЕПЛООБМЕНА С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ (АДИАБАТНЫЙ)

При адиабатном процессе рабочее тело предполагается изолированным от окружающей среды идеальной тепловой изоляцией. Обмен энергией между рабочим телом и окружающей средой происходит в форме работы, а обмена энергии в форме теплоты нет. Уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса имеет вид

$$dq = -dl . \quad (5.21)$$

Из этого уравнения видно, что работа адиабатного процесса расширения совершается вследствие уменьшения внутренней энергии газа и, следовательно, температура газа уменьшается.

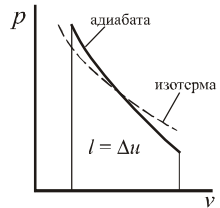
Работа адиабатного сжатия полностью идет на увеличение внутренней энергии газа, то есть на повышение его температуры. На рис. 5.4 площадь под адиабатой дает в данном случае как величину работы газа  $l$ , так и величину изменения внутренней энергии газа  $l = \Delta u = u_1 - u_2$ .

Из первого закона термодинамики при  $dq = 0$  имеем

$$c_v dT + p dv = 0 . \quad (5.22)$$

Подставив в это уравнение  $c_v = R/(k-1)$ , получим

$$RdT + (k-1)p dv = 0 . \quad (5.23)$$



**Рис. 5.4. Адиабата идеального газа**

Дифференцируя характеристическое уравнение при переменных  $p, v, T$ , имеем

$$RdT = p dv + v dp \quad (5.24)$$

Из последних двух уравнений находим  $k p dv + v dp = 0$ , или

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0 . \quad (5.25)$$

Интегрируя уравнение (5.25) при  $k = \text{const}$  получим:

$$\ln p + k \ln v = \text{const} , \quad (5.26)$$

откуда

$$p v^k = \text{const} . \quad (5.27)$$

Уравнение является уравнением адиабаты при  $k = c_p / c_v = \text{const}$ . Последнее называется также **уравнением адиабаты Пуассона**.

Показатель  $k$  (показатель адиабаты) является функцией температуры и незначительно уменьшается с ее увеличением. Принимая теплоемкость постоянной величиной, можно получить: для одноатомных газов  $k = 1,67$ ; для двухатомных  $k = 1,4$ ; для трехатомных газов  $k = 1,29$ .

При  $k = \text{const}$ , для вычисления работы адиабатного процесса можно записать несколько формул

$$l = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad \text{или} \quad l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (5.28)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right], \quad (5.29)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (5.30)$$

Располагаемая работа в адиабатном процессе вычисляется по формуле:

$$l_0 = kl. \quad (5.31)$$

## 5.5. ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС

Политропный процесс – любой произвольный процесс изменения состояния рабочего тела, протекающий при постоянной теплоемкости  $c = \text{const}$ . Из уравнения первого закона термодинамики

$$cdT = c_v dT + p dv \quad (5.32)$$

следует, что если  $c$  и  $c_v = \text{const}$ , то величина работы политропного процесса остается постоянной. Условие  $c = \text{const}$  означает, что количественное распределение теплоты между внутренней энергией и работой процесса в политропном процессе остается неизменным. Доля теплоты, расходуемая на изменение удельной внутренней энергии рабочего тела,

$$\phi = \frac{du}{dq} = \frac{c_v dT}{cdT} = \frac{c_v}{c} = \text{const}. \quad (5.33)$$

То, что  $\phi = \text{const}$ , является главной особенностью политропного процесса.

Доля теплоты, расходуемая на работу изменения объема,

$$\psi = 1 - \frac{du}{dq} = 1 - \phi. \quad (5.33)$$

Уравнение политропного процесса можно получить из уравнений первого закона термодинамики для идеального газа:

$$dq = c_v dT + p dv, \quad (5.34)$$

$$dq = c_p dT - v dp. \quad (5.35)$$

Уравнения первого закона термодинамики для политропного процесса имеют следующий вид:

$$cdT = c_v dT + p dv, \quad (5.36)$$

$$cdT = c_p dT - v dp. \quad (5.37)$$

Отсюда

$$(c - c_v) dT = p dv; \quad (5.38)$$

$$(c - c_p) dT = -v dp. \quad (5.39)$$

Из уравнений (5.38) и (5.39) находим

$$\frac{c - c_p}{c - c_v} \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}. \quad (5.40)$$

Величину  $n$  называют показателем политропы

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}. \quad (5.41)$$

Уравнение политропы в дифференциальной форме:

$$n \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}. \quad (5.42)$$

Интегрируя это выражение при  $n = \text{const}$ , получим

$$pv^n = \text{const}. \quad (5.43)$$

Уравнение (5.43) является уравнением политропы в  $p, v$  - диаграмме. Показатель политропы является постоянным для конкретного процесса.

Численное значение показателя политропы может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Величина показателя  $n$  является характеристикой процесса. Политропный процесс является обобщающим. Основные процессы – изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный – являются частными случаями политропного процесса, причем каждому из них соответствует свое значение показателя  $n = \text{const}$ .

Поскольку уравнения политропы и адиабаты одинаковы по форме и отличаются только величиной показателя  $n$ , то, все соотношения между параметрами газа и выражения для определения величины удельной работы политропного процесса могут быть представлены формулами, аналогичными адиабатному процессу, но вместо показателя  $k$  необходимо везде подставить  $n$ :

$$l = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad \text{или} \quad l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (5.44)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right] = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right], \quad (5.45)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (5.46)$$

Теплота, сообщаемая газу в политропном процессе, определяется по формуле

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c dT = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{n-k}{n-1} dT = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1). \quad (5.47)$$

В политропном процессе теплота, подведенная к газу, идет на изменение его внутренней энергии и выполнение внешней работы.

Изменение энтальпии рабочего тела в политропном процессе при  $c_p = \text{const}$  в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$  определяется по формуле

$$i_2 - i_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (5.48)$$

Чтобы определить значение конкретного газового процесса, необходимо располагать экспериментальными данными для этого процесса, при этом удобнее всего использовать кривую процесса в  $p, v$  - диаграмме. Логарифмируя уравнение политропы

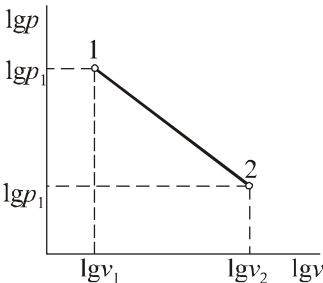
$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad (5.49)$$

получаем:

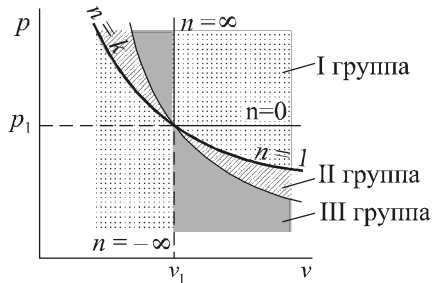
$$n = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg v_2 - \lg v_1} \quad (5.50)$$

Нанеся кривую процесса на логарифмическую  $p, v$  - диаграмму (рис.5.5), где эта кривая спрямляется, легко можно найти величину  $n$  для данной кривой процесса.

Бесчисленное множество политропных процессов можно подразделить на три группы (рис. 5.6).



**Рис. 5.5. К определению показателя политропы  $n$**



**Рис. 5.6. Расположение политроп в  $p, v$  - диаграмме**

Для группы I ( $-\infty < n < 1$ ) характерно то, что в процессах расширения теплота расходуется как на изменение внутренней энергии рабочего тела, так и на совершение внешней работы; в процессах сжатия, наоборот, теплота выделяется во внешнюю среду как за счет уменьшения внутренней энергии, так и благодаря затрате работы внешних сил.

Теплоемкость газа в процессах этой группы является положительной величиной.

Процессы группы II ( $1 < n < k$ ) отличаются тем, что работа расширения в них производится как за счет подвода теплоты, так и за счет внутренней энергии; в процессах сжатия затраченная работа превращается частично в теплоту, отводимую во внешнюю среду, и частично в увеличение внутренней энергии рабочего тела.

Теплоемкость газа в процессах этой группы является отрицательной величиной.

В процессах III ( $k < n < +\infty$ ) при расширении внутренняя энергия расходуется на совершение работы и отводимую в окружающую среду теплоту, при сжатии процессы протекают с подводом теплоты и увеличением внутренней энергии.

### ЗАДАЧИ

1. Газ при давлении  $p_1 = 0,5$  МПа и температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  нагревается при постоянном объеме до температуры  $t_2 = 327^\circ\text{C}$ . Найти конечное давление газа.

2. В закрытом сосуде заключен газ при давлении  $p_1 = 2,5$  МПа и температуре  $t_1 = 270^\circ\text{C}$ . Чему будет равно конечное давление  $p_1$ , если температура снизится до  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ ?

3. Сосуд емкостью 100 литров содержит воздух при давлении 0,8 МПа и температуре  $30^\circ\text{C}$ . Определить количество теплоты, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при постоянном объеме до 1,6 МПа. Принять зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

#### Решение

Из соотношения параметров изохорного процесса

$$T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1} = 303 \frac{1,6}{0,8} = 606\text{K}.$$

По уравнению  $q_v = c_{vm2}t_2 - c_{vm1}t_1$ , пользуясь таблицей 3.1, находим теплоемкости воздуха и рассчитываем количество подводимой теплоты в изохорном процессе:

$$q_v = 0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30 = 223,2 \text{ кДж/кг}.$$

Массу воздуха в резервуаре, определяем из уравнения

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,1}{287 \cdot 303} = 0,92 \text{ кг},$$

а сообщенное количество теплоты воздуху

$$Q_v = 0,92 \cdot 223,2 = 205,3 \text{ кДж}.$$

4. Определить количество теплоты, необходимое для нагревания  $5000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении  $p = 0,2$  МПа от температуры  $t_1 = 50^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

5. В цилиндре находится воздух при давлении  $p = 0,5$  МПа и температуре  $400^\circ\text{C}$ . От воздуха отнимается теплота при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура

$t_2 = 0^\circ\text{C}$  Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 литров. Определить количество отнятой теплоты, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

*Решение*

Количество отнятой теплоты определяем по формуле

$$Q_p = V_n c'_{pm} (t_2 - t_1).$$

Объем воздуха при нормальных условиях определяем из выражения

$$V_n = \frac{p V T_n}{p_n T} = \frac{0,5 \cdot 0,4 \cdot 273}{0,1013 \cdot 673} = 0,8 \text{ м}^3.$$

По табл. 3.1 находим

$$c'_{pm} = 1,3289 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K}).$$

Следовательно,

$$Q_p = 0,8 \cdot 1,3289 \cdot (0 - 400) = -425 \text{ кДж}.$$

Это же количество теплоты можно вычислить не только по объему воздуха, но и по его массе:

$$Q_p = M c_{pm} (t_2 - t_1).$$

Массу воздуха определяем из характеристического уравнения

$$M = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,4}{287 \cdot 673} = 1,035 \text{ кг}.$$

По табл. 3.1 находим

$$c_{pm} = 1,0283 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Следовательно,

$$Q_p = 1,035 \cdot 1,0283 \cdot (0 - 400) = -425 \text{ кДж}.$$

Конечный объем получим из уравнения

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,4 \frac{273}{673} = 0,1622 \text{ м}^3.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = V_n c'_{vm} (t_2 - t_1).$$

По табл. 3.1 находим

$$c'_{vm} = 0,9579 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K}).$$

Следовательно,

$$\Delta U = 0,8 \cdot 0,9579 \cdot (0 - 400) = -306,5 \text{ кДж}.$$

Работа, затраченная на сжатие

$$L = p(V_2 - V_1) = 0,5 \cdot 10^6 \cdot (0,1622 - 0,4) = -118,9 \text{ кДж}.$$

**6.** Воздух объемом  $10 \text{ м}^3$  с начальной температурой  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  расширяется при постоянном давлении до  $15 \text{ м}^3$  вследствие сообщения газу  $4185 \text{ кДж}$  теплоты. Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

**7.** Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура отходящих газов  $t_{г1} = 300^\circ\text{C}$ , конечная температура отходящих газов  $t_{г2} = 150^\circ\text{C}$ ; Расход отходящих газов, поступающих в воздухоподогреватель  $G_{г} = 2000 \text{ кг/ч}$ . Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель  $t_{в1} = 15^\circ\text{C}$ , а его расход равен  $G_{в} = 1800 \text{ кг/ч}$ . Определить температуру воздуха на выходе из воздухоподогревателя  $t_{в2}$ , если потери теплоты в воздухоподогревателе составляют 5%. Средние теплоемкости для отходящих газов из котла и воздуха принять соответственно равными  $1,0468$  и  $1,0049 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

**8.** Воздух в количестве  $5 \text{ кг}$  при давлении  $p = 0,5 \text{ МПа}$  и температуре  $30^\circ\text{C}$  расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество теплоты, сообщаемой газу.

**9.** Воздух при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  сжимается в компрессоре до давления  $p_2 = 2,5 \text{ МПа}$ . Определить величину работы затраченной на сжатие  $10 \text{ кг}$  воздуха, если сжатие изотермическое.

**10.**  $10 \text{ кг}$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  сжимается изотермически, при этом объем уменьшается в два раза. Определить начальные и конечные параметры, количество теплоты, работу и изменение внутренней энергии.

**11.** Как будут относиться между собой значения работы изотермического сжатия, вычисленные для равной массы различных газов, при прочих одинаковых условиях?

#### *Решение*

Значения работы изотермического сжатия для  $1 \text{ кг}$  различных газов при одинаковых условиях выражаются следующими уравнениями:

$$l_1 = R_1 T \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad l_2 = R_2 T \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad l_3 = R_3 T \ln \frac{p_2}{p_1} \text{ и т. д.,}$$

поэтому

$$l_1 : l_2 : l_3 = R_1 : R_2 : R_3,$$

то есть, работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

**12.** Воздух  $1 \text{ кг}$  массой при начальном давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  адиабатно сжимается до конечного давления  $p_2 = 1 \text{ МПа}$ . Определить конечный объем, конечную температуру и затраченную работу.



Из соотношения параметров в адиабатном процессе:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

определяем конечную температуру

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 303 \cdot 10^{\frac{0,4}{1,4}} = 585 \text{ K}; \quad t_2 = 312^\circ \text{C}.$$

Затраченная работа определяется по уравнению (5.28), представленному в виде

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{0,287}{0,4} (303 - 585) = -202 \text{ кДж/кг}.$$

Конечный объем определяется из уравнения состояния

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 585}{1 \cdot 10^6} = 0,168 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**13.** Воздух массой 10 кг при начальном давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1 = 27^\circ \text{C}$  адиабатно сжимается до конечного давления  $p_2 = 0,6$  МПа. Найти работу сжатия, конечный объем и конечную температуру воздуха.

**14.** Воздух массой 1 кг, занимающий объем  $v_1 = 0,0887 \text{ м}^3/\text{кг}$  при начальном давлении  $p_1 = 1$  МПа, расширяется до десятикратного объема. Определить конечное давление и работу, совершенную воздухом в изотермическом и адиабатном процессах.

**15.** Воздух при температуре  $127^\circ \text{C}$  изотермически сжимается так, что объем его становится равным 0,25 начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления. Найти температуру воздуха в конце адиабатного расширения. Представить процесс расширения и сжатия в  $p, v$ -диаграмме.

**16.** Воздух при температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  должен охлаждаться посредством адиабатного расширения до температуры  $t_2 = -50^\circ \text{C}$ . Конечное давление воздуха при этом составило 0,1 МПа. Определить начальное давление воздуха и удельную работу расширения.

**17.** Воздух массой 1 кг при начальном давлении  $p_1 = 0,5$  МПа и температуре  $t_1 = 111^\circ \text{C}$  расширяется политропно до давления  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты и полученную работу, если показатель политропы  $n = 1,2$ .

*Решение*

Определяем начальный объем воздуха из уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 384}{0,5 \cdot 10^6} = 0,22 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Конечный объем воздуха находим из уравнения

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,22 \cdot 5^{\frac{1}{1,2}} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Конечную температуру получаем из характеристического уравнения

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,84}{287} = 293 \text{ К}.$$

Величину работы находим из уравнения

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{0,287}{0,2} (384 - 293) = 130,6 \text{ кДж/кг}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = c_v (T_2 - T_1) = 0,722 (293 - 384) = -65,7 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, сообщенной воздуху:

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 0,722 \frac{1,2-1,4}{1,2-1} (20 - 111) = 65,7 \text{ кДж/кг}$$

В этом процессе расширения, при показателе политропы  $n = 1,2$ , внешняя работа совершается за счет подведенной теплоты и уменьшения внутренней энергии. То есть

$$l = q - \Delta u = 65,7 - (-65,7) = 131,4 \text{ кДж/кг}.$$

Этот же результат получен выше другим путем.

**18.** Воздух в количестве 1 кг при температуре  $t_1 = 120^\circ\text{С}$  политропно расширяется от давления  $p_1 = 1,2$  МПа до давления  $p_2 = 0,2$  МПа, причем объем его увеличивается в 4 раза. Определить показатель политропы, начальный и конечный объемы, конечную температуру и работу расширения.

**19.** Воздух массой 1,5 кг при температуре  $18^\circ\text{С}$  сжимают политропно от давления  $p_1 = 0,09$  МПа до давления  $p_2 = 1$  МПа, температура при этом повышается до  $t_2 = 125^\circ\text{С}$ . Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенной теплоты.

## Решение

Конечный и начальный объемы находим из характеристического уравнения

$$V_2 = \frac{MRT_2}{p_2} = \frac{1,5 \cdot 287 \cdot 398}{1 \cdot 10^6} = 0,171 \text{ м}^3.$$

$$V_1 = \frac{MRT_1}{p_1} = \frac{1,5 \cdot 287 \cdot 291}{9 \cdot 10^4} = 1,392 \text{ м}^3.$$

Показатель политропы можно определить по уравнению

$$n = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{V_2}{V_1}} = \frac{\lg \frac{0,09}{1}}{\lg \frac{0,171}{1,392}} = 1,1484$$

Затраченная работа

$$L = \frac{MR}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \cdot 287}{1,1484 - 1} (18 - 125) = -310,4 \text{ кДж}.$$

Количество отведенной теплоты

$$Q = Mc_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 1,5 \cdot 0,722 \frac{1,148 - 1,4}{1,148 - 1} (125 - 18) = -197,3 \text{ кДж}$$

**20.** При политропном сжатии 1 кг воздуха до объема  $V_2 = 0,1V_1$  температура поднялась от 10 до 100°C. Начальное давление  $p_1 = 0,1$  МПа. Определить показатель политропы, конечные параметры воздуха, работу сжатия и количество отведенной теплоты.

**21.** Воздух в компрессоре сжимается по политропе ( $n = 1,29$ ) от давления  $p_1 = 0,09$  МПа до давления  $p_2 = 1$  МПа, начальная температура воздуха 10°C. После сжатия воздух проходит через холодильник, охлаждаемый водой, начальная температура которой 12°C, а конечная  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Определить часовой расход охлаждающей воды, если производительность компрессора  $G_v = 1500$  кг/ч при нормальных физических условиях, а воздух в холодильнике изобарно охлаждается до 35°C.

**22.** В воздушном двигателе воздух в количестве 1 кг при температуре  $t_1 = 327^\circ\text{C}$  расширяется от давления  $p_1 = 1,1$  МПа до давления  $p_2 = 0,1$  МПа. Расширение может произойти изотермически, адиабатно и политропно с показателем политропы  $n = 1,3$ . Сравнить работы расширения и определить конечные параметры воздуха по этим трем процессам. Представить процессы на  $p, v$ -диаграмме.

**23.** В процессе политропного расширения воздуху сообщается 90 кДж теплоты. Найти изменение внутренней энергии воздуха и произ-

веденную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а давление его уменьшилось в 8 раз.

**24.** Воздух объемом  $0,1 \text{ м}^3$  при температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  расширяется в цилиндре с подвижным поршнем от давления  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  до давления  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Найти конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенную теплоту, если расширение в цилиндре происходит: изотермически; адиабатно; политропно с показателем политропы  $n = 1,25$ . Представить процессы на  $p, v$  - диаграмме.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите основные термодинамические процессы идеальных газов в процессы в  $p, v$  – диаграмме.

2. Как изменяется давление газа в изохорном процессе при подводе и отводе теплоты?

3. Чему равна величина работы газа в изохорном процессе?

4. На что расходуется теплота подводимая в изохорном процессе?

5. Чему равна доля подведенной теплоты идущей на изменение внутренней энергии в изохорном процессе?

6. В каком случае работа газа в изобарном процессе является положительной?

7. Чему равна располагаемая работа в изобарном процессе?

8. Чему равна доля подведенной теплоты идущей на изменение внутренней энергии в изобарном процессе?

9. Как изменяется энтальпия и внутренняя энергия в изотермическом процессе?

10. Чему равна теплоемкость изотермического процесса?

11. За счет чего совершается работа адиабатного расширения и как при этом изменяется температура рабочего тела?

12. Во сколько раз работа адиабатного расширения газа больше располагаемой работы?

13. В политропных процессах какой группы работа расширения газа осуществляется за счет подвода теплоты и уменьшения внутренней энергии?

14. В политропных процессах какой группы теплоемкость газа отрицательная?

## 6. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

### 6.1. СУЩНОСТЬ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Второй закон термодинамики выводится из опыта и определяет направление естественных (самопроизвольных) процессов, протекающих в природе. Физическая сущность второго закона термодинамики наиболее отчетливо раскрывается в формулировке, данной Больцманом. Он подчеркнул свойство природы стремиться от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным. Известно, что наиболее вероятным состоянием термодинамической системы является ее термодинамическое равновесие. Если теплоизолированную термодинамическую систему вывести из состояния равновесия путем создания разности температур между различными телами системы, то за счет самопроизвольных естественных процессов теплообмена эта система придет к состоянию термодинамического равновесия, при котором все тела системы будут иметь одинаковую температуру.

Открытие второго закона термодинамики связано с анализом работы тепловых машин. Впервые сущность этого закона изложил в 1824 г. французский инженер С. Карно. Он указал на возможность превращения теплоты в полезную работу в двигателях лишь при наличии двух источников теплоты: один с более высокой температурой (нагреватель с температурой  $T_1$ ) и другой с меньшей температурой (холодильник с температурой  $T_2$ ).

Позднее Р. Клаузиус и В. Томсон (лорд Кельвин) дали наиболее общие формулировки второго закона термодинамики, из которых следует, что:

1. Невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от холодных тел к телам нагретым.
2. Не вся теплота, полученная от теплоотдатчика, может перейти в работу, а только её часть, а часть теплоты должна перейти в теплоприемник.

### 6.2. ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ

При равенстве давлений в системе и окружающей среде изменение объема рабочего тела прекращается, и передача энергии в форме работы отсутствует (в этом случае система находится в механическом равновесии со средой).

Равенство температур рабочего тела и среды обеспечивает термическое равновесие. При этом между системой и окружающей средой не возникает передачи энергии в форме теплоты.

Процессы, при которых система проходит последовательно бесчисленное множество равновесных состояний называются **равновесными** или **квазистатическими**.

Для любой термодинамической системы можно представить два состояния, между которыми будет проходить два процесса: один от первого состояния ко второму и другой, наоборот, от второго к первому.

Первый процесс называют прямым, второй – обратным. Если после прямого процесса 1–2 следует обратный процесс 2–1 и при этом термодинамическая система возвращается в исходное состояние, то такие процессы принято считать обратимыми. При обратимых процессах система в обратном процессе проходит через те же равновесные состояния, что и в прямом процессе. При этом, ни в окружающей среде, ни в самой системе, не возникает никаких остаточных явлений, то есть, обратимый процесс, осуществленный в прямом и обратном направлениях, не производит изменений в окружающей среде.

В случаях, когда обмен энергией между системой и окружающей средой протекает в форме работы, при бесконечно малой разности давлений  $\Delta p \cong 0$ , процесс является **механически обратимым**.

Если термодинамическая система обменивается с окружающей средой энергией в форме теплоты при бесконечно малой разности температур  $\Delta T = 0$ , то процесс является **термически обратимым**.

Действительные термодинамические процессы совершаются при конечной разности давлений и температур рабочего тела, окружающей среды и поэтому являются неравновесными. Такие процессы необратимы.

Необратимыми называют процессы, при проведении которых в прямом и затем в обратном направлении система не возвращается в исходное состояние (то есть в ходе процесса в системе происходят изменения, которые отличают ее состояние после проведения обратного процесса от состояния, в котором она находилась до проведения прямого процесса). Все необратимые процессы протекают в направлении достижения в термодинамической системе равновесия, то есть выравнивания в ней давлений, температур, концентраций.

### 6.3. КРУГОВЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЛИ ЦИКЛЫ

Круговые термодинамические процессы или циклы осуществляют для непрерывного превращения теплоты в работу, так как разомкнутый процесс для этого непригоден (для повторного получения работы необходимо вернуть рабочее тело в исходное состояние, то есть сжать рабочее тело). Процесс сжатия рабочего тела от давления  $p_2$  до давления

$p_1$  нужно осуществлять по пути, отличному от пути процесса расширения. В противном случае суммарная работа цикла будет равна нулю. На рис. 6.1 приведены круговые процессы, в которых рабочее тело расширяется по кривой 1–3–2. При этом работа расширения численно равна площади 1–3–2–4–5–1. При осуществлении процесса сжатия по кривой 2–3–1 работа сжатия равна работе расширения и суммарная работа в таком круговом процессе равна нулю.

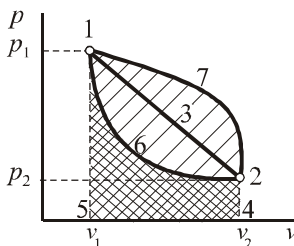


Рис. 6.1. К выбору кругового процесса

При осуществлении процесса сжатия по кривой 2–7–1, расположенной над кривой расширения 1–3–2, суммарная работа такого цикла будет отрицательной. При осуществлении процесса сжатия по кривой 2–6–1, расположенной под кривой расширения 1–3–2, суммарная работа такого цикла будет положительной, так как работа расширения (площадь 1–3–2–4–5–1) больше работы сжатия (площадь 2–6–1–5–4–2). Площадь ограниченная замкнутой кривой 1–3–2–7–1, представляет собой работу цикла. Многократно повторяя такой цикл, можно получить любое количество работы.

Циклы, в которых теплота превращается в положительную работу, называются **прямыми**. Такие циклы в  $p, v$ -диаграмме протекают по часовой стрелке. По прямым циклам работают тепловые двигатели.

Цикл, в результате которого получается отрицательная работа, называется **обратным**. В нем работа сжатия больше работы расширения. По обратным циклам работают холодильные машины.

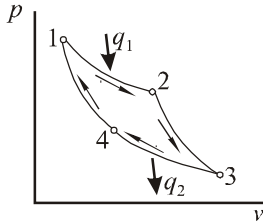
Циклы могут быть обратимыми и необратимыми. **Обратимым термодинамическим циклом** называется цикл, все процессы в котором обратимы. **Необратимым термодинамическим циклом** называется цикл, в котором хотя бы один из составляющих процессов необратим.

### 6.3. ЦИКЛ КАРНО

В 1824 г. С. Карно впервые рассмотрел обратимый термодинамический цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Цикл Карно в

$p, v$ - диаграмме изображен на рис. 6.2. Процессы 1–2 и 3–4 являются изотермическими, а 2–3 и 4–1 – адиабатными. Начальная температура рабочего тела в цикле принимается равной температуре нагревателя  $T_1$ .

При изотермическом расширении от состояния 1 до состояния 2 рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $q_1$  при температуре  $T_1$ . На участке 2-3 рабочее тело адиабатно расширяется. При этом температура рабочего тела понижается от  $T_1$  до  $T_2$ , а давление падает от  $p_2$  до  $p_3$ .



**Рис. 6.2. Прямой цикл Карно**

При сжатии по изотерме 3–4 от рабочего тела отводится к холодильнику количество теплоты  $q_2$  при температуре  $T_2$ .

Дальнейшее сжатие по адиабате 4–1 приводит к повышению температуры рабочего тела от температуры  $T_2$  до температуры  $T_1$ , а рабочее тело возвращается в первоначальное состояние.

Термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (6.1)$$

Количество теплоты  $q_2$  и  $q_1$  определим из уравнений

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (6.2)$$

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4}. \quad (6.3)$$

Подставляя полученные значения  $q_1$  и  $q_2$  в уравнение, находим

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{v_3}{v_4}}{T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}}. \quad (6.4)$$

Так как в цикле Карно адиабатные процессы 2–3 и 4–1 осуществляются между одними и теми же температурами, то



$$\left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad \text{и} \quad \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (6.5)$$

следовательно,

$$\left(\frac{v_3}{v_2}\right) = \left(\frac{v_4}{v_1}\right) \quad \text{и} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}. \quad (6.6)$$

Тогда термический КПД цикла Карно

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6.7)$$

Из этого уравнения следует:

1. Термический КПД цикла Карно зависит только от абсолютных температур нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ . Он возрастает с увеличением температуры  $T_1$  и уменьшением  $T_2$ .

2. Термический КПД цикла Карно всегда меньше единицы. Равенство  $\eta_t = 1$  возможно только при  $T_2 = 0$  или  $T_1 = \infty$ , что практически невозможно реализовать.

3. Термический КПД цикла Карно при  $T_1 = T_2$  равен нулю, таким образом, невозможно превращение теплоты в работу, если все тела системы имеют одинаковую температуру.

4. Термический КПД цикла Карно не зависит от устройства двигателя и физических свойств рабочего тела, а зависит только от абсолютных температур нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ . Это положение известно под названием **теоремы Карно**.

В реальных двигателях цикл Карно не осуществляется из-за значительных трудностей. Он является эталоном при оценке совершенства любых циклов тепловых двигателей.

## 6.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ. ПОНЯТИЕ ОБ ЭНТРОПИИ

Для обратимого цикла Карно имеем

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6.8)$$

Откуда

$$\frac{q_1}{T_1} = \frac{q_2}{T_2}, \quad \text{или} \quad \frac{q_1}{T_1} - \frac{q_2}{T_2} = 0. \quad (6.9)$$

Учитывая, что теплота  $q_1$  положительная, а теплота  $q_2$  отрицательная величина, запишем

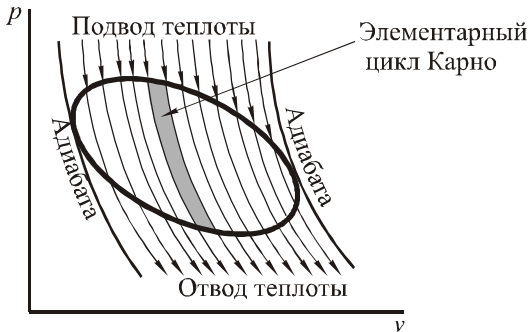
$$\frac{q_1}{T_1} + \frac{q_2}{T_2} = 0 \quad (6.10)$$

или

$$\sum \frac{q}{T} = 0. \quad (6.11)$$

Отношение  $q/T$  называется **приведенной теплотой**.

Равенство справедливо не только для цикла Карно, но и для любого обратимого цикла. Рассмотрим в  $p, v$  - диаграмме произвольный обратимый цикл (рис.6.3).



**Рис.6.3. Представление произвольного кругового процесса в виде суммы бесконечно малых циклов Карно**

Проведем большое количество близко расположенных адиабат, которые разобьют произвольный цикл на бесконечно большое количество элементарных циклов. В пределе элементарные циклы можно считать элементарными циклами Карно, для каждого из которых справедливо соотношение (6.11).

Суммируя эти соотношения для всех элементарных циклов, для рассматриваемого произвольного цикла получим

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta q_i}{T_i} = 0. \quad (6.12)$$

В пределе для бесконечно большого числа этих элементарных циклов, то есть для произвольного обратимого цикла

$$\lim \sum_{i=1}^n \frac{\Delta q_i}{T_i} = \oint \frac{dq}{T} = 0. \quad (6.13)$$

Известно, если интеграл по замкнутому контуру равен нулю, то подинтегральное выражение представляет собой полный дифференциал некоторой функции состояния. В термодинамике отношение  $dq/T$  принято считать полным дифференциалом функции состояния  $S$ , называемой **энтропией**, то есть

$$ds = \frac{dq}{T} \text{ или } dq = Tds. \quad (6.14)$$

Уравнение, полученное немецким физиком Р. Клаузиусом в 1834 г., представляет собой математическое выражение второго закона термодинамики для обратимого цикла и называется **первым интегралом Клаузиуса**.

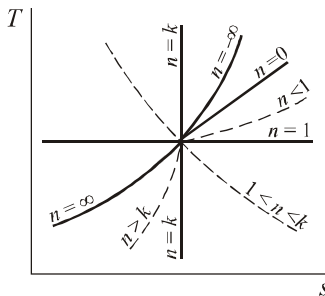
Для произвольной массы системы энтропия обозначается через

$$S = ms.$$

Удельная энтропия  $s$  имеет размерность Дж/(кг·К); энтропия для любого количества массы  $S$  – размерность Дж/К.

Размерность удельной энтропии совпадает с размерностью теплоемкости. Нуль отсчета энтропии для чистого вещества и для смеси веществ, не вступающих между собой в химическую реакцию, может быть выбран произвольно. При рассмотрении различных термодинамических процессов наибольший интерес представляет изменение энтропии между точками начала и конца процесса, которое не зависит от выбора начала отсчета энтропии.

Понятие энтропии позволяет ввести удобную для анализа циклов тепловых двигателей диаграмму состояний, в которой по абсциссе откладывается энтропия, а по ординате – абсолютная температура (рис. 6.4).



**Рис. 6.4. Политропные процессы в  $T, s$  – диаграмме**

В  $T, s$  – диаграмме количество тепла полученного (отданного) системой в процессе, изображается площадью под линией процесса. Работа,

произведенная рабочим телом в цикле, изображается площадью, ограниченной замкнутой кривой. В  $T, s$  - диаграмме видно также, на каких участках цикла к рабочему телу подводится тепло и на каких отводится: процессу подвода тепла соответствует увеличение энтропии, а процессу отвода тепла – уменьшение. На рис. 6.4 показано расположение политропных процессов на  $T, s$  - диаграмме, выходящих из одной и той же точки, в зависимости от величины показателя  $n$ .

Изменение энтропии при постоянной теплоемкости можно определить по уравнениям:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Для политропного процесса:

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1},$$

где  $c$  – теплоемкость политропного процесса, величину которой можно определить из уравнения (5.41):

$$c = c_v \frac{n - k}{n - 1}.$$

## 6.5. ЦИКЛ КАРНО В $T, S$ -ДИАГРАММЕ

Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. Учитывая, что на  $T, s$  - диаграмме изотерма изображается горизонтальной линией, а адиабата – вертикальной, цикл Карно на этой диаграмме изобразится прямоугольником 1–2–3–4 (рис. 6.5). Количество теплоты, подведенное к рабочему телу, численно равно площади прямоугольника 1–2–3–4:

$$q_1 = T_1 (s_2 - s_1). \quad (6.15)$$

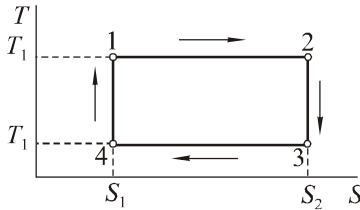


Рис. 6.5. Цикл Карно в  $T, s$ -диаграмме

Количество теплоты, отведенное к холодильнику, изображается площадью 3–4– $s_1$ – $s_2$ :

$$q_2 = T_2 (s_2 - s_1). \quad (6.16)$$

Теплота, эквивалентная работе цикла, равна площади этого цикла

$$q = l = q_1 - q_2 = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1). \quad (6.17)$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{(T_1 - T_2)(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6.18)$$

Тепловой баланс для обратного цикла Карно:

$$q_1 = q_2 + l. \quad (6.19)$$

Обратный цикл Карно (рис. 6.6) является идеальным циклом холодильных установок и тепловых насосов. В нем работа подводится извне и позволяет отобрать теплоту от холодного источника и передать ее горячему источнику. В обратном цикле Карно идет процесс 1–4 адиабатного расширения; процесс 4–3 изотермического расширения; процесс 3–2 адиабатного сжатия; процесс 2–1 изотермического сжатия (см. рис. 6.2, 6.5).

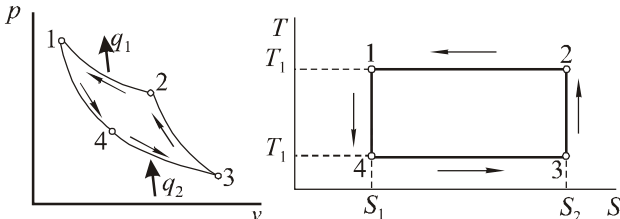


Рис. 6.6. Обратный цикл Карно

Суммарное количество теплоты, полученное горячим источником  $q_1 = q_2 + l$ , состоит из отобранной теплоты у холодного источника и подведенной работы. Отношение отведенной теплоты к подведенной работе показывает эффективность обратного цикла и называется холодильным коэффициентом  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (6.20)$$

Холодильный коэффициент  $\varepsilon$  обратного цикла Карно зависит от абсолютных температур  $T_1$  и  $T_2$  источников теплоты.

## 6.6. ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ В НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССАХ

Для необратимого цикла Карно, как и для любого необратимого цикла, справедливо неравенство:

$$\frac{q_1}{T_1} - \frac{q_2}{T_2} < 0. \quad (6.21)$$

Уравнение (6.21) можно записать в виде

$$\sum \frac{q}{T} < 0. \quad (6.22)$$

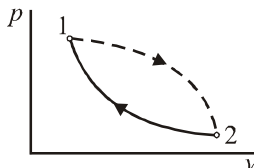
Учитывая, что

$$\lim \sum_{i=1}^n \frac{\Delta q}{T} = \oint \frac{\Delta q}{T}, \quad (6.23)$$

с учетом уравнения (6.22) имеем

$$\oint \frac{\Delta q}{T} < 0. \quad (6.24)$$

Рассмотрим произвольный необратимый цикл, состоящий из двух процессов – необратимого 1–2 и обратимого 2–1 (рис. 6.7).



**Рис. 6.7. Необратимый цикл:**

*1–2 – необратимый процесс; 2–1 – обратимый процесс*

Для рассматриваемого цикла интеграл Клаузиуса может быть записан в виде суммы двух криволинейных интегралов:

$$\oint \frac{dq}{T} = \oint_{1-2} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{необр}} + \oint_{2-1} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{обр}}, \quad (6.25)$$

откуда с учетом (6.24) следует, что

$$\oint_{1-2} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{необр}} + \oint_{2-1} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{обр}} < 0. \quad (6.26)$$

Для обратимого процесса 2-1

$$\oint_{2-1} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{обр}} = \int_2^1 \frac{dq}{T} = s_1 - s_2. \quad (6.27)$$

Подставляя это значение в выше приведенную формулу, получаем для любого необратимого процесса

$$s_2 - s_1 > \oint_{2-1} \left( \frac{dq}{T} \right)_{\text{необр}}, \quad (6.28)$$

откуда в дифференциальной форме

$$ds > \frac{dq}{T}. \quad (6.29)$$

Если необратимый процесс осуществляется в изолированной системе (для которой по определению  $dq_{\text{сист}} = 0$ , то для такой системы

$$ds_{\text{сист}} > 0 \quad (6.30)$$

то есть, энтропия изолированной системы в результате протекания в ней необратимых процессов возрастает.

Для обратимого процесса из соотношения

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (6.31)$$

следует, что если в изолированной системе ( $dq_{\text{сист}} = 0$ ) осуществляется обратимый процесс, то энтропия системы остается постоянной:

$$ds_{\text{сист}} = 0. \quad (6.32)$$

Таким образом, какие бы процессы ни протекали в изолированной системе, ее энтропия не может уменьшаться:

$$ds_{\text{сист}} \geq 0, \quad (6.33)$$

здесь знак равенства соответствует обратимым, а знак неравенства – необратимым процессам.

Отсюда следует важный вывод: **изолированная система, достигшая равновесного состояния, в дальнейшем в этом состоянии и пребывает.** Самопроизвольные процессы продолжаются в изолированной системе до тех пор, пока энтропия системы не достигнет максимума.

Соотношение

$$ds \geq \frac{dq}{T}, \quad (6.34)$$

справедливо и для обратимых (знак равенства) и для необратимых (знак «больше») процессов в любой системе, представляет собой аналитическое выражение второго закона термодинамики.

## 6.7. ОБЪЕДИНЕННОЕ УРАВНЕНИЕ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ЗАКОНОВ ТЕРМОДИНАМИКИ

Уравнение второго закона термодинамики может быть записано следующим образом:

$$Tds \geq dq. \quad (6.35)$$

Уравнение первого закона термодинамики:

$$dq = du + pdv, \quad (6.36)$$

или

$$dq = di - vdp. \quad (6.37)$$

Подставляя значения  $dq$  полученные по уравнениям (6.36) и (6.37) в уравнение (6.35) получаем:

$$Tds \geq du + pdv, \quad (6.38)$$

или

$$Tds \geq di - vdp. \quad (6.39)$$

Эти соотношения называются **объединенными уравнениями первого и второго законов термодинамики.**

Для систем, находящихся в равновесном состоянии объединенные уравнения первого и второго законов термодинамики можно написать в виде

$$Tds = du + pdv, \quad (6.40)$$

и

$$Tds = di - vdp. \quad (6.41)$$



## ЗАДАЧИ

1. Определить энтропию воздуха при  $p = 0,6$  МПа и  $t = 200^\circ\text{C}$ . (Считать значение энтропии при нормальных условиях равным нулю).

*Решение*

Подставляя исходные данные и теплоемкость воздуха определенную по таблице 3.1 в уравнение

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

$$s = 1,0115 \ln \frac{473}{273} - 0,287 \ln \frac{6}{1,013} = 0,046 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

2. Определить энтропию 6,5 кг азота при  $p = 0,5$  МПа и  $t = 300^\circ\text{C}$ .

3. Кислород массой 1 кг при температуре  $t_1 = 127^\circ\text{C}$  расширяется до пятикратного объема. Температура его при этом падает до  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии.

4. Воздух массой 1 кг сжимается от  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  до  $p_2 = 0,5$  МПа и  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии.

5. Воздух объемом  $100 \text{ м}^3$ , находящийся в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры  $400^\circ\text{C}$ . Сжатие производится: а) изохорно; б) изобарно; в) адиабатно; д) политропно с показателем политропы  $n = 2,6$ . Найти энтропию воздуха в конце каждого процесса, считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю.

6. В сосуде объемом 300 литров заключен воздух при давлении  $p_1 = 5$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Параметры среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде.

*Решение*

Так как температура воздуха в начальном состоянии равна температуре среды, то максимальная работа, которую может выполнить воздух, может быть получена лишь при условии изотермического расширения воздуха от начального давления  $p_1 = 5$  МПа до давления среды  $p_0 = 0,1$  МПа. Величина максимальной полезной работы определяется по формуле

$$l_{\text{max(пол)}} = T_0(s_2 - s_1) - p_0(v_2 - v_1)$$

или

$$L_{\text{max(пол)}} = MT_0(s_2 - s_1) - p_0(V_2 - V_1).$$

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг.}$$

Объем воздуха после изотермического расширения

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{5 \cdot 0,3}{0,1} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе определяется по формуле:

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{p_1}{p_2},$$

то

$$\begin{aligned} L_{\max(\text{пол})} &= MT_0 R \ln \frac{p_1}{p_2} - p_0 (V_2 - V_1) = \\ &= 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot \frac{5}{0,1} - 0,1(15 - 0,3) = 4377 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

**7.** В сосуде объемом 400 литров находится углекислота при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и давлении  $p_1 = 10$  МПа. Параметры среды:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Определить максимальную полезную работу, которую может произвести углекислота, находящаяся в сосуде.

**8.** Определить максимальную полезную работу, которая может быть произведена 1 кг кислорода, если его начальное состояние характеризуется параметрами  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 350^\circ\text{C}$ , а состояние среды - параметрами  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

**9.** Торпеда приводится в действие и управляется автоматически, двигаясь на заданной глубине. Для двигателя торпеды используется имеющийся в ней запас сжатого воздуха. Найти максимальную полезную работу, которую может произвести воздушный двигатель торпеды, если объем сжатого воздуха в ней  $V_1 = 210$  литров, давление  $p_1 = 20$  МПа, а температура воздуха и морской воды  $t_0 = 17^\circ\text{C}$ . Торпеда отрегулирована на движение под уровнем моря на глубине 5 метров.

**10.** В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  до  $t_2 = -42^\circ\text{C}$ . Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,5$  МПа, его масса 4 кг. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной к воздуху теплоты составляет 178 кДж.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Возможен ли процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от холодных тел к телам нагретым?
2. Может ли вся теплота, полученная от теплоотдатчика, перейти в работу?
3. Какие термодинамические процессы называются равновесными?
4. Какие термодинамические процессы называются необратимыми?
5. Какие циклы называются прямыми, а какие – обратными?
6. Термический к.п.д. цикла Карно зависит от устройства двигателя и физических свойств рабочего тела?
7. Что называется приведенной теплотой?
8. Что называется первым интегралом Клаузиуса?
9. По изменению какой функции состояния можно определить подводится или отводится тепло от термодинамической системы?
10. До каких пор протекают самопроизвольные процессы в изолированной системе?
11. Возможно ли увеличение энтропии изолированной термодинамической системы?

## 7. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

### 7.1. ОТЛИЧИЕ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ ОТ ИДЕАЛЬНОГО

Уравнение состояния идеального газа было получено в предположении, что молекулы являются упругими шариками, движение которых подчиняется законам Ньютона, между ними отсутствуют силы взаимодействия, а объем, занимаемый молекулами, незначителен по сравнению с объемом газа.

В природе идеальных газов не существует. Газы, применяемые в технике, – это реальные газы, состоящие из молекул конечного объема и связанные между собой силами взаимодействия. Поведение реальных газов существенно отличается от идеального, причем с понижением температуры и повышением давления отличие свойств реального газа от идеального увеличивается.

Для характеристики отличия термических свойств реального газа от свойств идеального газа обычно применяют коэффициент сжимаемости

$$z = \frac{pv}{RT}. \quad (7.1)$$

Для идеального газа  $pv = RT$ , поэтому при любых давлениях и температурах коэффициент сжимаемости идеального газа равен 1. На рис. 7.1 приведена зависимость коэффициента сжимаемости некоторых реальных газов от давления при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

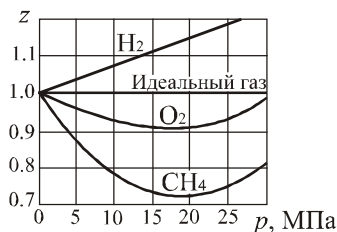


Рис.7.1. Зависимость коэффициента сжимаемости  $z$  от давления при  $t=0^\circ\text{C}$

Для реальных газов коэффициент сжимаемости  $z$  может принимать значения больше и меньше единицы в зависимости от давления и свойств газа. Существуют границы применимости уравнения  $pv = RT$  для реальных газов. Анализ расчетных и опытных данных показывает, что уравнение состояния идеального газа достаточно хорошо

описывает поведение реальных газов при высоких температурах и низких давлениях. Для большинства реальных газов, которые используются в технике, уравнение Менделеева-Клапейрона применимо для давлений, не превышающих  $10^7$  Па (10 МПа).

## 7.2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Уравнение состояния реальных газов можно получить либо теоретически - на основе представлений о структуре газа, либо путем обработки экспериментальных зависимостей  $p$ ,  $v$ ,  $T$ .

В настоящее время предложено более 150 уравнений состояний реальных газов, но ни одно из них не обладает достаточной общностью и точностью.

Наиболее простым и качественно правильно передающим основные закономерности поведения реальных газов является уравнение, предложенное в 1873 г. голландским физиком Я. Ван-дер-Ваальсом:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT, \quad (7.2)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные величины, зависящие от природы газа. Постоянная  $b$  учитывает уменьшение объема, в котором движутся молекулы реального газа и является тем предельно минимальным объемом, до которого можно сжать 1 кг газа. Разность  $v - b$  представляет собой свободный объем, в котором могут двигаться молекулы газа. Отношение  $a/v^2$  – это добавочное давление, обусловленное силами взаимодействия между молекулами реальных газов, эта величина называется внутренним давлением. Для жидкостей внутреннее давление имеет очень большие значения. Так, для воды при  $T = 293$  К соотношение  $a/v^2 = 10800$  бар, поэтому внешнее давление, под которым находится жидкость, практически не оказывает влияния на его объем. В газах внутреннее давление мало, поэтому внешнее давление легко изменяет его объем.

Для газов при больших плотностях и жидкостей результаты, полученные уравнением Ван-дер-Ваальса, значительно расходятся с экспериментальными данными. Это вызвано тем, что при в уравнении используются следующие допущения:

- не учитываются силы отталкивания, которые возникают при больших давлениях в сильно сжатом веществе;
- не учитываются явления ассоциации и диссоциации молекул;
- величины  $a$  и  $b$  приняты постоянными, но экспериментальные данные показывают их зависимость от температуры и давления системы.

В настоящее время существует много модификаций уравнения состояния Ван-дер-Ваальса. Все они являются двухпараметрическими уравнениями, так как содержат две константы  $a$  и  $b$ , которые определяются из экспериментальных данных. Основными из этих уравнений являются: уравнение Бертло:

$$\left(p + \frac{a}{Tv^2}\right)(v - b) = RT, \quad (7.3)$$

уравнение Редлиха-Квонга; уравнение Камерлинг-Оннеса; первое и второе уравнения Дитеричи.

## ЗАДАЧИ

1. Определить значения постоянных  $a$  и  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса для углекислоты, если критические параметры  $CO_2$  равны:  $p_{кр} = 73,83 \cdot 10^5$  Па;  $t_{кр} = 31,05^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $a = 190,9$ ;  $b = 0,984 \cdot 10^{-3}$ .

2. В баллоне объемом  $V = 40$  литров находится двуокись углерода при давлении  $p = 3,923$  МПа. Определить массу газа в баллоне, если температура газа равна  $t = 207^\circ\text{C}$ . Расчет произвести при помощи уравнений: а) Клапейрона; б) Ван-дер-Ваальса. В случае «б» использовать величины констант  $a$  и  $b$ , подсчитанные в задаче 1 по значениям  $p_{кр}$  и  $t_{кр}$ .

Методические указания. По уравнению Ван-дер-Ваальса удельный объем определяют графо-аналитическим методом. Принимают несколько значений удельного объема (одно значение определенное по уравнению Клапейрона) и рассчитывают по уравнению Ван-дер-Ваальса величину давления. Строят отрезок изотермы  $t = 20^\circ\text{C}$  в координатах  $p$ ,  $v$  и по графику находят нужное значение удельного объема.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем реальные газы отличаются от идеальных?
2. Что такое коэффициент сжимаемости и для чего его ввели в практику технических расчетов?
3. От каких параметров зависит коэффициент сжимаемости?
4. Чему равен коэффициент сжимаемости идеального газа?
5. При каких условиях можно для реальных газов использовать уравнение Клапейрона – Менделеева?
6. Что учитывают постоянные величины в уравнении Ван-дер-Ваальса?
7. Какой вид принимает уравнение Ван-дер-Ваальса, если постоянные величины  $a$  и  $b$  в уравнении, зависящие от природы газа, равны нулю?

## 8. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

### 8.1. ПОНЯТИЯ О ФАЗАХ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Гомогенной называют такую систему, химический состав и физические свойства которой во всех ее частях одинаковы или изменяются непрерывно (без скачка) от одной точки системы к другой. Гетерогенной называют систему, состоящую из двух и более различных гомогенных областей. Гомогенные области в гетерогенной системе называют фазами. Каждая фаза отделена от соседней поверхностью раздела, при переходе через которую скачкообразно изменяются химический состав или физические свойства вещества.

Гомогенная система и каждая фаза гетерогенной системы могут состоять из одного или нескольких чистых веществ. Гомогенную систему или фазу гетерогенной системы, состоящую из нескольких чистых веществ, называют раствором или смесью.

Вещества могут находиться в следующих агрегатных состояниях:

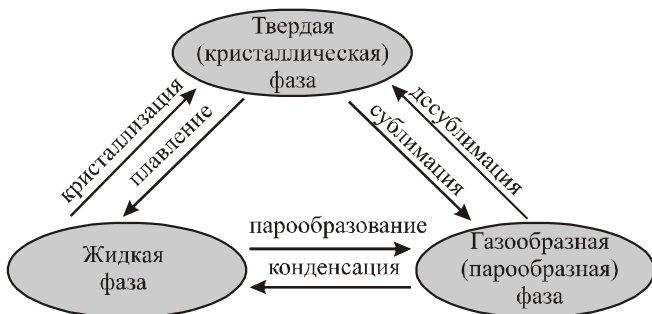
- твердом (кристаллическом),
- жидком,
- газообразном (парообразном).

В твердом и жидком агрегатном состоянии вещества могут содержать различные фазы. Например в цементном клинкере выделяют следующие фазы: алит, белит и промежуточная фаза (каждая из этих фаз имеет свой минералогический состав). Пример фаз в жидком состоянии – эмульсии, представляющие собой дисперсную систему из двух не смешивающихся жидкостей. Газообразное состояние, как правило, фаз не содержит, так как в ней осуществляется взаимная диффузия компонентов до их полного смешивания.

**Фазовым переходом** называется переход вещества из одной фазы в другую. При фазовом переходе обычно резко изменяется плотность вещества и происходит поглощение или выделение теплоты.

Переход вещества из одной фазы в другую, происходящий при  $T = \text{const}$  и  $p = \text{const}$  называется **равновесным фазовым переходом**. Равновесное состояние термодинамической системы, состоящей из двух или большего числа фаз, называется **фазовым равновесием**.

Фазовые переходы между агрегатными состояниями показаны на рис. 8.1. Фазовый переход вещества из твердого состояния в газообразное (парообразное) называется **сублимацией**, а точка фазового перехода называется точкой сублимации. Обратный переход из газообразного состояния в твердое – **десублимацией**. Фазовый переход вещества из



**Рис. 8.1. Фазовые переходы между агрегатными состояниями**

жидкого состояния в состояние пара называется **парообразованием**, а обратный переход – **конденсацией**. Фазовый переход вещества из кристаллического состояния в жидкое называется **плавлением**, а обратный – **кристаллизацией**.

## 8.2. ПРАВИЛО ФАЗ ГИББСА

При анализе фазовых равновесий и процессов фазовых переходов важную роль играет так называемое **правило фаз Гиббса**. Оно устанавливает зависимость между числом независимых интенсивных переменных, определяющих состояние термодинамической системы, находящейся в равновесии (степенями свободы системы), числом фаз и числом компонентов системы:

$$\psi = n - r + 2, \quad (8.1)$$

где  $\psi$  – число степеней свободы термодинамической системы;  $n$  – число компонентов системы;  $r$  – число фаз в системе.

Число степеней свободы термодинамической системы показывает, какое число параметров системы, находящейся в состоянии равновесия, можно изменять произвольно, не изменяя при этом числа фаз в системе.

Для однокомпонентной системы, состоящей из одной фазы, находим  $\psi = 2$ . Это означает, что состояние простых однородных систем определяется двумя независимыми параметрами, то есть, если для такой системы произвольно задать, например, температуру и давление, то все остальные параметры системы будут определены однозначно. С увеличением числа фаз в системе число свободно варьируемых параметров убывает. При числе фаз равном двум, система обладает только одной степенью свободы, то есть один параметр однозначно определяет все остальные параметры при термодинамическом равновесии.



Рассматривая однокомпонентную трехфазную систему, получаем, что число степеней свободы такой системы равно нулю. Это означает, что в однокомпонентной системе три фазы могут находиться в равновесии лишь при вполне определенных термодинамических параметрах – температуре и давлении.

На кривой фазового перехода в  $p, T$ - диаграмме (рис. 8.2) состояние, в котором сосуществуют три фазы, изобразится точкой, называемой **тройной точкой**. Для воды тройная точка соответствует температуре  $0,01^\circ\text{C}$  и давлению  $610,8 \text{ Па}$  (рис. 8.3).

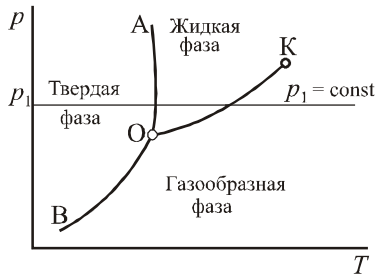


Рис. 8.2.  $p, T$ - диаграмма состояния вещества

Располагая  $p, T$ - диаграммой вещества, всегда можно выяснить, в каком состоянии – твердом, жидком или газообразном – находится это вещество при каких либо давлении и температуре. Из  $p, T$ - диаграммы следует, что кривая  $OB$  представляет собой кривую сублимации вещества, линия  $OA$  – кривую плавления, а линия  $OK$  – кривую кипения (конденсации). Кривая кипения обычно называется кривой насыщения. Линия насыщения  $OK$  оканчивается в точке  $K$ , так называемой **критической точке**. Выше критической точки плотность жидкости становится равна плотности перегретого пара и при температурах, выше критической, возможно существование только перегретого пара.

Из этой же диаграммы видно, что при температуре  $T > T_{\text{кр}}$  никаким изотермическим сжатием невозможно перевести пар в жидкость.

Из  $p, T$ - диаграммы (рис. 8.2) также видно, как изменяется состояние вещества в процессе нагрева при постоянном давлении. Перемещаясь по изобаре  $p_1 = \text{const}$  из соответствующей области, твердого состояния вещества, пересекая линию  $OA$  попадаем в область жидкого состояния, а пересекая линию  $OK$  попадаем в область перегретого пара.

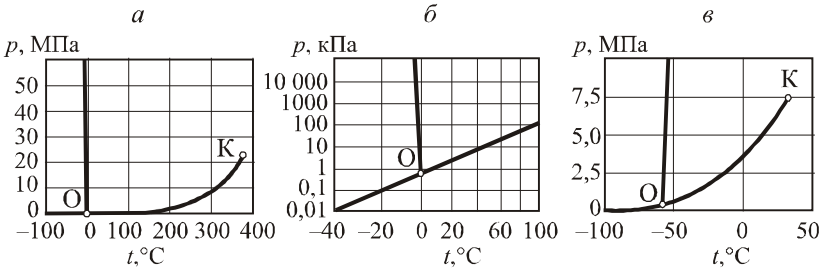


Рис. 8.3.  $P, T$ -диаграмма состояния  $\text{H}_2\text{O}$  (а, б) и  $\text{CO}_2$  (в)

Поскольку свойства разных веществ отличаются друг от друга, то и  $p, T$ -диаграммы будут различными для различных веществ (рис. 8.3).

### 8.3. УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА–КЛАУЗИУСА

При переходах вещества из одного агрегатного состояния в другое каждому давлению соответствует температура, при которой фазы находятся в состоянии термодинамического равновесия. Зависимость давления фазового перехода от температуры описывается уравнением Клапейрона–Клаузиуса. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса можно получить двумя способами: из равенства химических потенциалов при равновесии и из второго закона термодинамики, используя метод круговых процессов. Рассмотрим элементарный круговой процесс 1 кг вещества на  $p, v$ - и  $T, s$ -диаграммах (рис. 8.4).

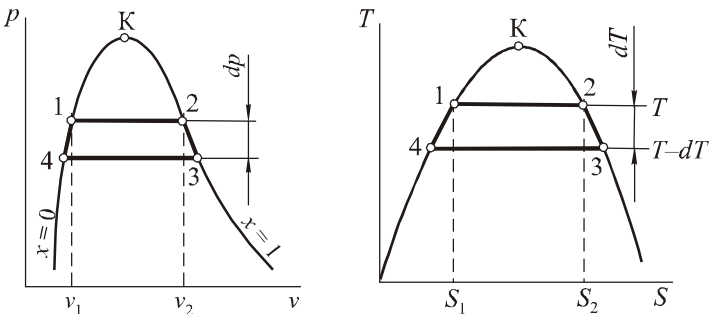


Рис. 8.4. К выводу уравнения Клапейрона – Клаузиуса

Точка 1 характеризует начальное состояние кипящей жидкости при давлении  $p$ , удельном объеме  $v_1$  и температуре  $T$ . В процессе 1–2 при  $p = \text{const}$  и  $T = \text{const}$  кипящей жидкости сообщается теплота  $q_1$ .

В результате в точке 2 образуется сухой насыщенный пар с параметрами  $p, v_2, T$ . От точки 2 сухой насыщенный пар расширяется по адиабате, при этом давление уменьшается на  $dp$ , а температура на  $dT$ . В процессе 3–4 насыщенный пар частично конденсируется при постоянной температуре  $T - dT$ . От точки 4 насыщенный пар сжимается по адиабате до начального состояния. В результате проведения всех процессов получается элементарный цикл Карно. Термический КПД цикла Карно не зависит от физических свойств рабочего тела и определяется по формуле:

$$h_t = 1 - \frac{dl}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (8.2)$$

или

$$h_t = \frac{dl}{q_1} = \frac{dT}{T}. \quad (8.3)$$

Количество работы за цикл на  $p, v$  - диаграмме равно площади 1–2–3–4–1, которую в пределе можно считать прямоугольником

$$dl = dp(v_2 - v_1). \quad (8.4)$$

Количество теплоты  $q_1$ , сообщаемое в изотермическом процессе 1–2, равно количеству теплоты, которое затрачивается на превращение 1 кг жидкости в сухой насыщенный пар, то есть удельной теплоте парообразования  $r$ , то есть рассматривая  $T, s$  - диаграмму имеем:

$$q_1 = T(s_2 - s_1) = r. \quad (8.5)$$

Подставляя выражения (8.4) и (8.5) в формулу (8.3) получаем уравнение Клапейрона–Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T} \frac{r}{(v_2 - v_1)}. \quad (8.6)$$

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса применимо ко всем изменениям агрегатных состояний химически однородных веществ.

### **Фазовый переход «жидкость - пар»**

Применительно к фазовому переходу «жидкость - пар» уравнение Клапейрона – Клаузиуса имеет вид

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{r}{T(v'' - v')}, \quad (8.7)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования;  $v'', v'$  – удельные объемы пара и жидкости на линии насыщения;  $p_s$  – равновесное давление в точках фазового перехода «жидкость - пар».

### Фазовый переход «твердое тело - жидкость»

Применительно к фазовому переходу «твердое тело - жидкость» уравнение Клапейрона – Клаузиуса имеет вид

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(v' - v_{\text{ТВ}})}, \quad (8.8)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления;  $v'$ ,  $v_{\text{ТВ}}$  – удельные объемы жидкости и твердой фазы на линии плавления.

### Фазовый переход «твердое тело - пар»

Применительно к фазовому переходу «твердое тело - пар» уравнение Клапейрона – Клаузиуса имеет вид

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(v'' - v_{\text{ТВ}})}, \quad (8.9)$$

где  $L$  – удельная теплота сублимации;  $v''$ ,  $v_{\text{ТВ}}$  – удельные объемы пара и твердого тела на линии сублимации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие величины связывает между собой уравнение Клапейрона – Клаузиуса?
2. Чем характеризуется тройная точка? Каковы значения ее параметров для воды?
3. Дайте формулировку правила фаз.
4. Что показывает число степеней свободы термодинамической системы?
5. Чему равно число степеней свободы однокомпонентной трехфазной системы?
6. Чему равно число степеней свободы однокомпонентной однофазной системы?
7. Возможно ли при температуре  $T > T_{\text{кр}}$  изотермическим сжатием перевести пар в жидкость и почему?
8. Что называется равновесным фазовым переходом?
9. Что называется фазовым равновесием?
10. Что называется сублимацией и десублимацией?
11. Как изменяется число степеней свободы варьируемых параметров с увеличением числа фаз в системе?

## 9. ВОДЯНОЙ ПАР

### 9.1. ПРОЦЕСС ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Водяной пар широко применяется в качестве рабочего тела в паровых машинах, а вода и водяной пар являются самыми распространенными теплоносителями в теплообменных установках, в системах теплоснабжения и отопления.

Водяной пар получают в парогенераторах (паровых котлах) различного типа. Генерация пара во всех этих агрегатах проходит при постоянном давлении и состоит из трех последовательно осуществляемых стадий. На первой стадии вода нагревается до температуры кипения или насыщения. На второй она превращается в пар при постоянной температуре, на третьей стадии происходит нагревание пара с повышением температуры (происходит перегрев пара). На рис. 9.1 приведен процесс парообразования в  $p, n$ -диаграмме водяного пара.

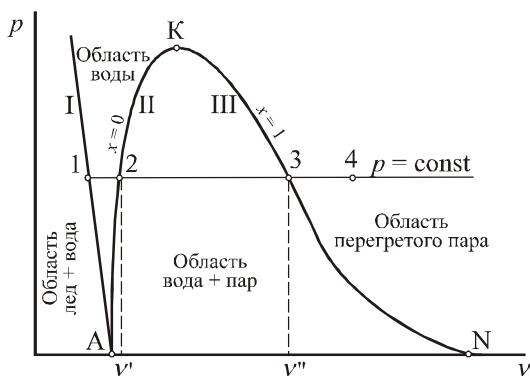


Рис. 9.1.  $p, n$ -диаграмма водяного пара

Точка 1 лежит на кривой I, которая является изотермой жидкости при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Кривая II определяет состояние жидкости при температуре кипения, а кривая III – состояние сухого насыщенного пара. Влево от кривой II до изотермы жидкости I находится область однофазной не кипящей жидкости. Вправо от кривой III – область перегретого пара. Кривые II и III ограничивают область влажного насыщенного пара, отделяя его от области жидкости и перегретого пара, и называются **пограничными кривыми**. Кривую II – называют пограничной кривой жидкости (или нижней пограничной кривой), а кривую III – погра-

ничной кривой пара (или верхней пограничной кривой). Нижняя и верхняя пограничные кривые сходятся в точке К, которая называется **критической**. Для каждого вещества критические параметры имеют определенные значения. Для воды  $p_{кр} = 22,129$  МПа;  $\rho_{кр} = 0,00326$  м<sup>3</sup>/кг;  $t_{кр} = 374,1^\circ\text{C}$ .

Процесс 1-2 – это нагрев воды до температуры насыщения (кипения) Процесс 2-3 – процесс кипения или парообразования при  $p = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ . В данном процессе система является двухфазной (смесь воды и сухого насыщенного пара). Пар в этой области – влажный насыщенный. Состояние влажного пара характеризуется двумя параметрами: давлением (или температурой насыщения  $t_s$ , определяющей это давление) и степенью сухости  $x$ . **Степень сухости  $x$**  – массовая доля сухого насыщенного пара во влажном:

$$x = \frac{m_{\text{сух.пара}}}{m_{\text{вл.пара}}} . \quad (9.1)$$

В точке 2 степень сухости  $x = 0$ , а в точке 3 степень сухости  $x = 1$ , то есть пар является сухим насыщенным. **Сухой насыщенный пар** – это пар, в котором отсутствуют взвешенные частицы жидкой фазы, а температура равна температуре кипения, соответствующей данному давлению. Величина  $1 - x$  называется степенью влажности пара. Последующий подвод теплоты к сухому насыщенному пару при том же давлении приводит к повышению его температуры, то есть сухой насыщенный пар переходит в перегретый. Точка 4 изображает состояние перегретого пара и в зависимости от температуры пара может лежать на разных расстояниях от точки 3. **Перегретый пар** можно охарактеризовать как пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления. Разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара называется **степенью перегрева**.

## 9.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

### Параметры состояния воды

В технической термодинамике удельные энтальпия, энтропия и внутренняя энергия воды в тройной точке принимаются равными нулю, то есть  $i_0 = 0$ ;  $s_0 = 0$ ;  $u_0 = 0$ .

Количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг воды от температуры  $0^\circ\text{C}$  до температуры кипения  $t_s$  при постоянном давлении называется удельной теплотой воды. Ее величина определяется по формуле

$$q' = c_p(t_s - t_0) = c_p t_s, \quad (9.2)$$

где  $c_p$  – средняя изобарная теплоемкость воды в интервале температур от 0 до  $t_s$ .

Так как вода практически несжимаема, то можно принять что ее плотность при  $t = t_s$  и любых давлениях постоянна, а удельный объем  $v_0 \approx 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ . В случае умеренных давлений можно принять работу расширения воды равной нулю и, тогда уравнение первого закона термодинамики примет вид

$$q' \approx u'. \quad (9.3)$$

При невысоких давлениях для воды можно записать

$$i' \approx q' \approx u'. \quad (9.4)$$

В действительности

$$i' > q' > u'. \quad (9.5)$$

Изменение энтропии жидкости определяется уравнением

$$\Delta s = s' - s_0 = \int_{273}^{T_s} \frac{dq'}{T} = \int_{273}^{T_s} c'_p \frac{dT}{T}, \quad (9.6)$$

где  $s'$  – энтропия жидкости при температуре кипения;  $c'_p$  – массовая теплоемкость жидкости;  $T_s$  – температуры кипения жидкости.

Если принять теплоемкость  $c_p = \text{const}$ , то с учетом  $s_0 = 0$  получим

$$s' = c'_p \ln \frac{T_s}{273}. \quad (9.7)$$

### Параметры состояния сухого насыщенного пара

Сухой насыщенный пар характеризуется давлением  $p$  или температурой  $t_s$ . Процесс перехода жидкости в пар является изобарно-изотермическим процессом. Количество теплоты, затраченное в этом процессе на превращение 1 кг воды при температуре кипения в сухой насыщенный пар, называется **теплотой парообразования** и обозначается символом  $r$ .

Уравнение первого закона термодинамики для процесса парообразования имеет вид

$$r = u'' - u' + l'' = u'' - u' + p(n'' - n'), \quad (9.8)$$

где  $u''$  – внутренняя энергия сухого насыщенного пара;  $l''$  – работа расширения при постоянном давлении в процессе парообразования;  $i''$  – энтальпия сухого насыщенного пара.

Уравнение (9.8) можно представить в виде:

$$r = i'' - i'. \quad (9.9)$$

Величина изменения внутренней энергии  $\Delta u = u'' - u'$ , расходуемая на работу против внутренних сил, называется **внутренней теплотой парообразования** и обозначается буквой  $\rho$ :

$$\rho = u'' - u'. \quad (9.10)$$

Количество теплоты, затрачиваемое на работу расширения  $l''$  против внешних сил, называется **внешней теплотой парообразования** и равно

$$l'' = p(v'' - v') = \psi. \quad (9.11)$$

Таким образом, теплота парообразования:

$$r = \rho + \psi. \quad (9.12)$$

Энтальпия сухого насыщенного пара определяется из уравнения:

$$i'' = i' + r. \quad (9.13)$$

Величины  $i''$ ,  $i'$  и  $r$  приводятся в таблицах насыщенного пара, а внутренняя и внешняя теплоты парообразования вычисляются по приведенным выше формулам. Теплота парообразования  $r$  с повышением температуры и давления уменьшается и равна нулю при критическом давлении. Приращение энтропии в процессе парообразования определяется по формуле:

$$\Delta s = s'' - s' = \frac{r}{T_s}. \quad (9.14)$$

Энтропия сухого насыщенного пара:

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}. \quad (9.15)$$

Численные значения энтропии воды и сухого насыщенного пара приводятся в таблицах насыщенного пара, и при расчетах их берут из этих таблиц.



## Параметры состояния перегретого пара

Перегретый пар характеризуется более высокой температурой  $T$ , чем насыщенный пар того же давления (с температурой  $T_s$ ). Разность  $T - T_s$  называется **степенью перегрева**. По своим физическим свойствам перегретый пар приближается к газам и его состояние определяется двумя параметрами:  $p, T$ , или  $p, n$ , или  $p, n$ . По мере перегрева сухого насыщенного пара его температура, удельный объем, энтальпия и энтропия увеличиваются, а плотность уменьшается. Количество теплоты, необходимое для перегрева 1 кг сухого насыщенного пара при  $p = \text{const}$  до температуры  $t$ , определяется по формуле:

$$q_n = \int_{T_s}^T c_p dT. \quad (9.16)$$

Величина  $q_n$  называется теплотой перегрева. Ее можно определить из уравнения первого закона термодинамики

$$q_n = u - u'' + l = u - u'' + p(n - n''), \quad (9.17)$$

где  $l = p(n - n'')$  – работа расширения в изобарном процессе перегрева пара;  $u - u''$  – изменение внутренней энергии при перегреве;  $i$  – энтальпия перегретого пара;  $i''$  – энтальпия сухого насыщенного пара.

Уравнение (9.17) можно записать в следующем виде:

$$q_n = i - i''. \quad (9.18)$$

Из уравнения (9.18) получаем энтальпию перегретого пара:

$$i = i'' + q_n = i' + r + q_n, \quad (9.19)$$

называется теплотой перегретого пара.

Внутренняя энергия перегретого пара  $u$  определяется по формуле:

$$u = i - pn, \quad (9.20)$$

где  $n$  – удельный объем перегретого пара.

Изменение энтропии в процессе перегрева сухого насыщенного пара при  $p = \text{const}$

$$\Delta s = s - s'' = \int_{T_s}^T \frac{dq}{T} = \int_{T_s}^T c_p \frac{dT}{T} = c_{pm} \ln \frac{T}{T_s}. \quad (9.21)$$

Отсюда находим энтропию перегретого пара

$$s = s'' + c_{pm} \ln \frac{T}{T_s}. \quad (9.22)$$

## Параметры состояния влажного насыщенного пара

Влажный насыщенный пар – это двухфазная смесь, представляющая собой пар со взвешенными в нем капельками жидкости. Удельный объем влажного насыщенного пара равен сумме объемов  $x$  кг сухого пара и  $(1 - x)$  кг кипящей жидкости, то есть

$$v_x = v''x + (1 - x)v', \quad (9.23)$$

или

$$v_x = v' + x(v'' - v'). \quad (9.24)$$

Разность  $v'' - v'$  выражает приращение объема пара в процессе парообразования при постоянном давлении. Каждому давлению насыщения отвечают вполне определенные значения удельных объемов  $v''$  и  $v'$ . При невысоких давлениях (ниже 3 МПа) и больших степенях сухости ( $x \geq 0.8$ ) объемом воды  $(1 - x)v'$  можно пренебречь. Тогда удельный объем влажного насыщенного пара можно определить по уравнению

$$v_x \approx v''x, \quad (9.25)$$

то есть удельный объем влажного насыщенного пара приближенно равен произведению удельного объема сухого пара того же давления на степень сухости.

Энтальпия влажного пара определяется по правилу аддитивности уравнением

$$i_x = i' + x(i'' - i'). \quad (9.26)$$

Так как с учетом уравнения (9.13)  $i'' - i' = r$ , то энтальпия влажного пара:

$$i_x = i' + xr. \quad (9.27)$$

Для влажного пара, как и для любого состояния вещества, справедлива зависимость

$$i_x = u_x + pv_x. \quad (9.28)$$

Отсюда внутренняя энергия влажного пара определяется по уравнению:

$$u_x = i_x - pv_x. \quad (9.29)$$

Энтропия влажного пара определяется по правилу аддитивности уравнением

$$s_x = s''x + (1 - x)s' = s' + x(s'' - s'), \quad (9.30)$$

или

$$s_x = s' + \frac{xr}{T}. \quad (9.31)$$

Из выражений (9.24), (9.26) и (9.30) находим

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{i_x - i'}{i'' - i'} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}. \quad (9.32)$$

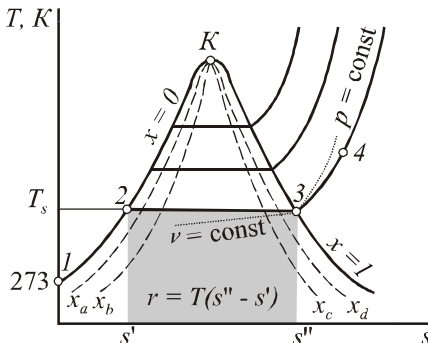
Теплота парообразования определяется по уравнению:

$$r_x = xr. \quad (9.33)$$

Уравнение (9.32) используется для построения линий постоянной степени сухости  $x$  пара в любых диаграммах.

### 9.3. $T, s$ - ДИАГРАММА ВОДЯНОГО ПАРА

$T, s$  - диаграмма водяного пара называется тепловой диаграммой, так как площадь под линией процесса численно равна количеству подведенной или отведенной теплоты. Наиболее удобно использовать  $T, s$  - диаграмму водяного пара при исследовании циклов. На рис. 9.2 представлен изобарный процесс 1–2–3–4 получения пара в  $T, s$  - диаграмме.



**Рис. 9.2. Процесс парообразования в  $T, s$  - диаграмме для различных давлений**

Процесс 1-2 – это нагрев воды до температуры насыщения (кипения). Площадь под линией процесса равна количеству теплоты идущей на нагрев 1 кг воды от 0°C до температуры кипения при данном давлении, то есть является удельной теплотой воды.

При невысоких давлениях теплоемкость воды практически не зависит от давления, поэтому изобары нагрева воды почти совпадают с по-

граничной кривой жидкости. Процесс 2–3 – это кипение или парообразование при  $p = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ . Площадь под линией процесса равна теплоте парообразования  $r$ . Процесс 3–4 – процесс перегрева пара. Точка 4 определяется заданной температурой перегрева пара и удельной энтропией  $s$ . Площадь под линией процесса 3–4 равна теплоте перегрева. Суммарная площадь под кривой 1–2–3–4 процесса на  $T, s$ -диаграмме соответствует энтальпии перегретого пара.

#### 9.4. $i, s$ - ДИАГРАММА ВОДЯНОГО ПАРА

Для практических тепловых расчетов паровых процессов наиболее удобной является  $i, s$ -диаграмма (рис. 9.3). На этой диаграмме ординатами служат значения энтальпии  $i$ , а абсциссами – величины энтропии  $s$ .

На  $i, s$ -диаграмму наносятся пограничные кривые воды и пара, кривые постоянных давлений, удельных объемов, степеней сухости и температур. Вначале строятся пограничные кривые, для построения которых используются табличные значения энтальпий и энтропий воды и сухого насыщенного пара. За начало координат принимается состояние воды в тройной точке, где  $i_0 = 0$ ,  $s_0 = 0$ . Поэтому пограничная кривая жидкости выходит из начала координат. Обе пограничные кривые сходятся в критической точке  $K$ . Выше критической точки различия между жидкой и парообразной фазами нет и двухфазная область состояния отсутствует. Затем в области влажного пара строятся кривые  $p = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,  $x = \text{const}$ .

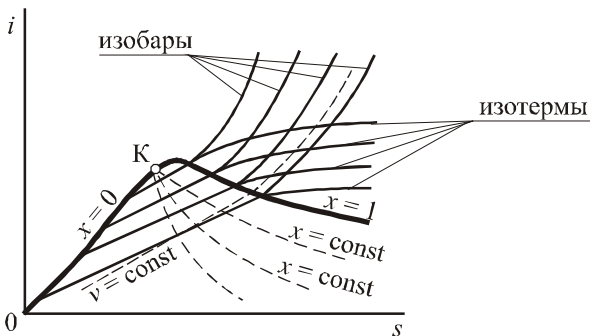


Рис. 9.3.  $i, s$ -диаграмма водяного пара

В области влажного насыщенного пара изобары (изотермы) являются прямыми линиями. Все изобары начинаются на пограничной кривой жидкости и пересекаются с пограничной кривой пара.

Обратимый адиабатный процесс в  $i, s$  - диаграмме изображается вертикальной прямой, так как  $ds = dq/T$  при  $dq = 0$ ,  $ds = 0$  и  $s = \text{const}$ . Поэтому все вертикальные прямые в  $i, s$  - диаграмме являются адиабатными.

Для построения кривых  $p = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$  в области перегретого пара используются соответствующие значения  $i$  и  $s$ , приведенные в таблицах перегретого пара.

Использование  $i, s$  - диаграммы водяного пара по сравнению с  $T, s$  - диаграммой имеет ряд существенных достоинств.

1. Для любой точки на  $i, s$  - диаграмме можно найти значения  $p$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $i$ ,  $s$ ,  $x$ .

2. Адиабатные процессы в ней изображаются вертикальными прямыми.

3. Количество теплоты  $q$  при  $p = \text{const}$  изображается отрезками, а не площадями, как в  $T, s$  - диаграмме.

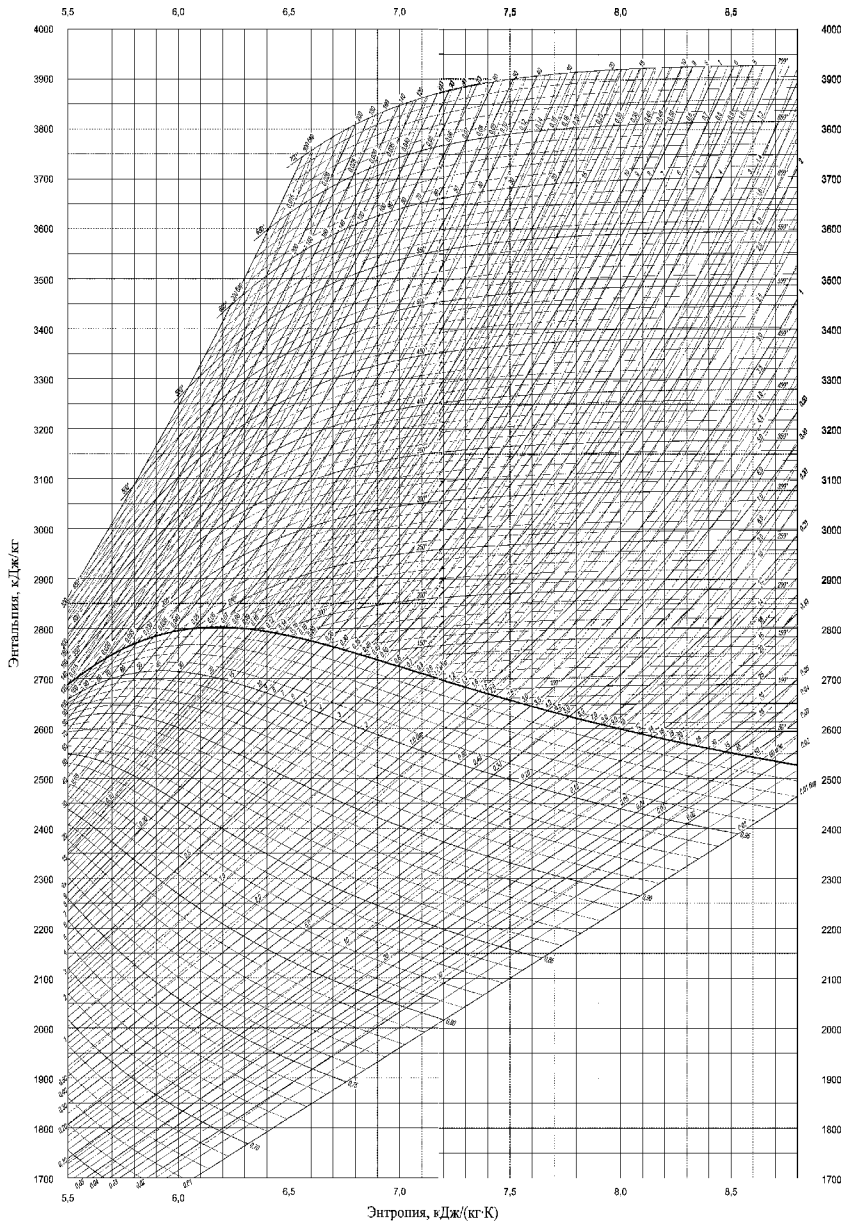
В практических задачах  $i, s$  - диаграмма применяется при решении задач на истечение, дросселирование, определение расхода пара машин, расчета турбин и т.д. Обычно полностью  $i, s$  - диаграмму не строят, а выполняют лишь ту ее часть, на которой содержатся параметры пара, необходимые для расчетов, что позволяет изображать диаграмму в требуемом масштабе. Наиболее часто используемая рабочая часть  $i, s$  - диаграммы приведена на рис. 9.4.

## 9.5. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОДЯНОГО ПАРА

При исследовании термодинамических процессов изменения состояния водяного пара могут встретиться три случая, отличающиеся областью в которой происходит процесс.

В первом случае – это область влажного насыщенного пара, во втором – область перегретого пара, а в третьем – процесс изменения состояния происходит частично в области влажного насыщенного, а частично в области перегретого пара.

Термодинамические расчеты можно проводить аналитическим методом с применением таблиц воды и водяного пара или графическим методом с применением специальных диаграмм. Графический метод расчета отличается простотой, наглядностью и универсальностью. Универсальность метода состоит в том, что его можно использовать для всех процессов как в области насыщенных, так и в области перегретых паров, поэтому данный метод рекомендуется как основной метод расчетов процессов водяного пара. Метод расчета по таблицам воды и водяного пара применяется исключительно в случаях особо точных расчетов.



**Рис. 9.4.  $i, s$  - диаграмма водяного пара**

### Изохорный процесс

Изохоры водяного пара в  $p, v$ -,  $T, s$ - и  $i, s$ -диаграммах имеют вид, показанный на рис. 9.5.

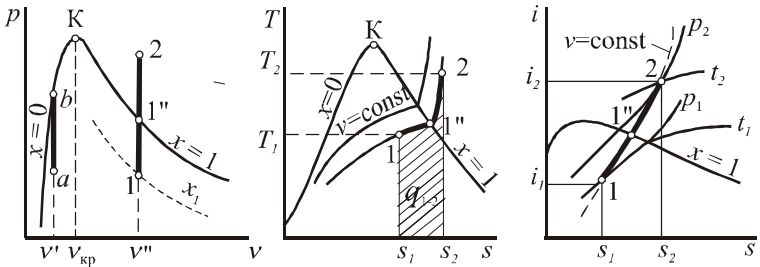


Рис. 9.5. Изохорное изменение состояния пара

Для всех изохорных процессов влажного пара возможны два случая: первый, когда удельный объем меньше критического (процесс  $a-b$  в  $p, v$ -диаграмме рис. 9.5); второй, когда удельный объем больше критического (процесс  $1-2$  на  $p, v$ -диаграмме).

При подводе теплоты к влажному пару в первом случае происходит уменьшение степени сухости влажного пара и в точке  $b$  пересечения изохоры с пограничной кривой жидкости влажный пар полностью превращается в воду. При этом температура и давление повышаются. Во втором случае подвод теплоты к влажному пару приводит к повышению степени сухости влажного пара. В точке  $1''$  пар становится сухим насыщенным. Дальнейший подвод теплоты к пару приводит к его перегреву.

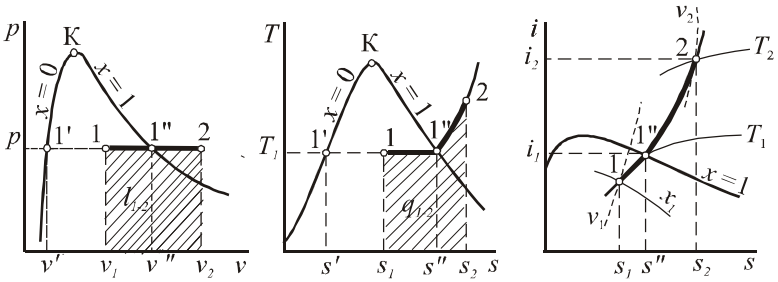
Так как в изохорном процессе  $dn = 0$ , то внешняя работа в нем равна нулю и подводимое количество теплоты  $q_{1-2}$  в данном процессе расходуется на изменение его внутренней энергии, то есть

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 = (i_2 - p_2 n) - (i_1 - p_1 n) = i_2 - i_1 - n(p_2 - p_1). \quad (9.34)$$

На  $T, s$ -диаграмме количество теплоты  $q_{1-2}$ , подведенное в изохорном процессе, изображается заштрихованной площадью.

### Изобарный процесс

На рис. 9.6 приведен изобарный процесс в  $p, v$ -,  $T, s$ - и  $i, s$ -диаграммах. На  $p, v$ -диаграмме изобара изображается горизонтальной прямой  $1-2$ . В области влажного насыщенного пара изобара является одновременно и изотермой. При подводе теплоты к влажному насыщенному пару степень сухости его увеличивается и влажный пар при  $T = \text{const}$  переходит в сухой насыщенный пар, а затем в перегретый.



**Рис. 9.6. Изобарное изменение состояния пара**

Количество теплоты, подводимое к пару в изобарном процессе, рассчитывается по уравнению

$$q_{1-2} = i_2 - i_1. \quad (9.35)$$

На  $T, s$  - диаграмме это количество теплоты равно заштрихованной площади 1-2- $s_2$ - $s_1$ , а на  $i, s$  - диаграмме оно равно разности ординат точек 2 и 1.

Работа процесса расширения на  $p, v$  - диаграмме равна заштрихованной площади 1-2- $v_2$ - $v_1$  и определяется по уравнению

$$l_{1-2} = p(n_2 - n_1). \quad (9.36)$$

Изменение внутренней энергии пара в изобарном процессе

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - pn_2) - (i_1 - pn_1) = i_2 - i_1 - p(n_2 - n_1). \quad (9.37)$$

Для процесса, протекающего в области влажного пара при  $p = \text{const}$  по уравнению (9.24) имеем

$$n_1 = n' + x_1(n'' - n'); \quad (9.38)$$

$$n_2 = n'' + x_2(n'' - n'). \quad (9.39)$$

Отсюда находим

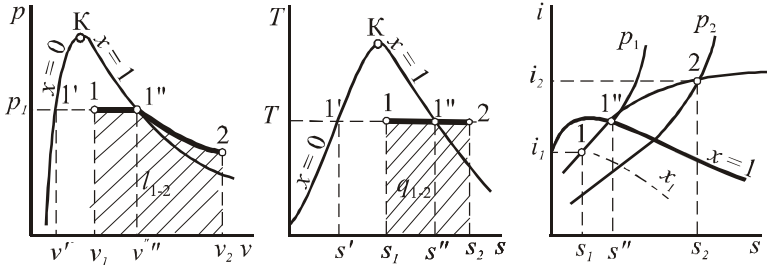
$$x_2 = \frac{x_1(n_2 - n')}{n_1 - n'}. \quad (9.40)$$

Удельные объемы  $n'$ ,  $n''$  определяются по таблицам насыщенного пара при заданном  $p = \text{const}$ .



### Изотермический процесс

Изотермический процесс 1–2 в различных диаграммах изображен на рис. 9.7. Начальная точка 1 лежит в области влажного насыщенного пара, а конечная точка 2 – в области перегретого пара.



**Рис. 9.7. Изотермическое изменение состояния пара**

В области влажного пара в  $p, v$ -диаграмме изотерма изображается горизонтальной прямой, которая одновременно является изобарой. В области перегретого пара она переходит в гиперболическую кривую. Из  $p, v$ -диаграммы видно, что при изотермическом перегреве пара его давление уменьшается.

В  $T, s$ -диаграмме изотермический процесс полностью изображается отрезком горизонтальной прямой.

В  $i, s$ -диаграмме изотерма в области влажного пара представляет собой наклонную прямую, которая одновременно является изобарой, а в области перегретого пара – кривую, направленную выпуклостью вверх.

Удельное количество теплоты, подведенное в изотермическом процессе 1–2 (расширение пара), определяется по формуле

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1). \quad (9.41)$$

В  $T, s$ -диаграмме количество теплоты  $q_{1-2}$  равно заштрихованной площади 1–2– $s_2$ – $s_1$ .

Для водяного пара, как и для любого реального газа, внутренняя энергия в изотермическом процессе в отличие от внутренней энергии идеального газа изменяется вследствие изменения потенциальной энергии сил взаимодействия между молекулами. Изменение внутренней энергии можно определить по формуле

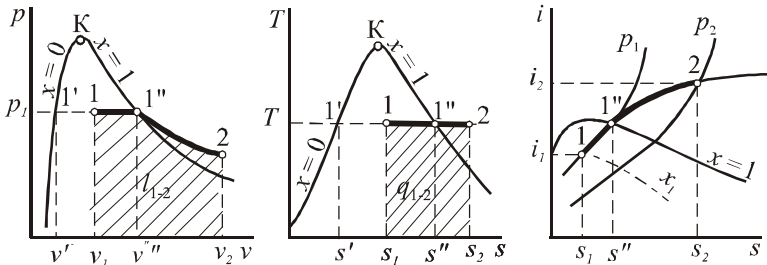
$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - p_2 n_2) - (i_1 - p_1 n_1) = i_2 - i_1 - (p_2 n_2 - p_1 n_1). \quad (9.42)$$

Работа расширения пара определяется из уравнения

$$l = q - \Delta u = T(s_2 - s_1) - (i_2 - i_1) + (p_2 n_2 - p_1 n_1). \quad (9.43)$$

### Адиабатный процесс

На рис. 9.8. приведен адиабатный процесс расширения водяного пара в  $p, v$ -,  $T, s$ - и  $i, s$ - диаграммах.



**Рис. 9.8. Адиабатное изменение состояния водяного пара**

Равновесный адиабатный процесс протекает при постоянстве энтропии, поэтому на  $T, s$ - и  $i, s$ - диаграммах адиабаты изображаются вертикальными прямыми линиями.

При адиабатном расширении влажный пар либо подсушивается (процесс  $a-b$ ), либо увлажняется (процесс  $1-2$ ).

На  $p, v$ - диаграмме адиабатный процесс представляет собой кривую, напоминающую гиперболу. Эта кривая может быть приближенно описана уравнением

$$pv^k = \text{const.} \quad (9.44)$$

В этом уравнении показатель адиабаты  $k \neq c_p / c_u$  (равенство справедливо только для идеального газа), а является чисто эмпирической величиной. В области влажного насыщенного пара показатель степени  $k$  определяется по выражению  $k = 1,035 + 0,1x$ . Значение степени сухости  $x$  влажного пара при его расширении принимается в начальном, а при сжатии – в конечном состоянии процесса. Для адиабаты, начинающейся или заканчивающейся на пограничной кривой пара (при  $x = 1$ ), коэффициент  $k = 1,135$ . Для адиабаты, полностью расположенной в области перегретого пара, показатель адиабаты  $k = 1,3$ . Точный расчет адиабатных процессов производится с помощью справочных таблиц.

Для адиабатного процесса  $q_{1-2} = 0$ , и следовательно работа адиабатного процесса определяется из соотношения

$$l_{1-2} = -\Delta u = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 n_1) - (i_2 - p_2 n_2) = i_1 - i_2 - (p_1 n_1 - p_2 n_2). \quad (9.45)$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = (i_2 - p_2 n_2) - (i_1 - p_1 n_1). \quad (9.46)$$

## ЗАДАЧИ

1. Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию сухого насыщенного пара при давлении  $p = 0,1$  МПа.

2. Сухой насыщенный пар имеет давление  $p = 0,5$  МПа. Определить все остальные параметры пара.

3. При давлении  $p = 1,0$  МПа вода нагрета до  $170^\circ\text{C}$ . Наступило ли кипение? На сколько градусов нужно нагреть воду, чтобы началось кипение?

4. На паропроводе насыщенного пара установлен термометр, показывающий  $140^\circ\text{C}$ . Каково было бы показание манометра на этом паропроводе?

5. Манометр парового котла показывает давление  $p = 0,5$  МПа. Показание барометра  $p = 0,1$  МПа. Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем, плотность и энтальпию.

6. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 0,6$  МПа, а удельный объем  $v = 0,3$  м<sup>3</sup>/кг.

*Решение*

Давлению 0,6 МПа соответствует удельный объем сухого насыщенного пара  $v'' = 0,3156$  м<sup>3</sup>/кг. Так как для заданного состояния  $v'' > v$ , то пар является влажным. Степень сухости пара определяется по уравнению

$$x = \frac{n_x - n'}{n'' - n'} = \frac{0,3 - 0,0011}{0,3156 - 0,0011} = 0,95.$$

7. Найти состояние водяного пара, если давление его  $p = 1$  МПа, а степень сухости  $x = 0,95$ .

8. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию 6 м<sup>3</sup> насыщенного водяного пара при давлении  $p = 1,2$  МПа и степени сухости пара  $x = 0,9$ .

*Решение*

Удельный объем влажного пара определяем по формуле

$$n_x = n''x + (1 - x)n'.$$

Для степеней сухости пара  $x > 0,8$  и для давлений до 3 МПа можно пренебречь последним членом равенства, тогда удельный объем влажного пара

$$n_x = n''x = 0,1633 \cdot 0,9 = 0,147 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса пара

$$M = \frac{V}{n} = \frac{6}{0,147} = 40,8 \text{ кг}.$$

Внутренняя энергия пара

$$U_x = M(i_x - p n_x).$$

Энтальпия пара

$$I_x = M i_x = 40,8(798,3 + 1987 \cdot 0,9) = 105521 \text{ кДж}.$$

Следовательно,

$$U_x = 40,8(2586,3 - 1,2 \cdot 10^3 \cdot 0,147) = 98324 \text{ кДж}.$$

Энтропия пара

$$\begin{aligned} S_x &= M s_x = M[s' + (s'' - s')x] = 40,8[2,216 + 0,9(6,523 - 2,216)] = \\ &= 40,8 \cdot 6,092 = 248,6 \text{ кДж} / \text{К}. \end{aligned}$$

**9.** Найти массу  $50 \text{ м}^3$  пара при давлении  $p = 1,2 \text{ МПа}$  и степени сухости пара  $x = 0,9$ .

**10.** Определить массу  $20 \text{ м}^3$  пара при давлении  $p = 1,5 \text{ МПа}$  и степени влажности  $10\%$ .

**11.** Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение  $1 \text{ кг}$  пара при давлении  $p = 1,2 \text{ МПа}$  и степени сухости пара  $x = 0,9$ , если температура питательной воды  $40^\circ\text{C}$ .

**12.** Определить количество теплоты, затрачиваемой на перегрев  $1 \text{ кг}$  влажного пара при давлении  $p = 1,5 \text{ МПа}$ . и степени сухости пара  $x = 0,92$  до температуры  $340^\circ\text{C}$ .

**13.** Через пароперегреватель парового котла проходит  $10 \text{ т}$  пара в час. Степень сухости пара до пароперегревателя  $x = 0,98$ , а давление  $p = 6 \text{ МПа}$ . Температура пара после пароперегревателя  $500^\circ\text{C}$ . Определить количество теплоты, воспринятой пароперегревателем, принимая его КПД равным  $0,98$ .

**14.** Найти диаметр паропровода, по которому протекает сухой насыщенный пар при давлении  $p = 1,5 \text{ МПа}$ . Расход пара  $M = 600 \text{ кг/ч}$ . Скорость пара  $w = 40 \text{ м/с}$ .

**15.** Паровая турбина расходует  $55000 \text{ кг/ч}$  пара. Отработавший в турбине пар поступает в конденсатор при давлении  $p = 0,004 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,94$ . Определить часовый расход охлаждающей воды, если ее начальная температура  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , а конечная  $t_2 = 24^\circ\text{C}$ . Температура конденсата соответствует температуре насыщения.

**16.** В паровом котле находится  $25 \text{ м}^3$  воды при давлении  $3,5 \text{ МПа}$  и температуре насыщения. Какое количество пара по массе и объему образовалось бы в котле, если бы давление в нем упало до  $0,1 \text{ МПа}$ ?

17. В пароперегреватель парового котла поступает пар в количестве  $G = 10$  т/ч при давлении  $p = 5$  МПа и со степенью сухости  $x = 0,98$ . Количество теплоты, сообщаемой пару в пароперегревателе при постоянном давлении, составляет 5650 МДж/ч. Определить температуру пара на выходе из пароперегревателя.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие кривые на диаграммах водяного пара называются пограничными кривыми?
2. Как называется точка, в которой сходятся нижняя и верхняя пограничные кривые?
3. Что называется степенью сухости водяного пара?
4. Какой пар называется сухим насыщенным?
5. Что называется степенью влажности водяного пара?
6. Какой пар называется перегретым?
7. Что называется степенью перегрева водяного пара и как она определяется?
8. Какие значения удельной энтальпии, энтропии и внутренней энергии воды в тройной точке приняты в технической термодинамике?
9. Что называется удельной теплотой воды?
10. Что называется удельной теплотой парообразования?
11. Что называется внутренней и внешней теплотой парообразования?
12. Как изменяется теплота парообразования с повышением температуры и давления?
13. Как изменяется температура, удельный объем, энтальпия, энтропия и плотность пара с увеличением степени перегрева сухого насыщенного пара?
14. Что называется теплотой перегрева и как она определяется?
15. Чему равна площадь под линией процесса в  $T, s$  - диаграмме?
16. Какой пар называется влажным насыщенным?
17. Как изменяется степень сухости пара при подводе к нему теплоты в изохорном процессе?
18. Изменяется ли внутренняя энергия в изотермическом процессе?
19. Как определяется показатель адиабаты в области влажного насыщенного пара?

## 10. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

### 10.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовой смеси. В теплотехнике с влажным воздухом приходится иметь дело в процессе сушки материалов, а также в случаях использования воздуха в качестве теплоносителя в контактных теплообменниках.

Сухой воздух в нижних слоях атмосферы имеет практически постоянный состав в любом районе земного шара благодаря постоянно протекающей диффузии (таблица 10.1).

Таблица 10.1

**Состав атмосферного воздуха (сухого)**

Газ	Содержание, об. %	Молекулярная масса
Азот	78,09	28,016
Кислород	20,95	32,000
Аргон	0,93	39,944
Углекислый газ	0,03	44,010
Неон	$1,80 \cdot 10^{-3}$	20,183
Гелий	$5,24 \cdot 10^{-4}$	4,003
Криптон	$1,0 \cdot 10^{-4}$	83,80
Ксенон	$8,0 \cdot 10^{-6}$	131,30
Водород	$5,0 \cdot 10^{-5}$	2,016
Озон	$1,0 \cdot 10^{-6}$	48,000

*Примечание.* Средняя молекулярная масса сухого воздуха 28,96

В теплотехнике рассматривают влажный воздух как смесь двух газов – сухого воздуха с молекулярной массой  $\mu_v = 28,966$  и водяного пара с молекулярной массой  $\mu_n = 18,016$ , по отношению к которой нельзя воспользоваться общими для газовых смесей закономерностями. Это связано с тем, что количество водяного пара во влажном воздухе не может быть произвольным, в зависимости от температуры и давления смеси оно не может превышать определенной величины.

Рассматривая влажный воздух при сравнительно невысоких (близких к атмосферному) давлениях, можно рассматривать сухой воздух и содержащийся в нем водяной пар как идеальные газы.

По закону Дальтона давление влажного воздуха

$$p = p_v + p_n, \quad (10.1)$$

где  $p$  – давление влажного воздуха,  $p_v$  – парциальное давление сухого воздуха,  $p_n$  – парциальное давление водяного пара.

Максимальное парциальное давление водяного пара при заданной температуре называется **давлением насыщения** и обозначается  $p_s$ .

Влажный воздух, содержащий максимально возможное количество водяного пара при заданной температуре называется **насыщенным**.

Влажный воздух, в котором парциальное давление пара  $p_n$  меньше  $p_s$ , называется **ненасыщенным**. При этом водяной пар, содержащийся в нем, находится в перегретом состоянии.

Если ненасыщенный влажный воздух охлаждать при постоянном давлении, то можно достигнуть состояния, при котором  $p_n$  станет равным  $p_s$ . Температура влажного воздуха, при которой парциальное давление пара становится равным давлению насыщения называется **температурой точки росы**.

При дальнейшем охлаждении пар станет влажным и начнет конденсироваться.

Основными характеристиками влажного воздуха являются относительная влажность, влагосодержание и степень насыщения.

Относительной влажностью  $j$  называют отношение парциального давления водяного пара  $p_n$ , содержащегося во влажном воздухе, к давлению насыщения водяного пара при данной температуре  $p_s$  (то есть к максимально возможному парциальному давлению водяного пара при этой температуре):

$$\varphi = \frac{p_n}{p_s}. \quad (10.2)$$

Значение  $\varphi$  можно выражать в долях единицы или в процентах. Относительная влажность может изменяться от 0 до 1 (или от 0 до 100 %). Значение  $\varphi = 0$  соответствует сухому воздуху,  $\varphi = 1$  – насыщенному.

Влагосодержание  $x$  влажного воздуха – это отношение массы водяного пара  $m_n$ , содержащегося во влажном воздухе, к массе  $m_b$  сухого воздуха:

$$x = \frac{m_n}{m_b}. \quad (10.3)$$

Величина  $x$  определяет массу пара, содержащегося в 1 кг сухого воздуха или в  $(1 + x)$  кг влажного воздуха. Величину влагосодержания  $x$  можно определить, записав универсальное уравнение состояния идеального газа  $pV = m/\mu R_\mu T$  для сухого воздуха и водяного пара, выразив из них массы сухого воздуха и водяного пара и подставив их в выражение (10.3). В результате получаем

$$x = \frac{\mu_n p_n}{\mu_b p_b}, \quad (10.4)$$

где  $\mu_v$  и  $\mu_n$  – молекулярные массы сухого воздуха и водяного пара.

Подставляя численные значения молекулярных масс сухого воздуха и водяного пара в уравнение (10.4) и с учетом (10.1) получаем

$$x = 0,622 \frac{P_n}{p - P_n} \quad (10.5)$$

Для измерения влажности часто применяют прибор – психрометр, который состоит из сухого и мокрого термометров. С помощью специальных психометрических таблиц по температурам сухого и мокрого термометров можно определить относительную влажность воздуха.

В мокром термометре ртутный шарик обернут тканью, смоченной водой. Влажный воздух принудительно омывает головки термометров. Сухой термометр показывает температуру влажного воздуха, а мокрый термометр – температуру воды, содержащейся во влажной ткани. При обдуве, если воздух не насыщенный водяным паром, происходит испарение воды с поверхности ткани и температура ткани и показания термометра понижаются. Теплота, необходимая для парообразования, отбирается от воздуха. Температура воздуха при этом снижается, и это же количество теплоты, идущее на парообразование, возвращается воздуху с водяным паром. Следовательно, процесс является адиабатным.

Другими словами, температура мокрого термометра – это температура насыщения воздуха при постоянной энтальпии, а температура точки росы – это температура насыщения воздуха при постоянном влагосодержании.

*Плотность* влажного воздуха можно определить из уравнения состояния (2.5):

$$\rho = \frac{P}{R_{cm} T}, \quad (10.6)$$

где  $R_{cm}$  – газовая постоянная влажного воздуха, численное значение которой можно рассчитать по уравнению (2.21):

$$R_{cm} = \frac{8314}{\frac{p - P_n}{p} 28,96 + \frac{P_n}{p} 18,016}. \quad (10.7)$$

Подставляя уравнение (10.7) в уравнение (10.6) после преобразования получим плотность влажного воздуха:

$$\rho = \frac{28,96p - 10,94P_n}{8314T}. \quad (10.8)$$



Из этого соотношения следует, что чем больше влажность воздуха (то есть, чем выше парциальное давление водяного пара в воздухе), тем меньше плотность воздуха. Следовательно, влажный воздух всегда легче, чем сухой.

Энтальпия влажного воздуха  $I$  рассчитывается как сумма энтальпий 1 кг сухого воздуха и  $x$  кг водяного пара, то есть

$$I = i_{\text{в}} + x i_{\text{п}}. \quad (10.9)$$

Энтальпия 1 кг сухого воздуха

$$i_{\text{в}} = c_{\text{пв}} t \quad (10.10)$$

Энтальпия перегретого водяного пара при температуре  $t$  и давлении  $p$  рассчитывается по формуле

$$i_{\text{п}} = r_0 + \int_0^t c_{\text{пн}} dt + \int_{p_0}^p \left( \frac{\partial t}{\partial p} \right)_T dp, \quad (10.11)$$

где  $r_0$  – скрытая теплота парообразования при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $c_{\text{пн}}$  – теплоемкость водяного пара на изобаре;  $p_0 \approx 611$  Па (давление насыщения при  $t = 0^\circ\text{C}$ ).

Последнее слагаемое определяет изменение энтальпии с повышением давления на изотерме  $t$ .

Рассматривая пар как идеальный газ, для которого теплоемкость и удельная энтальпия не зависят от давления, уравнение (10.10) можно записать в виде

$$i_{\text{п}} = r_0 + c_{\text{пн}} t. \quad (10.12)$$

Подставив в уравнение (10.12) численные значения теплоемкости и удельной теплоты парообразования, получаем:

$$i_{\text{п}} = 2501 + 1,93t, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (10.13)$$

После подстановки в уравнение (10.9) значений  $i_{\text{в}}$  и  $i_{\text{п}}$  из уравнений (10.10) и (10.13), уравнение для определения энтальпии влажного воздуха примет вид

$$I = t + x(2501 + 1,93t), \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (10.14)$$

## 10.2. $I, x$ - ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

При различных расчетах и исследованиях термодинамических процессов, проходящих при давлении близком к атмосферному и связанных с влажным воздухом, удобно пользоваться  $I, x$  - диаграммой, предложенной русским ученым Л. К. Рамзиным.  $I, x$  - диаграмма влажного воздуха показана на рис. 10.1. В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание  $x$ , а по оси ординат – энтальпия влажного воздуха (на 1 кг сухого воздуха).

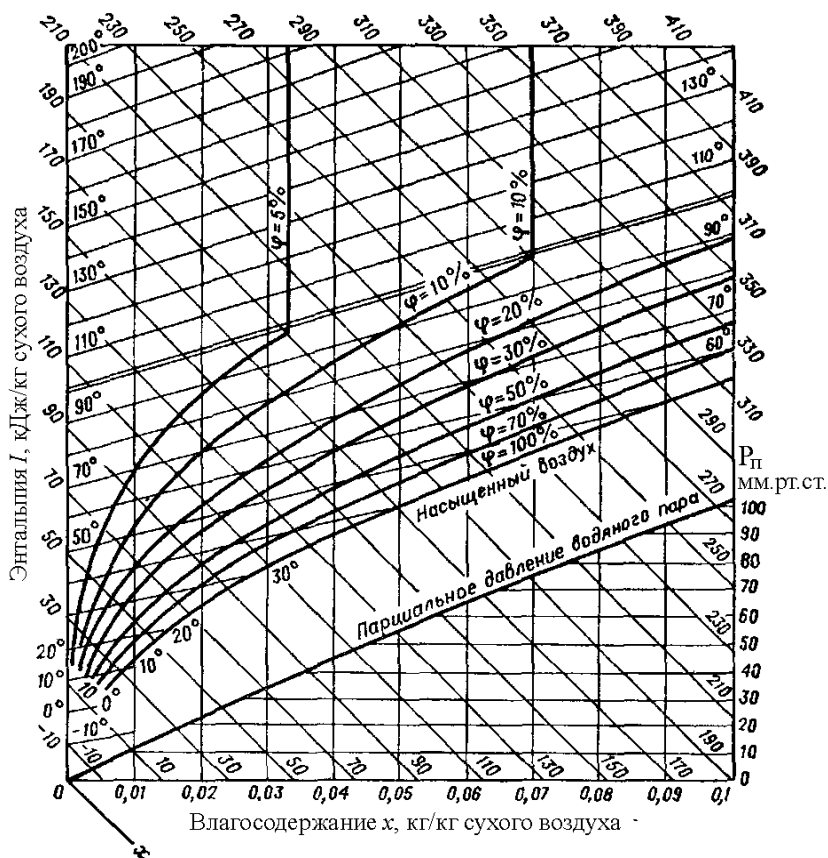


Рис. 10.1.  $I, x$  - диаграмма влажного воздуха

Диаграмма строится в косоугольных координатах с углом между адиабатами и линиями постоянных влагосодержаний, равным  $135^{\circ}$ . За начало координат принята точка 0, в которой температура, влагосодержание и энтальпия равны 0. На  $I, x$  - диаграмме представлены линии отражающие зависимость  $I = f(x)$ ,  $t = \text{const}$ ,  $\phi = \text{const}$ , и линия парциальных давлений водяного пара  $p_n$  содержащегося в воздухе.

Линия  $\phi = 100\%$  – пограничная кривая, которая характеризует состояние насыщенного воздуха. Выше этой кривой водяной пар, содержащийся в воздухе, находится в перегретом состоянии, а ниже – во влажном состоянии (область тумана). Любая точка  $I, x$  - диаграммы характеризует определенное состояние влажного воздуха, а изменение этого состояния характеризуется линией процесса.

$I, x$  - диаграмма позволяет по любым двум параметрам влажного воздуха определить все остальные параметры.

Процессы, проходящие при кондиционировании воздуха, в сушильных камерах, а также в контактных теплообменниках, где одним из теплоносителей является влажный воздух, полностью могут быть изображены в  $I, x$  – диаграмме. С достаточной точностью для теплотехнических расчетов можно применять  $I, x$  - диаграмму влажного воздуха для определения изменения параметров и построения процессов, проходящих с газовой смесью воздуха и топочных газов. Примеры расчет с использованием  $I, x$  - диаграмм приведены в работах [3, 4].

$I, x$  - диаграмма позволяет весьма просто исследовать процесс смешения двух потоков влажного воздуха. Для этого строятся точки, соответствующие параметрам одного и второго потока, точки соединяются линией, которая делится точкой на две части, пропорциональные массе (массовому расходу) потоков. Точка разбиения и будет определять параметры смеси.

## ЗАДАЧИ

1. Определить влагосодержание воздуха при температуре  $t = 50^{\circ}\text{C}$  и барометрическом давлении  $B = 745$  мм рт. ст., если относительная влажность воздуха  $\phi = 70\%$ .

2. Определить с помощью  $I, x$  - диаграммы влажного воздуха все параметры воздуха, если известна температура мокрого термометра  $t_m = 30^{\circ}\text{C}$  и температура точки росы  $t_p = 20^{\circ}\text{C}$ .

3. Наружный воздух, имеющий температуру  $t = 20^{\circ}\text{C}$  и влагосодержание  $x = 0,01$  кг/кг сухого воздуха, подогревается до температуры  $t = 50^{\circ}\text{C}$ . Определить относительную влажность и плотность наружного и подогретого воздуха.

4. Во влажный воздух с параметрами  $\phi = 10\%$  и  $t = 80^\circ\text{C}$  испаряется вода при адиабатных условиях. Относительная влажность при этом повышается до  $90\%$ . Определить температуру и влагосодержание воздуха в конечном состоянии.

5. Для сушки используют воздух при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и влагосодержании  $x = 0,005$  кг/кг сухого воздуха. В калорифере его подогревают до  $t_2 = 90^\circ\text{C}$  и направляют в сушильную камеру, откуда он выходит при температуре  $t_b = 40^\circ\text{C}$ . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и удельный расход теплоты на сушку.

6. Газовый двигатель всасывает  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $t_b = 30^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\phi = 50\%$ . Какое количество водяного пара всасывает двигатель в час?

7. Для использования теплоты газов, уходящих из паровых котлов, в газоходах последних устанавливают водоподогреватели, называемые водяными экономайзерами. Минимально допустимая температура воды, поступающей в экономайзер, должна быть по крайней мере на  $10^\circ\text{C}$  выше точки росы водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. В противном случае возможна конденсация паров на трубах экономайзера и коррозия металла, особенно если в уходящих газах присутствует продукт сгорания серы  $\text{SO}_2$ . Определить допускаемую температуру питательной воды, если масса продуктов сгорания  $G_{\text{пс}} = 9,6$  кг/кг, а масса водяных паров в продуктах сгорания  $G_{\text{п}} = 0,46 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Давление продуктов сгорания в газоходе экономайзера равно  $745 \text{ мм рт. ст.}$

8. Определить параметры смеси, состоящей из двух равных частей воздуха со следующими параметрами:  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и влагосодержании  $x_1 = 0,005$  кг/кг сухого воздуха;  $t_2 = 90^\circ\text{C}$  и относительная влажность  $\phi = 10\%$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой воздух называется насыщенным?
2. В каком состоянии водяной пар находится в ненасыщенном воздухе?
3. Что называется температурой точки росы?
4. Что называется относительной влажностью воздуха?
5. Что называется влагосодержанием воздуха?
6. Как определяется влагосодержание влажного воздуха?
7. Как определяется плотность влажного воздуха?
8. Как рассчитывается энтальпия влажного воздуха?

## ТЕСТЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

### Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**1. Как называется термодинамическая система, между любыми частями которой нет поверхностей раздела**

- а) открытой
- б) закрытой
- в) гомогенной
- г) гетерогенной
- д) адиабатной

**2. Как называется термодинамическая система, состоящая из отдельных частей, разграниченных поверхностями раздела**

- а) открытой
- б) закрытой
- в) гомогенной
- г) гетерогенной
- д) адиабатной

**3. Однородная часть гетерогенной системы называется...**

- а) фазой
- б) границей
- в) окружающей средой
- г) оболочкой

**4. Какие термодинамические системы называются открытыми?**

- а) системы, которые обмениваются веществом с другими системами или с окружающей средой
- б) системы, у которых отсутствует теплообмен с другими системами или с окружающей средой
- в) системы, которые обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой
- г) системы, которые не обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой
- д) понятия «открытые системы» не существует

**5. Какие термодинамические системы называются адиабатными?**

- а) системы, которые обмениваются веществом с другими или с окружающей средой
- б) системы, у которых отсутствует теплообмен с другими системами или с окружающей средой
- в) системы, которые обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой
- г) системы, которые не обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой
- д) понятия «адиабатные системы» не существует

**6. Какие термодинамические системы называются изолированными?**

- а) системы, которые обмениваются веществом с другими или с окружающей средой
- б) системы, у которых отсутствует теплообмен с другими системами или с окружающей средой
- в) системы, которые обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой
- г) системы, которые не обмениваются веществом и энергией с другими системами или с окружающей средой

**7. Состояние термодинамической системы, при котором значения параметров во всех частях ее остаются неизменными во времени, называется**

**8. Если значения параметров изменяются во времени, то состояние термодинамической системы называется \_\_\_\_\_**

**9. Термодинамический процесс, происходящий при постоянной температуре системы, называется**

- а) изотермический
- б) изобарный
- в) изохорный
- д) адиабатный

**10. Термодинамический процесс, происходящий при постоянном давлении, называется**

- а) изотермический
- б) изобарный
- в) изохорный
- д) адиабатный

**11. Термодинамический процесс, происходящий при постоянной объеме, называется**

- а) изотермический
- б) изобарный
- в) изохорный
- д) адиабатный

**12. Термодинамический процесс, происходящий при отсутствии теплообмена с окружающей средой, называется**

- а) изотермический
- б) изобарный
- в) изохорный
- д) адиабатный

**13. Свойства, не зависящие от количества вещества в системе, называются**

- а) интенсивными
- б) экстенсивными
- в) постоянными
- г) независимыми

14. Свойства, зависящие от количества вещества в системе, называются

- а) интенсивными
- б) экстенсивными
- в) постоянными
- г) независимыми
- д) зависимыми

15. Переведите  $500^{\circ}\text{C}$  в шкалу Кельвина \_\_\_\_\_

16. Переведите  $500\text{K}$  в шкалу Цельсия \_\_\_\_\_

17. Разность температур составляет  $300\text{K}$ . Какой величины эта разность будет в градусах Цельсия? \_\_\_\_\_

18. Атмосферное давление  $101\text{ кПа}$ . Избыточное давление в сосуде  $26\text{ кПа}$ . Какое в сосуде абсолютное давление? \_\_\_\_\_

19. Атмосферное давление  $101\text{ кПа}$ . Разрежение в сосуде  $26\text{ кПа}$ . Какое в сосуде абсолютное давление? \_\_\_\_\_

20. Переведите  $1\text{ мм вод. ст.}$  в  $\text{Па}$  \_\_\_\_\_

21. Переведите  $1\text{ кгс/см}^2$  в  $\text{Па}$  \_\_\_\_\_

22. Связь между удельным объемом  $v$ , массой  $m$ , объемом  $V$

- а)  $v = V/m$
- б)  $v = V \cdot m$
- в)  $v = m / V$
- г)  $v = V/m^2$
- д)  $v = m/V^2$

23. Связь между плотностью  $\rho$ , массой  $m$ , объемом  $V$

- а)  $v = V/m$
- б)  $v = V \cdot m$
- в)  $v = m / V$
- г)  $v = V/m^2$
- д)  $v = m/V^2$

## Глава 2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

24. Закон Бойля-Мариотта:

- а)  $pV = \text{const}$
- б)  $pV = \text{const}$
- в)  $pT = \text{const}$
- г)  $\rho T = \text{const}$
- д)  $vT = \text{const}$

25. Закон Гей-Люссака:

- а)  $V = V_0(1 - \alpha t)$
- б)  $V = V_0(1 + \alpha t)$
- в)  $V = V_0 \cdot \alpha t$
- г)  $V = V_0/(\alpha t)$

**26. Уравнение Клапейрона:**

- а)  $p\nu = RT$
- б)  $p\nu = R/T$
- в)  $p/\nu = RT$
- г)  $p/\nu = R/T$
- д)  $p\nu = T/R$

**27. Физический смысл удельной газовой постоянной**

- а) работа, совершаемая 1 кг газа в процессе при постоянном давлении и изменении температуры на один градус
- б) теплоемкость газа
- в) работа, совершаемая 1 кг газа в процессе при постоянном объеме и изменении температуры на один градус
- г) работа, совершаемая молекул газа в процессе при постоянном давлении и изменении температуры на один градус
- д) работа, совершаемая 1 кг газа в процессе при постоянном объеме и изменении температуры на один градус

**28. От чего зависит удельная газовая постоянная?**

- а) от молярной массы газа
- б) от температуры газа
- в) от давления газа
- г) от параметров окружающей среды

**29. Связь между газовой постоянной  $R$  и универсальной газовой постоянной  $R_m$  ( $m$  – молярная масса)**

- а)  $R = \mu R_\mu$
- б)  $R_\mu = \mu R$
- в)  $R_\mu = 4,19 \cdot R$
- г)  $R_\mu = R/4,19$

**30. Чему равна универсальная газовая постоянная**

- 4,186 Дж
- 8,3142 Дж/(моль·К)
- 22,4 м<sup>3</sup>/моль
- 101325 Па
- 273,15 К

**31. Давление, которое бы создавал газ, входящий в газовую смесь, если бы он один занимал весь объем газовой смеси, называется \_\_\_\_\_****32. Общее давление газовой смеси состоит из:**

- а) парциального давления компонента смеси, имеющего наибольшую долю
- б) парциального давления компонента смеси, имеющего наименьшую долю
- в) суммы парциальных давлений всех компонентов
- г) произведения парциальных давлений всех компонентов



### Глава 3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

#### 33. Что такое удельная теплоемкость

- а) удельное теплосодержание вещества
- б) общее теплосодержание системы
- в) количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг вещества
- г) количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг вещества на один градус
- д) количество теплоты, необходимое для нагрева 1 моль вещества

34. Какая удельная теплоемкость вещества, в  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , если для нагрева 2 кг от 20 до 80°C затрачено 180 кДж теплоты? \_\_\_\_\_

#### 35. Как определяется средняя теплоемкость тела

- а)  $c = dq/dt$
- б)  $c = dq \cdot dt$
- в)  $c = q_{1-2}/(t_1 - t_2)$
- г)  $c = q_{1-2}/t_1$
- д)  $c = q_{1-2}/t_2$

#### 36. Как определяется истинная теплоемкость тела

- а)  $c = dq/dt$
- б)  $c = dq \cdot dt$
- в)  $c = q_{1-2}/(t_1 - t_2)$
- г)  $c = q_{1-2}/t_1$
- д)  $c = q_{1-2}/t_2$

#### 37. Размерность удельной массовой теплоемкости

- а)  $\text{кДж}/\text{кг}$
- б)  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
- в)  $\text{кДж}/\text{K}$
- г)  $\text{кДж}\cdot\text{кг}/\text{K}$
- д)  $\text{кДж}\cdot\text{K}/\text{кг}$

#### 38. Чему равна разность удельной массовой изобарной и изохорной теплоемкостей для идеальных газов

- а)  $c$
- б)  $\mu$
- в)  $q$
- г)  $R$
- д)  $R_\mu$

### Глава 4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

#### 39. Первый закон термодинамики для рабочего тела, находящегося в относительном покое, выражается уравнением:

- а)  $dq = du + di$
- б)  $dl = p dv$
- в)  $p dv = d(vp) - v dp$

г)  $dl = d(vp)$

д)  $dq = du + dl$

**40. Какая формулировка не соответствует первому закону термодинамики**

- а) вечный двигатель второго рода невозможен
- б) энергия не возникает и не уничтожается
- в) вечный двигатель первого рода невозможен
- г) энергия изолированной системы – есть величина постоянная
- д) все виды энергии могут взаимно превращаться в строго равных между собой количествах

**41. Единицы измерения расхода теплоты, энергии, работы, эксергии?**

- а) Дж/(К·кг)
- б) Дж
- в) Вт
- г) Дж/К
- д) Дж/м<sup>3</sup>

**42. Теплота, подведенная к системе, в технической термодинамике считается**

- а) положительной
- б) отрицательной
- в) избыточной
- г) адиабатной
- д) удельной

**43. Теплота, отведенная от системы, в технической термодинамике считается**

- а) положительной
- б) отрицательной
- в) избыточной
- г) адиабатной
- д) удельной

**44. Работа, совершаемая системой, в технической термодинамике считается**

- а) положительной
- б) отрицательной
- в) избыточной
- г) адиабатной
- д) удельной

**45. Работа, совершаемая над системой, в технической термодинамике считается**

- а) положительной
- б) отрицательной
- в) избыточной
- г) адиабатной
- д) удельной

**46. Что такое работа расширения (или сжатия)?**

- а) работа, совершаемая за счет изменения давления
- б) работа, совершаемая за счет изменения объема
- в) работа, совершаемая за счет изменения давления и объема
- г) работа, совершаемая за счет изменения внутренней энергии
- д) работа, совершаемая только при изменении энтальпии

**47. Как определяется работа расширения (или сжатия)?**

- а)  $dl = vdp$
- б)  $dl = pdv$
- в)  $dl = pdT$
- г)  $dl = Tdp$
- д)  $dl = Tdv$
- е)  $dl = vdT$

**48. Что такое располагаемая работа?**

- а) работа, совершаемая за счет изменения давления
- б) работа, совершаемая за счет изменения объема
- в) работа, совершаемая за счет изменения и давления и объема
- г) работа, совершаемая за счет изменения внутренней энергии
- д) работа, совершаемая только при изменении энтальпии

**49. Как определяется располагаемая работа?**

- а)  $dl = vdp$
- б)  $dl = pdv$
- в)  $dl = pdT$
- г)  $dl = Tdp$
- д)  $dl = Tdv$
- е)  $dl = vdT$

**50. Как определяется удельная энтальпия**

- а)  $i = u + pv$
- б)  $i = u - pv$
- в)  $i = l + pv$
- г)  $i = l - pv$

**51. Как определяется удельная энтальпия**

- а)  $di = dq + pdv$
- б)  $di = dq - pdv$
- в)  $di = dq + vdp$
- г)  $di = dq - vdp$

**52. Чему равна 1 кал**

- а) 4,1868 Дж
- б) 9,81 Дж
- в) 0,239 Дж
- г) 8,314 Дж
- д) 22,4 Дж

**53. При какой температуре принято, что энтальпия идеального газа равна 0?**

- а) 0 К
- б) 0°C
- в) 25 К
- г) 25 °C

## Глава 5. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

**54. В каком процессе изменение внутренней энергии равно нулю?**

- а) в изохорном
- б) в изотермическом
- в) в изобарном
- г) в адиабатном

**55. В каком процессе располагаемая работа равна нулю?**

- а) в изохорном
- б) в изотермическом
- в) в изобарном
- г) в адиабатном

**56. В каком процессе удельная работа равна нулю?**

- а) в изохорном
- б) в изотермическом
- в) в изобарном
- г) в адиабатном

**57. В каком процессе энергообмен рабочего тела с окружающей средой происходит только в форме работы?**

- а) в изохорном
- б) в изотермическом
- в) в изобарном
- г) в адиабатном

**58. Какой процесс изменения состояния рабочего тела всегда протекает при постоянной теплоемкости?**

- а) политропный
- б) изохорный
- в) изобарный
- г) изотермический
- д) адиабатный

**59. Уравнение изотермического процесса**

- а)  $p\nu^k = \text{const}$
- б)  $p^k\nu = \text{const}$
- в)  $p/\nu^k = \text{const}$
- г)  $p^k/\nu = \text{const}$
- д)  $p\nu = \text{const}$
- е)  $p/\nu = \text{const}$

**60. Уравнение адиабатного процесса**

- а)  $p v^k = \text{const}$
- б)  $p^k v = \text{const}$
- в)  $p/v^k = \text{const}$
- г)  $p^k/v = \text{const}$
- д)  $p v = \text{const}$
- е)  $p/v = \text{const}$

**Глава 6. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ****61. Какая формулировка не соответствует второму закону термодинамики**

- а) вечный двигатель второго рода невозможен
- б) вечный двигатель первого рода невозможен
- в) для перевода теплоты в работу необходимо наличие, кроме источника теплоты, охладителя более низкой температуры, то есть необходим температурный перепад
- г) природа стремится от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным

**62. Какие циклы называются прямыми?**

- а) циклы, в которых теплота превращается в положительную работу
- б) циклы, в результате которых получается отрицательная работа
- в) любой обратимый цикл
- г) любой необратимый цикл
- д) все ответы неверны

**63. Какие циклы называются обратными?**

- а) циклы, в которых теплота превращается в положительную работу
- б) циклы, в результате которых получается отрицательная работа
- в) любой обратимый цикл
- г) любой необратимый цикл
- д) все ответы неверны

**64. Из каких процессов состоит цикл Карно?**

- а) двух изохор и двух адиабат
- б) изотермы, изобары и двух адиабат
- в) двух изотерм и двух адиабат
- г) адиабаты, изохоры и двух изотерм
- д) все ответы неверны

**65. Как формулируется теорема Карно**

- а) термический КПД цикла Карно зависит от устройства двигателя и физических свойств рабочего тела
- б) термический КПД цикла Карно зависит только от абсолютных температур нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$
- в) термический КПД цикла Карно всегда меньше единицы
- г) термический КПД цикла Карно при  $T_1 = T_2$  равен нулю
- д) термический КПД цикла Карно равен единице при  $T_2 = 0$  или  $T_1 = \infty$

**66. Термический КПД цикла Карно**

- а)  $\eta_t = 1 - T_1/T_2$
- б)  $\eta_t = 1 - T_2/T_1$
- в)  $\eta_t = T_1/T_2 - 1$
- г)  $\eta_t = T_2/T_1 - 1$
- д)  $\eta_t = T_1/T_2$
- е)  $\eta_t = T_2/T_1$

**67. Математическое выражение второго закона термодинамики для обратимых процессов**

- а)  $ds > dq/T$
- б)  $ds \geq dq/T$
- в)  $ds = dq/T$
- г)  $ds \leq dq/T$
- д)  $ds < dq/T$

**68. Математическое выражение второго закона термодинамики для необратимых процессов**

- а)  $ds > dq/T$
- б)  $ds \geq dq/T$
- в)  $ds = dq/T$
- г)  $ds \leq dq/T$
- д)  $ds < dq/T$

**69. Как определяется энтропия**

- а)  $ds = dq/T$
- б)  $ds = Tdq$
- в)  $s = Tq$
- г)  $s = q/T$
- д)  $s = T/q$

**70. Как изменяется энтропия в обратимом адиабатном процессе?**

- а) энтропия является постоянной величиной
- б) возрастает
- в) уменьшается
- г) имеет вид гиперболы

**71. Как изменяется энтропия в необратимом процессе?**

- а) энтропия является постоянной величиной
- б) возрастает
- в) уменьшается
- г) имеет вид гиперболы

**72. Как изменяется энтропия системы в процессе подвода к ней теплоты**

- а) увеличивается
- б) остается постоянной
- в) уменьшается

**73. Объединенное выражение первого и второго закона термодинамики**

- а)  $Tds \geq du + vdp$

- б)  $Tds \geq du + pdv$
- в)  $Tds \geq du - vdp$
- г)  $Tds \geq du - pdv$

**74. Объединенное выражение первого и второго закона термодинамики**

- а)  $Tds \geq di + vdp$
- б)  $Tds \geq di + pdv$
- в)  $Tds \geq di - vdp$
- г)  $Tds \geq di - pdv$

## Глава 7. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

**75. Какими свойствами характеризуется идеальный газ**

- а) молекулы являются упругими шариками, движение которых подчиняется законам Ньютона
- б) газ находится в нормальных физических условиях
- в) коэффициент сжимаемости равен нулю
- г) между молекулами отсутствуют силы взаимодействия

**76. Определение коэффициента сжимаемости реального газа**

- а)  $z = pv/(RT)$
- б)  $z = c_p / c_v$
- в)  $z = T/T_0$
- г)  $z = p/p_0$
- д)  $z = pv/(\mu RT)$

**77. Чему равен коэффициент сжимаемости идеального газа**

- а) 0
- б) 1
- в) 2,72
- г) 3,14
- д) 8,314

**78. Какие значения может принимать коэффициент сжимаемости реального газа**

- а) только меньше 0
- б) только меньше 1
- в) только больше 1
- г) больше и меньше 0
- д) больше и меньше 1

**79. Что определяет величина  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса**

- а) свободный объем, в котором могут двигаться молекулы газа
- б) уменьшение объема, в котором движутся молекулы реального газа и является тем предельно минимальным объемом, до которого можно сжать 1 кг газа
- в) добавочное давление, обусловленное силами взаимодействия между молекулами реальных газов
- г) коэффициент сжимаемости газа

**80. Что определяет разность  $v - b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса**

- а) свободный объем, в котором могут двигаться молекулы газа
- б) учитывает уменьшение объема, в котором движутся молекулы реального газа и является тем предельно минимальным объемом, до которого можно сжать 1 кг газа
- в) добавочное давление, обусловленное силами взаимодействия между молекулами реальных газов
- г) коэффициент сжимаемости газа

**81. Что определяет соотношение  $a/v^2$  в уравнении Ван-дер-Ваальса**

- а) свободный объем, в котором могут двигаться молекулы газа
- б) учитывает уменьшение объема, в котором движутся молекулы реального газа и является тем предельно минимальным объемом, до которого можно сжать 1 кг газа
- в) добавочное давление, обусловленное силами взаимодействия между молекулами реальных газов
- г) коэффициент сжимаемости газа

**82. Какую размерность имеет соотношение  $a/v^2$  в уравнении Ван-дер-Ваальса**

- а) соотношение безразмерное; б)  $\text{м}^3$ ; в) Па; г) Н

## Глава 8. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

**83. Чем характеризуется фазовый переход (отметьте все варианты, являющиеся правильными)**

- а) изменяется химический состав вещества
- б) изменяется плотность вещества
- в) происходит поглощение или выделение теплоты
- г) изменяется температура вещества

**84. Как называется фазовый переход из твердого состояния в газообразное (парообразное)**

- а) плавление
- б) кристаллизация
- в) сублимация
- г) десублимация
- д) парообразование
- е) конденсация

**85. Как называется фазовый переход из газообразного (парообразного) состояния в твердое**

- а) плавление
- б) кристаллизация
- в) сублимация
- г) десублимация
- д) парообразование
- е) конденсация



86. Как определяется правило фаз Гиббса

- а)  $\Psi = n + r$
- б)  $\Psi = n + r - 1$
- в)  $\Psi = n - r$
- г)  $\Psi = n - r + 1$
- д)  $\Psi = n - r + 2$

87. Число степеней свободы однокомпонентной термодинамической системы с одной фазой равно \_\_\_\_\_

88. Число степеней свободы пароводяной смеси (например, в испарительной поверхности котла) равно \_\_\_\_\_

89. Как соотносятся плотность жидкости  $\rho_{ж}$  и пара  $\rho_{п}$  при температуре и давлении, выше критических

- а)  $\rho_{ж} < \rho_{п}$
- б)  $\rho_{ж} = \rho_{п}$
- в)  $\rho_{ж} > \rho_{п}$

90. При каких соотношения температур вещества  $T$  и критической температуры  $T_{кр}$  невозможно перевести пар в жидкость изотермическим сжатием

- а)  $T < T_{кр}$
- б)  $T = T_{кр}$
- в)  $T > T_{кр}$

91. Какой вид имеет уравнение Клапейрона – Клаузиуса, описывающее переход вещества из одного агрегатного состояния в другое

- а)  $dp/dT = T r / (v_2 - v_1)$
- б)  $dT/dp = T r / (v_2 - v_1)$
- в)  $dp/dT = (1/T) r / (v_2 - v_1)$
- г)  $dT/dp = (1/T) r / (v_2 - v_1)$

92. К каким изменениям агрегатных состояний химически однородных веществ применимо уравнение Клапейрона – Клаузиуса

- а) только плавление и кристаллизация
- б) только сублимация и десублимация
- в) только парообразование и конденсация
- г) ко всем фазовым переходам

## Глава 9. ВОДЯНОЙ ПАР

93. Что такое верхняя (правая) пограничная кривая в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах

- а) кривая, отделяющая область жидкости от пара
- б) кривая, отделяющая двухфазную область жидкость+пар от области пара
- в) кривая, отделяющая двухфазную область жидкость+пар от области жидкости
- г) кривая, отделяющая критическую область от области пара
- д) кривая, отделяющая критическую область от области жидкости

**94. Что такое нижняя (левая) пограничная кривая в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах**

- а) кривая, отделяющая область жидкости от области пара
- б) кривая, отделяющая двухфазную область жидкость+пар от пара
- в) кривая, отделяющая двухфазную область жидкость+пар от жидкости
- г) кривая, отделяющая критическую область от области пара
- д) кривая, отделяющая критическую область от области жидкости

**95. В каком состоянии находится вещество на верхней (правой) пограничной кривой в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах**

- а) переохлажденной жидкости (с температурой ниже температуры насыщения)
- б) жидкости в состоянии насыщения (с температурой, равной температуре насыщения)
- в) парожидкостной смеси (с температурой, равной температуре насыщения)
- г) пара в состоянии насыщения (с температурой, равной температуре насыщения)
- д) перегретого пара (с температурой, выше температуры насыщения)

**96. В каком состоянии находится вещество на нижней (левой) пограничной кривой в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах**

- а) переохлажденной жидкости (с температурой ниже температуры насыщения)
- б) жидкости в состоянии насыщения (с температурой, равной температуре насыщения)
- в) парожидкостной смеси (с температурой, равной температуре насыщения)
- г) пара в состоянии насыщения (с температурой, равной температуре насыщения)
- д) перегретого пара (с температурой, выше температуры насыщения)

**97. Что такое влажный пар?**

- а) термодинамическая система, состоящая из насыщенного жидкости и насыщенного пара
- б) термодинамическая система, состоящая из насыщенного жидкости и перегретого пара
- в) термодинамическая система, состоящая из воздуха и насыщенного пара
- г) термодинамическая система, состоящая из воздуха и перегретого пара
- д) термодинамическая система, состоящая из жидкости и насыщенного пара

**98. Пар, в котором отсутствуют взвешенные частицы жидкой фазы, а температура равна температуре кипения, соответствующей данному давлению, называется ...**

- а) перегретым
- б) переохлажденным
- в) переходным
- г) сухим насыщенным
- д) влажным

**99. Пар, в котором отсутствуют взвешенные частицы жидкой фазы, а температура выше температуры кипения, соответствующей данному давлению, называется ...**

- а) перегретым
- б) переохлажденным
- в) переходным
- г) сухим насыщенным
- д) влажным

**100. Что такое степень сухости влажного пара  $x$ ?**

- а) отношение массы перегретого пара к массе насыщенной жидкости
- б) отношение массы насыщенного пара к массе влажного пара
- в) отношение массы насыщенного пара к массе насыщенной жидкости
- г) отношение массы влажного пара к массе насыщенного пара
- д) отношение массы перегретого пара к массе насыщенного пара

**101. Как определяется степень влажности пара**

- а)  $x$
- б)  $1 - x$
- в)  $1 + x$
- г)  $x - 1$
- д)  $1/x$

**102. Количество теплоты, затраченное в изобарно-изотермическом процессе перехода 1 кг жидкости в пар называется**

- а) удельной теплотой воды
- б) удельной теплотой пара
- в) удельной теплотой парообразования
- г) внутренней теплотой парообразования
- д) внешней теплотой парообразования

**103. Теплота парообразования равна**

- а) энтальпии сухого насыщенного пара (при температуре насыщения)
- а) энтальпии влажного насыщенного пара (при температуре насыщения)
- б) энтальпии жидкости при температуре насыщения (кипения)
- в) энтальпии парожидкостной смеси при температуре насыщения (кипения)
- г) разности энтальпий сухого насыщенного пара и жидкости при температуре насыщения (кипения)
- д) разности энтальпий жидкости при температуре насыщения (кипения) и сухого насыщенного пара

**104. При температуре  $100^\circ\text{C}$  энтальпия сухого насыщенного пара равна  $2676,3$  кДж/кг, а энтальпия жидкости в состоянии насыщения –  $419,1$  кДж/кг. Чему равна теплота парообразования?**

- а)  $2257,2$
- б)  $3095,4$
- в)  $2676,3$
- г)  $419,1$

**105. Что такое степень перегрева пара с температурой  $T$  ( $T_s$  – температура насыщения пара того же давления)**

- а)  $T_s - T$
- б)  $T - T_s$
- в)  $T_s + T$
- г)  $T_s/T$
- д)  $T/T_s$

**106. Удельный объем сухого насыщенного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$  равен  $1,6738 \text{ м}^3/\text{кг}$ , удельный объем воды в состоянии насыщения при этой же температуре –  $0,0010437 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Степень сухости пара  $x = 0,9$ . Чему равен удельный объем пароводяной смеси \_\_\_\_\_.**

**107. Как определяется показатель адиабаты  $k$  в области влажного насыщенного пара**

- а)  $k = 1$
- б)  $k = 1,135$
- в)  $k = 1,3$
- г)  $k = 1,035 + 0,1x$

**108. Как определяется показатель адиабаты  $k$  в области сухого насыщенного пара**

- а)  $k = 1$
- б)  $k = 1,135$
- в)  $k = 1,3$
- г)  $k = 1,035 + 0,1x$

**109. Как определяется показатель адиабаты  $k$  в области перегретого пара**

- а)  $k = 1$
- б)  $k = 1,135$
- в)  $k = 1,3$
- г)  $k = 1,035 + 0,1x$

**110. Количество подведенной теплоты в изохорном процессе 1–2**

- а)  $q_{1-2} = 0$
- б)  $q_{1-2} = i_2 - i_1$
- в)  $q_{1-2} = u_2 - u_1$
- д)  $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$

**111. Количество подведенной теплоты в изобарном процессе 1–2**

- а)  $q_{1-2} = 0$
- б)  $q_{1-2} = i_2 - i_1$
- в)  $q_{1-2} = u_2 - u_1$
- г)  $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$

**112. Количество подведенной теплоты в изотермическом процессе 1–2**

- а)  $q_{1-2} = 0$
- б)  $q_{1-2} = i_2 - i_1$
- в)  $q_{1-2} = u_2 - u_1$
- г)  $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$

**113. Как определяется количество подведенной теплоты в адиабатном процессе 1–2 для водяного пара**

- а)  $q_{1-2} = 0$
- б)  $q_{1-2} = i_2 - i_1$
- в)  $q_{1-2} = u_2 - u_1$
- д)  $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$

## Глава 10. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

**114. Максимальное парциальное давление водяного пара при заданной температуре называется ...**

- а) давлением насыщения
- б) давлением мокрого термометра
- в) избыточным давлением
- г) влагосодержанием
- д) относительной влажностью

**115. Влажный воздух, содержащий максимально возможное количество водяного пара при заданной температуре называется ...**

- а) насыщенным
- б) ненасыщенным
- в) перегретым
- г) переохлажденным
- д) парциальным

**116. Какое соотношение между парциальным давлением пара  $p_n$  и давлением насыщения  $p_s$  в ненасыщенном влажном воздухе**

- а)  $p_n / p_s = 0$
- б)  $p_n / p_s < 1$
- в)  $p_n / p_s = 1$
- г)  $p_n / p_s > 1$

**117. Определение относительной влажности  $j$  влажного воздуха ( $p_n$  – парциальное давление пара;  $p_s$  – давление насыщения;  $m_n$  – масса водяного пара, содержащегося во влажном воздухе;  $m_g$  – масса сухого воздуха)**

- а)  $\varphi = p_s / p_n$
- б)  $\varphi = p_n / p_s$
- в)  $\varphi = m_n / m_g$
- г)  $\varphi = m_g / m_n$

**118. Определение влагосодержания  $x$  влажного воздуха ( $p_n$  – парциальное давление пара;  $p_s$  – давление насыщения;  $m_n$  – масса водяного пара, содержащегося во влажном воздухе;  $m_g$  – масса сухого воздуха)**

- а)  $x = p_s / p_n$
- б)  $x = p_n / p_s$
- в)  $x = m_n / m_g$
- г)  $x = m_g / m_n$

**119. Какая температура для ненасыщенного воздуха выше – точки росы или мокрого термометра?**

- а) температуры одинаковы
- б) температура точки росы
- в) температура мокрого термометра

**120. Плотность какого воздуха при одинаковой температуре больше, сухого или влажного ?**

- а) сухого
- б) влажного
- в) при  $\phi < 0,5$  – сухого, при  $\phi > 0,5$  – влажного
- г) при  $\phi > 0,5$  – сухого, при  $\phi < 0,5$  – влажного

**121. У какого воздуха при одинаковой температуре энтальпия выше, сухого или влажного ?**

- а) сухого
- б) влажного
- в) значения одинаковы
- г) при  $\phi < 0,5$  – сухого, при  $\phi > 0,5$  – влажного
- д) при  $\phi > 0,5$  – сухого, при  $\phi < 0,5$  – влажного

**122. Что на  $I, x$  – диаграмме показывает пограничная кривая ( $\phi = 100\%$ )**

- а) перегретое состояние
- б) состояние насыщения
- в) область тумана
- г) сухой воздух

## ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### ЗАДАЧА № 1

Газовая смесь с массой  $G$ , заданная объёмными долями, нагревается при постоянном объеме  $V$  от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ , а потом охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры  $t_1$ . Определить конечное давление и объем смеси, величину работы и теплоты, участвующих в процессах, а также изменение энтропии 1 кг смеси. Расчет иллюстрировать изображением процессов в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах.

#### Варианты задания

Предпоследняя цифра зачетной книжки	$G$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C
0	25	20	80	250
1	30	28	70	200
2	32	35	75	275
3	35	32	65	325
4	40	37	95	300
5	42	50	85	225
6	28	21	60	350
7	45	35	90	375
8	38	38	55	325
9	48	42	85	400

Последняя цифра зачетной книжки	Объёмные доли газовой смеси, %					
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>
0	79	21	—	—	—	—
1	50	20	30	—	—	—
2	—	—	50	10	30	10
3	50	10	—	15	25	—
4	50	—	—	—	—	50
5	40	25	15	5	15	—
6	—	—	20	20	30	30
7	45	15	20	—	20	—
8	55	—	—	15	20	10
9	—	20	40	10	30	—

## ЗАДАЧА № 2

Газ с массой  $G$  имеет начальные параметры – давление  $p_1$  и температуру  $t_1$ . После политропного изменения состояния параметры газа стали  $V_2$  и  $p_2$ . Определить характер процесса (сжатие или расширение), конечную температуру газа, показатель политропы, теплоемкость, работу, теплоту процесса, изменение внутренней энергии и энтропии. Определить эти же параметры и конечное давление, если изменение состояния происходит до того же значения конечного объема: а) по адиабате; б) по изотерме.

Изобразить без расчета все процессы в  $p$ ,  $v$ - и  $T$ ,  $s$ - диаграммах. Расчеты вести при постоянном значении теплоемкости (не зависимо от температуры).

## Варианты задания

Предпоследняя цифра зачетной книжки	Газ	$t_1$ , °C	$p_1$ , МПа	Предпоследняя цифра зачетной книжки	$G$ , кг	$p_2$ , МПа	$V_2$ , м <sup>3</sup>
0	H <sub>2</sub>	100	0,50	0	0,25	0,25	3,3
1	O <sub>2</sub>	150	0,55	1	10	0,32	4,6
2	CO	200	0,60	2	12	0,36	5,5
3	CO <sub>2</sub>	250	0,65	3	11	0,20	3,5
4	N <sub>2</sub>	300	0,70	4	9	1,12	1,0
5	воздух	350	0,75	5	8,5	1,37	0,9
6	CO	400	0,80	6	7,5	1,45	0,8
7	N <sub>2</sub>	450	0,83	7	10,5	1,15	0,85
8	O <sub>2</sub>	225	0,63	8	11,2	1,28	1,05
9	воздух	325	0,72	9	9,3	1,53	3,2



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература

1. **Беляев, Н. М.** Термодинамика: Учебн. пособ. для студ. техн. вузов / Н. М. Беляев. – Киев: «Выща школа», 1987. – 344 с.
2. **Кириллин, В. А.** Техническая термодинамика: Учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
3. **Рабинович, О. М.** Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
4. Сборник задач по технической термодинамике: Учеб. пособ. / Т. Н. Андрианова, Б. В. Дзампов, В.Н. Зубарев и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 356 с.

### Дополнительная литература

5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под. ред. В. А. Клименко и В. М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 564 с. (серия «Теплоэнергетика и теплотехника», кн. 2).
6. **Вукалович, М. П.** Термодинамика: Учебн. пособ. для вузов / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.
7. **Новиков, И. И.** Термодинамика: Учеб. пособ. для студ. энергомашиностроительных и теплотехнических спец. втузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 592 с.
8. **Кудинов, В.А.** Техническая термодинамика. Учеб. пособ. для втузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2001 – 261 с.
9. **Болгарский, А. В.** Термодинамика и теплопередача: Учебн. для вузов. / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.
10. **Жуховицкий, Д. Л.** Сборник задач по технической термодинамике: Уч. пособ. / Д. Л. Жуховицкий. – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 98 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Термодинамические свойства воды и водяного пара.**  
**Состояние насыщения (по температурам)**

$t$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$v' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r$ , Дж/кг	$s'$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s''$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0	0,006108	1,0002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,02	9,1565
1	0,006112	1,00022	206,175	0,0006	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562
5	0,008718	1,000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	8,9496
10	0,012271	1,0003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
15	0,017040	1,0008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
20	0,023368	1,0017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
25	0,03166	1,0029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583
30	0,04242	1,0043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
35	0,05622	1,0060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536
40	0,07375	1,0078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
45	0,09582	1,0099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655
50	0,1234	1,0121	12,048	209,26	2591,8	2385,0	0,7035	8,0771
55	0,1574	1,0145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922
60	0,1992	1,0171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
65	0,2501	1,0199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320
70	0,3116	1,0228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
75	0,3855	1,0259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837
80	0,4736	1,0292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
85	0,5780	1,0326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459
90	0,7011	1,0361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
95	0,8452	1,0398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174
100	1,0132	1,0437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
105	1,2080	1,0477	1,4200	440,17	2684,1	2243,9	1,3630	7,2974
110	1,4326	1,0519	1,2106	461,32	2691,8	2230,5	1,4185	7,2402
115	1,6905	1,0562	1,0369	482,50	2697,8	2216,8	1,4733	7,1848
120	1,9854	1,0606	0,8920	503,70	2706,6	2202,9	1,5384	7,1310
125	2,3209	1,0652	0,7707	525,00	2713,8	2188,8	1,5813	7,0788
130	2,7012	1,0700	0,6685	546,30	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281
135	3,1306	1,0750	0,5821	567,70	2727,4	2159,7	1,6869	6,9787
140	3,6136	1,0801	0,5088	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
150	4,7597	1,0908	0,3926	632,2	2746,3	2114,1	1,8416	6,8381
160	6,1804	1,1022	0,3068	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
170	7,9202	1,1145	0,2426	719,1	2768,0	2048,9	2,0416	6,6652
180	10,027	1,1275	0,1938	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
190	12,552	1,1415	0,1563	807,5	2784,9	1977,4	2,2356	6,5052
200	15,551	1,1565	0,1271	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
210	19,079	1,1726	0,1042	897,8	2796,4	1898,6	2,4247	6,3546

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Термодинамические свойства воды и водяного пара.  
Состояние насыщения (по давлениям)**

$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t$ , °C	$v' \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r$ , Дж/кг	$s'$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s''$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0,01	6,98	1,0001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,025	21,09	1,0020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
0,050	32,90	1,0052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,075	40,32	1,0079	19,241	168,77	2574,5	2405,7	0,5763	8,2517
0,10	45,83	1,0102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,15	54,00	1,0140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
0,20	60,09	1,0172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,25	64,99	1,0199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
0,30	69,12	1,0223	5,2308	289,31	2525,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,40	75,89	1,0265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,60	85,95	1,0333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,80	93,51	1,0387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
1,00	99,63	1,0434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
1,5	111,37	1,0530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
2,0	120,23	1,0608	0,8859	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,5	127,43	1,0675	0,7188	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
3,0	133,54	1,0735	0,6059	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,5	138,88	1,0789	0,5242	584,3	2732,5	2148,2	1,7273	6,9414
4,0	143,62	1,0839	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
4,5	147,92	1,0885	0,4139	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
5,0	151,85	1,0928	0,3748	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
6,0	158,84	1,1009	0,3156	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
7,0	164,96	1,1082	0,2727	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
8,0	170,42	1,1150	0,2403	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
9,0	175,36	1,1213	0,2148	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
10,0	179,88	1,1274	0,1943	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
11,0	184,06	1,1331	0,1774	781,1	2780,4	1999,3	2,1786	6,5515
12,0	187,96	1,1386	0,1632	798,4	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
13,0	191,60	1,1438	0,1511	814,7	2786,0	1971,3	2,2509	6,2509
14,0	195,04	1,1489	0,1407	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
15,0	198,28	1,1538	0,1316	844,7	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
16,0	201,37	1,1586	0,1237	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
17,0	204,30	1,1633	0,1166	871,8	2793,8	1922,0	2,3712	6,3967
18,0	207,10	1,1678	0,1103	884,6	2795,1	1910,5	2,3976	6,3759
19,0	209,79	1,1722	0,1046	896,8	2796,4	1899,6	2,4227	6,3561
20,0	212,37	1,1766	0,0995	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Термодинамические свойства воды и перегретого водяного пара

Условные обозначения и единицы физических величин:

температура  $t$ , °C; удельный объем  $v$ , м<sup>3</sup>/кг; удельная энтальпия  $i$ , кДж/кг; теплота парообразования  $r$ , кДж/кг; удельная энтропия  $s$ , кДж/(кг·К);

Параметры критического состояния: давление  $2,2115 \cdot 10^7$  Па; температура  $374,12^\circ\text{C}$ ; удельный объем  $0,003147$  м<sup>3</sup>/кг; удельная энтальпия  $2095,2$  кДж/кг; удельная энтропия  $4,4237$  кДж/(кг·К)

$t$	$p = 1 \text{ кПа}$			$p = 5 \text{ кПа}$			$p = 10 \text{ кПа}$		
	$t_s = 6,982; i'' = 2675,7; v'' = 1,6946; s'' = 7,3608$			$t_s = 120,23; i'' = 2706,9; v'' = 0,88592; s'' = 7,1286$			$t_s = 133,54; i'' = 2725,5; v'' = 0,60586; s'' = 6,9930$		
$t$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$
0	0,0010002	0,0	0,0001	0,0010002	0,0	0,0001	0,0010002	0,0	0,0001
10	130,60	2519,5	8,9956	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	135,23	2538,1	9,0604	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	139,85	2556,8	9,1230	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	144,47	2575,5	9,1837	28,86	2574,6	8,4385	0,0010078	167,4	0,5721
50	149,09	2594,2	9,2426	29,78	2593,4	8,4977	14,87	2592,3	8,1752
100	172,19	2688,3	9,5132	34,42	2687,9	8,7695	17,20	2687,3	8,4484
150	195,27	2783,4	9,7523	39,04	2783,1	9,0091	19,51	2782,8	8,6885
200	218,3	2879,7	9,9674	43,66	2879,5	9,2244	21,82	2879,3	8,9041
250	241,4	2977,4	10,1636	48,28	2977,3	9,4207	24,14	2977,1	9,1006
$t$	$p = 20 \text{ кПа}$			$p = 30 \text{ кПа}$			$p = 50 \text{ кПа}$		
	$t_s = 60,09; i'' = 2609,6; v'' = 7,6515; s'' = 7,9092$			$t_s = 69,12; i'' = 2625,3; v'' = 5,2308; s'' = 7,7695$			$t_s = 81,35; i'' = 2646,0; v'' = 3,2415; s'' = 7,5951$		
$t$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$
0	0,0010002	0,0	0,0001	0,0010002	0,0	0,0001	0,0010002	0,0	0,0001
10	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010121	209,3	0,7035
60	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310	0,0010171	251,1	0,8310
70	7,884	2628,6	7,9654	5,245	2626,9	7,7744	0,0010228	293,0	0,9548
80	8,119	2647,8	8,0205	5,402	2646,3	7,8301	0,0010292	334,9	1,0752
90	8,352	2667,0	8,0740	5,559	2665,7	7,8841	3,324	2663,0	7,6425
100	8,568	2686,1	8,1261	5,716	2684,9	7,9365	3,419	2682,6	7,6958
150	9,748	2782,1	8,3674	6,494	2781,4	8,1790	3,890	2780,0	7,9407
200	10,907	2878,8	8,5834	7,268	2878,4	8,3956	4,356	2877,5	8,1584
250	12,064	2976,7	8,7802	8,040	2976,4	8,5926	4,820	2975,8	8,3560

$t$	<b>P = 100 кПа</b>			<b>P = 200 кПа</b>			<b>P = 300 кПа</b>		
	$t_s = 99,63; h'' = 2675,7;$ $v'' = 1,6946; s'' = 7,3608$			$t_s = 120,23; h'' = 2706,9;$ $v'' = 0,8859; s'' = 7,1286$			$t_s = 133,54; h'' = 2725,5;$ $v'' = 0,60586; s'' = 6,9930$		
$t$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$
0	0,0010002	0,0	0,0001	0,0010001	0,2	0,0001	0,0010001	0,3	0,0001
10	0,0010002	42,1	0,1510	0,010002	42,2	0,1510	0,0010001	42,3	0,1510
20	0,0010017	84,0	0,2963	0,0010016	84,0	0,2963	0,0010016	84,1	0,2962
30	0,0010043	125,8	0,4365	0,0010042	125,8	0,4364	0,0010042	125,9	0,4364
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010077	167,6	0,5720	0,0010077	167,7	0,5720
50	0,0010121	209,3	0,7035	0,0010120	209,4	0,7034	0,0010120	209,5	0,7034
60	0,0010171	251,2	0,8309	0,0010171	251,2	0,8309	0,0010170	251,3	0,8308
70	0,0010228	293,0	0,9548	0,0010228	293,1	0,9547	0,0010227	293,2	0,9546
80	0,0010292	335,0	1,0752	0,010291	335,0	1,0752	0,0010291	335,1	1,0751
90	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1924	0,0010360	377,1	1,1924
100	1,696	2676,5	7,3628	0,0010437	419,1	1,3068	0,0010436	419,2	1,3067
110	1,745	2696,7	7,1464	0,0010518	461,4	1,4184	0,0010518	461,4	1,4184
120	1,793	2716,8	7,4681	0,0010606	503,7	1,5276	0,0010606	503,8	1,5275
130	1,841	2736,8	7,5182	0,9104	2727,5	7,1803	0,0010700	546,3	1,6343
150	1,937	2776,4	7,6143	0,9598	2769,0	7,2807	0,6340	2761,2	7,0790
190	2,125	2855,4	7,7927	1,056	2850,3	7,4643	0,7002	2845,0	7,2684
200	2,172	2875,2	7,8348	1,080	2870,4	7,5073	0,7164	2865,6	7,3123
220	2,266	2914,7	7,9166	1,128	2910,6	7,5905	0,7486	2906,5	7,3970
250	2,406	2974,2	8,0337	1,199	2970,8	7,7091	0,7964	2967,5	7,5172
$t$	<b>P = 500 кПа</b>			<b>P = 1,0 МПа</b>			<b>P = 2,0 МПа</b>		
	$t_s = 151,85; h'' = 2748,5;$ $v'' = 0,37481; s'' = 6,8215$			$t_s = 179,88; h'' = 2777,0;$ $v'' = 0,19430; s'' = 6,5847$			$t_s = 212,37; h'' = 2796,4;$ $v'' = 0,09953; s'' = 6,3373$		
$t$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$
0	0,0010000	0,5	0,0001	0,0009997	1,0	0,0001	0,0009992	2,0	0,0000
10	0,0010000	42,5	0,1509	0,0009998	43,0	0,1509	0,0009993	43,9	0,1508
20	0,010015	84,3	0,2962	0,0010013	84,8	0,2961	0,0010008	85,7	0,2959
30	0,0010041	126,1	0,4364	0,010039	126,6	0,4362	0,0010034	127,5	0,4359
40	0,0010076	167,9	0,5719	0,0010074	168,3	0,5717	0,0010069	169,2	0,5713
50	0,0010119	209,7	0,7033	0,0010117	210,1	0,7030	0,0010112	211,0	0,7026
100	0,0010435	419,4	1,3066	0,0010432	419,7	1,3062	0,0010427	420,5	1,3054
150	0,0010908	632,2	1,8416	0,0010904	632,5	1,8410	0,0010897	633,1	1,8399
200	0,4249	2855,4	7,0603	0,2059	2827,5	6,6940	0,0011560	852,6	2,3300
250	0,4744	2960,7	7,2716	0,2327	2942,8	6,925()	0,1115	2902,5	6,5460
370	0,5890	3209,1	7,6991	0,2921	3200,2	7,3690	0,1436	3181,8	7,0278

	<b>P = 3,0 МПа</b>			<b>P = 5,0 МПа</b>			<b>P = 10,0 МПа</b>		
	$t_s = 233,34; h'' = 2801,9;$ $v'' = 0,06662; s'' = 6,1832$			$t_s = 263,92; h'' = 2792,8;$ $v'' = 0,03941; s'' = 5,9712$			$t_s = 310; h'' = 2724,4;$ $v'' = 0,01800; s'' = 5,6143$		
$t$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$	$v$	$i$	$s$
0	0,0009987	3,0	0,0001	0,0009977	5,1	0,0002	0,0009953	10,1	0,0005
10	0,0009988	44,9	0,1507	0,0009979	46,9	0,1505	0,0009956	51,7	0,1500
20	0,0010004	86,7	0,2957	0,0009995	88,6	0,2952	0,0009972	93,2	0,2942
30	0,0010030	128,4	0,4356	0,0010021	130,2	0,4350	0,0009999	134,7	0,4334
40	0,0010065	170,1	0,5709	0,001056	171,9	0,5702	0,0010034	176,3	0,5682
50	0,0010108	211,8	0,7021	0,0010099	213,6	0,7012	0,0010077	217,8	0,6989
100	0,0010422	421,2	1,3046	0,0010412	422,7	1,3030	0,0010386	426,5	1,2992
150	0,0010890	633,7	1,8388	0,0010877	635,0	1,8366	0,0010843	638,1	1,8312
200	0,0011550	853,0	2,3284	0,0011530	853,8	2,3253	0,0011480	855,9	2,3176
250	0,07058	2855,2	6,2867	0,0012494	1085,8	2,7911	0,0012406	1085,9	2,7794
300	0,08116	2994,2	6,5408	0,04532	2925,4	6,2104	0,0013978	1343,7	3,2494
350	0,09053	3115,7	6,7443	0,05194	3069,2	6,4513	0,02242	2924,2	5,9464
400	0,09933	3231,6	6,9231	0,05780	3196,9	6,6486	0,02641	3098,5	6,2158
450	0,1078	3344,4	7,0847	0,06327	3316,8	6,8204	0,02974	3242,2	6,4220
500	0,1161	3456,4	7,2345	0,06327	3433,8	6,9768	0,03277	3374,1	6,5984
550	0,1243	3568,6	7,3752	0,07363	3549,6	7,1221	0,03561	3500,4	6,7568

## Оглавление

Предисловие .....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	6
1.1. Предмет и метод термодинамики .....	6
1.2. Основные понятия и определения .....	6
1.3. Параметры состояния .....	8
Задачи .....	14
Контрольные вопросы .....	15
2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА .....	16
2.1. Уравнение состояния идеального газа .....	16
2.2. Физический смысл удельной газовой постоянной. Универсальная газовая постоянная.....	17
2.3. Понятие о смесях. Смеси идеальных газов.....	18
Задачи.....	20
Контрольные вопросы .....	23
3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ .....	24
3.1. Понятие о теплоемкости.....	24
3.2. Температурные зависимости для истинной теплоемко- сти .....	25
3.3. Температурные зависимости для средней теплоемкости .....	26
3.4. Изобарная и изохорная теплоемкости.....	27
Задачи.....	29
Контрольные вопросы .....	30
4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ.....	31
4.1. Закон сохранения и превращения энергии .....	31
4.2. Внутренняя энергия системы .....	31
4.3. Работа и теплота – формы передачи энергии .....	33
4.4. Работа при изменении объема рабочего тела .....	35
4.5. Располагаемая работа.....	36
4.6. Аналитическое выражение первого закона термодина- мики .....	37
4.7. Энтальпия .....	39
Задачи.....	41
Контрольные вопросы .....	42
5. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ .....	43
5.1. Процесс при постоянном объеме (изохорный).....	43
5.2. Процесс при постоянном давлении (изобарный) .....	44

5.3. Процесс при постоянной температуре (изотермический) .....	46
5.4. Процесс без теплообмена с внешней средой (адиабат- ный) .....	48
5.5. Политропный процесс .....	49
Задачи .....	53
Контрольные вопросы .....	59
6. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ .....	60
6.1. Сущность второго закона термодинамики .....	60
6.2. Обратимые и необратимые процессы .....	60
6.3. Круговые термодинамические процессы или циклы .....	61
6.3. Цикл Карно .....	62
6.4. Математическое выражение второго закона термодина- мики. Понятие об энтропии .....	64
6.5. Цикл Карно в $T, s$ - диаграмме .....	67
6.6. Изменение энтропии в необратимых процессах .....	69
6.7. Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики .....	71
Задачи .....	72
Контрольные вопросы .....	74
7. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ .....	75
7.1. Отличие реальных газов от идеального .....	75
7.2. Уравнение состояния реальных газов .....	76
Контрольные вопросы .....	77
8. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ .....	78
8.1. Понятия о фазах и фазовых переходах .....	78
8.2. Правило фаз Гиббса .....	79
8.3. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса .....	81
Контрольные вопросы .....	83
9. ВОДЯНОЙ ПАР .....	84
9.1. Процесс парообразования при постоянном давлении .....	84
9.2. Основные параметры воды и водяного пара .....	85
9.3. $T, S$ - диаграмма водяного пара .....	90
9.4. $I, S$ - Диаграмма водяного пара .....	91
9.5. Основные термодинамические процессы водяного пара .....	92
Задачи .....	98
Контрольные вопросы .....	100
10. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ .....	101
10.1. Основные понятия .....	101



10.2. $I, x$ - диаграмма влажного воздуха .....	105
Задачи .....	106
Контрольные вопросы .....	107
ТЕСТЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ .....	108
ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ .....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Состояние насыщения (по температурам) .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Состояние насыщения (по давлениям) .....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Термодинамические свойства воды и перегре- того водяного пара .....	131

Учебное издание

**ГРИШКО Борис Михайлович**

**ТРУБАЕВ Павел Алексеевич**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ТЕРМОДИНАМИКА  
Часть 1  
Основы термодинамики**

Учебное пособие для студентов заочной формы обучения  
с применением дистанционных технологий специальности  
140105 – Энергетика теплотехнологий

Подписано в печать

Формат 60х84/16.

Усл. печ. л.. 8,0

Уч.-изд.л.8,6

Тираж 100 экз.

Заказ

Цена р. к.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.