

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**Л.В. ДЕМЕНТИЙ, А.А. КУЗНЕЦОВ, Ю.В. МЕНАФОВА**

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ  
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений  
машиностроительных специальностей

Краматорск 2002

УДК 621.1.016  
ББК 31.31

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений  
машиностроительных специальностей  
(письмо заместителя министра от 29.03.2001 № 2/427)

Рецензенты:

В.Г. Бойко – кандидат технических наук, доцент кафедры  
прикладной математики и вычислительной техники (Краматорский  
экономико-гуманитарный институт);

А.П. Авдеенко – кандидат химических наук, профессор  
кафедры химии и охраны труда (Донбасская государственная  
машиностроительная академия)

Дементий Л.В., Кузнецов А.А., Менафова Ю.В. Сборник задач  
по технической термодинамике и теплопередаче. – Краматорск: ДГМА,  
2002. - 260 с.

ISBN 5-7763-2069-0

Сборник задач содержит краткий теоретический материал и  
примеры решения основных типов задач по разделам «Основы  
технической термодинамики» и «Теплопередача». В пособии  
приведены более 300 задач с ответами.

Сборник может быть использован при изучении курса  
«Теоретические основы теплотехники» студентами дневного и  
заочного отделений машиностроительных специальностей.

ISBN 5-7763-2069-0



Л.В. Дементий, А.А. Кузнецов,  
Ю.В. Менафова, 2002 г.

# 1 ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

## 1.1 Параметры состояния рабочего тела

**Удельный объем** ( $v$ ) тела представляет собой объем единицы его массы,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где  $V$  - объем, занимаемый телом,  $\text{м}^3$ ;

$m$  – масса тела,  $\text{кг}$ .

**Плотность** ( $\rho$ ) - величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

**Давление** ( $P$ ) - сила, приходящаяся на единицу площади поверхности, единицы измерения – ньютон на квадратный метр, паскаль. Эта единица очень мала. Для практических целей удобнее использовать более крупные величины:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}; 1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}; 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

На практике часто используют внесистемные единицы:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = 98,0665 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 10\,332 \text{ мм вод. ст.} = 101,325 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

Термодинамическим параметром является абсолютное давление  $P_{\text{абс}}$ , которое определяется из соотношений:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{атм}}$  — атмосферное или барометрическое давление, измеряемое барометром;

$P_{\text{изб}}$  — избыточное давление, измеряемое манометром;

$P_{\text{вак}}$  — вакуумметрическое давление (разряжение), измеряемое вакуумметром.

При измерении давления высотой ртутного столба следует иметь в виду, что показание прибора зависит от температуры. Это учитывается приведением высоты столба ртути к  $0^\circ\text{C}$  по следующему соотношению:

$$P_0 = P_t(1 - 0,000172 t), \quad (5)$$

где  $P_0$  - показание прибора, приведенное к  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$P_t$  - действительная высота ртутного столба при температуре воздуха  $t^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

0,000172 - коэффициент объемного расширения ртути.

При удалении от поверхности земли атмосферное давление понижается. В пределах тропосферы (до высоты 11000 м) закон падения давления выражается формулой

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{h}{44300} \right)^{5,256}, \quad (6)$$

где  $P$  - барометрическое давление в верхних слоях атмосферы при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$P_0$  - барометрическое давление на уровне моря при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$h$  - высота над уровнем моря, м.

**Температура** характеризует степень нагретости тела и является количественной мерой интенсивности теплового движения молекул. Ее измеряют либо по термодинамической температурной шкале, либо по международной практической температурной шкале. В

качестве точки отсчета взята тройная точка воды (температура, при которой все три фазы воды - твердая, жидкая и газообразная - находятся в равновесии), которой присвоены значения 273,16 К и 0,01 °С. Нижним пределом шкалы является абсолютный нуль (температура, при которой прекращается тепловое движение молекул).

Температуру по международной практической температурной шкале, отсчитываемую от 0 °С, обозначают через  $t$  (единица измерения – градус Цельсия), а температуру по абсолютной шкале, отсчитываемую от температуры абсолютного нуля, обозначают через  $T$  и называют абсолютной температурой (единица измерения - кельвин).

Зависимость между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия следующая:

$$T = t + 273,15. \quad (7)$$

Для измерения температуры применяют также шкалу Фаренгейта (°F), Реомюра (°R), Ренкина (°Ra). Соотношения между ними:

$$t \text{ } ^\circ\text{F} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 32; \quad t \text{ } ^\circ\text{R} = 0,8 t \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t \text{ } ^\circ\text{Ra} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 273. \quad (8)$$

Под нормальными физическими условиями понимается состояние рабочего вещества при давлении  $P_{\text{абс}} = 760$  мм рт. ст. и температуре 0 °С. Если объем газа приведен к нормальным условиям, то его принято обозначать  $V_n$ .

### Примеры решения задач

1 Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм при 0 °С. Выразить это давление в барах и паскалях.

Решение:

1 мм рт. ст. = 133,3 Па; 770 мм рт. ст. = 102700 Па = 1,027 бар.

2 Определить абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает  $P=1,3$  бар, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 680 мм при  $t = 25^\circ\text{C}$ .

Решение:

Показание барометра получено при температуре  $t = 25^\circ\text{C}$ . Это показание необходимо привести к  $0^\circ\text{C}$  по уравнению (5):

$$P_0 = P_t (1 - 0,000172 t) = 680 \cdot 0,9957 = 677,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление пара в котле по формуле (3)

$$P_{\text{абс}} = 130000 + 677,1 \cdot 133,3 = 0,22 \text{ МПа.}$$

3 Давление в паровом котле  $P = 0,4$  бар при барометрическом давлении 725 мм рт. ст. Чему будет равно избыточное давление в котле, если показание барометра повысится до 785 мм рт. ст., а состояние пара в котле останется прежним? Барометрическое давление приведено к  $0^\circ\text{C}$ .

Решение:

Абсолютное давление в котле

$$P_{\text{абс}} = 400000 + 725 \cdot 133,3 = 136642 \text{ Па.}$$

Избыточное давление при показании барометра 785 мм рт. ст.

$$P_{\text{изб}} = 136642 - 785 \cdot 133,3 = 32000 \text{ Па.}$$

4 Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разрежение 420 мм при температуре ртути в вакуумметре  $t = 20^\circ\text{C}$ . Давление атмосферы по ртутному барометру 768 мм при температуре  $t = 18^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.

Решение:

Приводим показания вакуумметра и барометра к температуре ртути 0 °С по уравнению (5):

$$P_{\text{вак}} = 420 (1 - 0,000172 \cdot 20) = 418,5 \text{ мм рт. ст.}$$

$$P_{\text{атм}} = 768 (1 - 0,000172 \cdot 18) = 765,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление в сосуде по формуле (4)

$$P_{\text{абс}} = 765,6 - 418,5 = 347,1 \text{ мм рт. ст.} = 46,3 \text{ кПа.}$$

5 Водяной пар перегрет на 45°С. Чему соответствует этот перегрев по термометру Фаренгейта?

Решение:

При переводе разности температур, выраженной градусами шкалы Цельсия, в градусы Фаренгейта и наоборот надо исходить только из цены деления того и другого термометров. Поэтому формула (8) принимает следующий вид:

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot \Delta t^{\circ}\text{C} + 32.$$

Следовательно, для нашего случая

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot 45 + 32 = 113^{\circ}\text{F}.$$

### Задачи

1 Масса 1 м<sup>3</sup> метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

$$\text{Ответ: } \rho = 0,7 \text{ кг/м}^3; v = 1,429 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2 Плотность воздуха при определенных условиях равна 1,293 кг/м<sup>3</sup>. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

$$\text{Ответ: } v = 0,773 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3 В сосуде объемом  $0,9 \text{ м}^3$  находится  $1,5 \text{ кг}$  окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Ответ:  $v = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho = 1,67 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

4 Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, равно  $765 \text{ мм}$  при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Выразить давление в барах.

Ответ:  $P = 1,02 \text{ бар}$ .

5 Определить абсолютное давление газа в сосуде, если показание ртутного манометра равно  $500 \text{ мм рт. ст.}$ , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $750 \text{ мм}$ . Температура воздуха в месте установки приборов равна  $0^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P_{\text{абс}} = 1,667 \text{ бар} = 0,1667 \text{ МПа}$ .

6 Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает  $2,45 \text{ бар}$ , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $700 \text{ мм}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,38 \text{ бар}$ .

7 Какой высоте водяного столба соответствует  $1 \text{ мм рт. ст.}$ ?

Ответ:  $h = 13,6 \text{ мм вод. ст.}$

8 Какой высоте водяного столба соответствует давление равное  $1 \text{ кгс}/\text{м}^2$ ?

Ответ:  $h = 1 \text{ мм вод. ст.}$

9 Определить абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно  $705 \text{ мм рт. ст.}$ , а показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ\text{C}$ ,  $747 \text{ мм}$ . Температура воздуха в месте установки приборов  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 5900 \text{ Па}$ .



10 Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Длина столба воды, отсчитанная по шкале, 160 мм. Определить абсолютное давление газов, если показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ\text{C}$  составляет, 740 мм.

Ответ:  $P = 734,1$  мм рт. ст.

11 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 580 мм при температуре ртути  $25^\circ\text{C}$ , а высота столба воды над ртутью - 150 мм. Атмосферное давление по ртутному барометру равно 770 мм при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 1,81$  бар.

12 В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет 570 мм при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Над ртутью находится столбик воды высотой 37 мм. Барометрическое давление воздуха составляет 728 мм рт. ст. при  $15^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.

Ответ:  $P = 155,4$  мм рт. ст.

13 Для измерения расхода жидкостей и газов используют дроссельные диафрагмы. Вследствие дросселирования жидкости при прохождении через диафрагму давление ее за диафрагмой всегда меньше, чем перед ней. По разности давлений перед и за диафрагмой, измеряемой дифференциальным U-образным манометром, можно определить массовый расход жидкости (килограмм в секунду) по формуле

$$G = a f \sqrt{2(P_1 - P_2) \rho},$$

где  $a$  - коэффициент расхода, определяемый экспериментально: при ламинарном режиме -  $a = 0,5$ ; при турбулентном –  $a = 0,5 - 0,82$ ;

$f$  - площадь входного отверстия диафрагмы,  $m^2$ ;

$P_1 - P_2$  - перепад давления на диафрагме, Па;

$\rho$  - плотность жидкости, протекающей по трубе,  $kg/m^3$ .

Определить массовый расход воды, измеренный при помощи дроссельного устройства, если  $a = 0,8$ ; показание дифференциального манометра 84 мм рт. ст.;  $\rho = 1000 kg/m^3$ , а диаметр входного отверстия диафрагмы 10 мм.

Ответ:  $G = 1,89 kg/c$ .

14 Присоединенный к газоходу парового котла тягомер показывает разрежение, равное 80 мм вод. ст. Определить абсолютное давление дымовых газов, если показание барометра при температуре  $0^\circ C$  равно 770 мм рт. ст.

Ответ:  $P = 764,1$  мм рт. ст.

15 Тягомер показывает разрежение в газоходе, равное 42 мм вод. ст. Атмосферное давление по ртутному барометру 757 мм рт. ст. при  $t = 15^\circ C$ . Определить абсолютное давление дымовых газов.

Ответ:  $P = 751,95$  мм рт. ст.

16 Определить абсолютное давление в газоходе котельного агрегата при помощи тягомера с наклонной трубкой. Жидкость, используемая в тягомере, спирт с плотностью  $\rho = 800 kg/m^3$ . Отсчет по наклонной шкале 200 мм. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Барометрическое давление 745 мм рт. ст. (приведено к  $0^\circ C$ ).

Ответ:  $P = 739$  мм рт. ст.

17 Температура пара, выходящего из перегревателя парового котла, равна  $950^\circ F$ . Перевести эту температуру в  $^\circ C$ .

Ответ:  $t = 510^\circ C$ .

18 Какая температура в градусах Фаренгейта соответствует абсолютному нулю?

Ответ:  $t = - 459^{\circ}\text{F}$ .

19 Определить барометрическое давление на высоте 9500 м, если известно, что давление на уровне моря составляет 740 мм рт. ст. при  $15^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $P = 0,276 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

20 Барометр, находящийся при  $0^{\circ}\text{C}$ , показывает, что на уровне моря давление составляет 757 мм рт. ст. Барометр, установленный на борту самолета, показывает давление в 3,7 раза меньше давления на уровне моря. Оценить высоту полета самолета.

Ответ:  $h = 9750 \text{ м}$ .

21 Манометр показывает, что давление в баллоне, заполненном кислородом, составляет 40 ат. Определить избыточное давление кислорода в баллоне при подъеме его на высоту 6000 м, если барометрическое давление на уровне моря 770 мм рт. ст. при температуре окружающей среды  $30^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,97 \text{ МПа}$ .

22 Определить давление на нижнее днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если указанное днище находится на глубине 15,5 м, а давление атмосферы, измеренное ртутным барометром при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , составляет 755 мм рт. ст.

Ответ:  $P = 0,253 \text{ МПа}$ .

23 В помещении, где установлена барокамера, давление по водяному манометру 50 мм вод. ст. Барометр, установленный вне помещения, показывает 750 мм рт. ст. при  $30^{\circ}\text{C}$ . В барокамере создан вакуум 180 мм рт. ст. Найти абсолютное давление в барокамере.

Ответ:  $P = 76 \text{ кПа}$ .

## 1.2 Основные газовые законы

**Закон Бойля-Мариотта:** если температура газа не изменяется ( $T = \text{const}$ ), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью:

$$P v = \text{const} . \quad (9)$$

**Закон Гей-Люссака:** если давление газа остается постоянным ( $P = \text{const}$ ), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой представляет:

$$\frac{v}{T} = \text{const} \quad (10)$$

или

$$\rho T = \text{const} . \quad (11)$$

Для газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, имеет место следующая зависимость, полученная на основе **закона Авогадро:**

$$\frac{\mu}{\rho} = \text{const} , \quad (12)$$

где  $\mu$  — молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Для нормальных условий объем 1 кмоль всех идеальных газов равен  $22,4136 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  (округленно  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ).

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} . \quad (13)$$

Пользуясь этой формулой, можно определить удельный объем любого газа при нормальных условиях:

$$v_H = \frac{22,4}{\mu}. \quad (14)$$

Характеристическое **уравнение идеального газа** или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния — давление, объем и температуру — и может быть представлено следующими уравнениями:

$$P V = m R T; \quad (15)$$

$$P v = R T; \quad (16)$$

$$P V_\mu = \mu R T; \quad (17)$$

В уравнениях (15) — (17) приняты следующие обозначения:

$P$  — абсолютное давление газа, Па;

$V$  — объем газа, м<sup>3</sup>;

$m$  — масса газа, кг;

$v$  — удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;

$V_\mu$  — объем 1 кмолья газа, м<sup>3</sup>/кмоль;

$R$  — газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$R_\mu$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К),

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным количествам газа: первое - к произвольной массе  $m$  кг; второе - к 1 кг, третье – к 1 кмолью газа.

Численное значение универсальной газовой постоянной легко получить из уравнения (17) при подстановке значений входящих в него величин при нормальных условиях:

$$\mu R = \frac{P V_\mu}{T} = \frac{101\,325 \cdot 22,4136}{273,15} = 8314 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Газовая постоянная определяется из уравнения

$$R = \frac{8314}{\mu}, \quad (18)$$

где  $\mu$  - масса 1 кмоль газа в килограммах (численно равная молекулярной массе газа), кг/кмоль.

В приложении А приведены молекулярные массы, плотности и газовые постоянные важнейших для техники газов.

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний какого либо газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2}; \quad (19)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}. \quad (20)$$

Уравнение (20) часто применяют для «приведения объема к нормальным условиям», т. е. для определения объема, занимаемого газом, при  $t = 0^\circ\text{C}$  и  $P = 760$  мм рт. ст., если объем его при каких-либо значениях  $P$  и  $t$  известен. Для этого случая уравнение (20) обычно представляют в следующем виде:

$$\frac{P V}{T} = \frac{P_H V_H}{T_H}. \quad (21)$$

В правой части уравнения все величины взяты при нормальных условиях, в левой — при произвольных значениях давления и температуры.

Уравнение (19) можно написать и следующим образом:

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}. \quad (22)$$

Уравнение (22) позволяет определить плотность газа при любых условиях, если значение его для определенных условий известно.

## Примеры решения задач

6 Какой объем занимает 1 кг азота при температуре 70 °С и давлении 0,2 МПа.

Решение:

Из характеристического уравнения для 1 кг газа (16) имеем:

$$v = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{296,8 \cdot (273 + 70)}{0,2 \cdot 10^6} = 0,509 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

7 Во сколько раз объем определенной массы газа при -20 °С меньше, чем при +20 °С, если давление в обоих случаях одинаковое?

Решение:

При постоянном давлении объем газа изменяется по уравнению (10):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ следовательно, } \frac{V_2}{V_1} = \frac{273 + 20}{273 - 20} = 1,16.$$

8 Определить массу 5 м<sup>3</sup> водорода, 5 м<sup>3</sup> кислорода и 5 м<sup>3</sup> углекислоты при давлении 6 бар и температуре 100 °С.

Решение:

Характеристическое уравнение для произвольного количества газа (15) -

$$P V = m R T.$$

Значение газовой постоянной берем из таблицы (приложение А).

Получаем:

$$R_{H_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); R_{O_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$R_{CO_2} = 188,9 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Следовательно,

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 5}{R \cdot 373} = \frac{8042,8}{R}.$$

Отсюда:

$$m_{H_2} = \frac{8042,8}{4124} = 1,95 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = \frac{8042,8}{259,8} = 30,9 \text{ кг};$$

$$m_{CO_2} = \frac{8042,8}{189} = 42,6 \text{ кг}.$$

9 Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при 15°C. После расходования части кислорода давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10°C. Определить массу израсходованного кислорода.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$m = P \cdot V / (R \cdot T).$$

Следовательно, начальная и конечная масса кислорода соответственно равны:

$$m_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг}; \quad m_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг}.$$

Таким образом, расход кислорода

$$\Delta m = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг}.$$

10 Сосуд емкостью 10 м<sup>3</sup> заполнен 25 кг углекислого газа. Определить абсолютное давление в сосуде, если температура в нем 27°C.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$P = \frac{m R T}{V} = \frac{25 \cdot 189 \cdot 300}{10} = 141700 \text{ Па}.$$



11 Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если объем его равен  $1 \text{ м}^3$  при давлении 750 мм рт. ст. и температуре  $15^\circ\text{C}$ .

Решение:

На поверхности земли подъемная сила воздушного шара, наполненного водородом, равна разности сил тяжести (весов) воздуха и водорода в объеме шара:

$$N = N_{\text{возд}} - N_{\text{H}_2} = m_{\text{возд}} g - m_{\text{H}_2} g = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}),$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение силы тяжести на уровне земли.

Значения плотностей воздуха и водорода могут быть определены из уравнения состояния (16) :

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{P}{R T}.$$

Значения газовых постоянных могут быть легко вычислены или взяты из таблицы (приложение А):

$$R_{\text{возд}} = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}; R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Так как давление водорода и воздуха равно 750 мм рт. ст., то

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{287 \cdot 288} = 1,210 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{H}_2} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{4124 \cdot 288} = 0,084 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, подъемная сила шара

$$\Delta G = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}) = 9,81 \cdot 1 \cdot (1,210 - 0,084) = 11,1 \text{ Н}.$$

12 Какова будет плотность окиси углерода при  $20^\circ\text{C}$  и давлении 710 мм рт. ст., если при  $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. ст. она равна  $1,251 \text{ кг/м}^3$ ?

Решение:

Согласно уравнению (22) 
$$\rho_2 = \rho_1 \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно, 
$$\rho_2 = 1,251 \frac{710}{760} \frac{273}{273 + 20} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

## Задачи

24 Определить плотность окиси углерода при давлении 1 бар и температуре 15°C.

Ответ:  $\rho = 1,169 \text{ кг/м}^3$ .

25 Определить плотность и удельный объем двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) при нормальных условиях.

Ответ:  $\rho_n = 1,964 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_n = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

26 Определить удельный объем кислорода при температуре 280°C и давлении 23 бар.

Ответ:  $v = 0,0625 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

27 Чему равна плотность воздуха при давлении 15 бар и температуре 20°C, если плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,293 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ:  $\rho = 17,82 \text{ кг/м}^3$ .

28 Определить массу углекислого газа, содержащегося в сосуде объемом 4 м<sup>3</sup> при  $t = 80^\circ\text{C}$ . Давление газа по манометру равно 0,4 бар. Барометрическое давление 780 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 8,6 \text{ кг}$ .

29 В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 5 бар. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 8 бар температура воздуха не изменилась?

Ответ:  $V = 0,5 \text{ м}^3$ .

30 Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с 1200 до 250°C. Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаково?

Ответ: в 2,82 раза.

31 При какой температуре плотность азота (давлении 1,5 МПа) будет равна  $3 \text{ кг/м}^3$  ?

Ответ:  $t = 1422^\circ\text{C}$ .

32 Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра от  $P_1 = 18$  бар уменьшится до  $P_2 = 3$  бар? Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ:  $P_2 = 1/6 P_1$ .

33 В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором  $130\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $30^\circ\text{C}$ .

Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если нагрев его производится до  $400^\circ\text{C}$  при постоянном давлении.

Ответ:  $V = 288700 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

34 Определить газовую постоянную для кислорода, водорода и метана ( $\text{CH}_4$ ).

Ответ:  $R_{\text{O}_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
 $R_{\text{CH}_4} = 518,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

35 Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60 л, если давление кислорода по манометру равно 10,8 бар, а показание ртутного барометра — 745 мм рт. ст. при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $m = 0,91 \text{ кг}$ .

36 В сосуде находится воздух под разрежением 75 мм рт. ст. при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Ртутный барометр показывает 748 мм при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

Ответ:  $v = 0,876 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

37 Какой объем будут занимать 11 кг воздуха при давлении 0,44 МПа и температуре 18°C?

Ответ:  $V = 2,088 \text{ м}^3$ .

38 В цилиндре диаметром 60 см содержится 0,41 м<sup>3</sup> воздуха при  $P = 2,5$  бар и  $t_1 = 35$  °С. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 40 см?

Ответ:  $t_2 = 117,6$  °С.

39 В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр 0,6 м и высоту 2,4 м, находится воздух при температуре 18°C. Давление воздуха составляет 7,65 бар. Барометрическое давление (приведенное к нулю) равно 764 мм рт. ст. Определить массу воздуха в сосуде.

Ответ:  $m = 7,04$  кг.

40 В сосуде объемом 0,5 м<sup>3</sup> находится воздух при давлении 0,2 МПа и температуре 20°C. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило 420 мм рт. ст. при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно 768 мм при температуре ртути в нем, равной 18°C; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути 20°C.

Ответ:  $m = 1,527$  кг.

41 Резервуар объемом 4 м<sup>3</sup> заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа 0,4 бар, температура его 80°C, а барометрическое давление воздуха 780 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 8,64$  кг;  $N = 84,8$  Н.

42 Определить плотность и удельный объем водяного пара при нормальных условиях, принимая условно, что в этом состоянии пар будет являться идеальным газом.

Ответ:  $\rho_n = 0,804 \text{ кг/м}^3$ ;  $v = 1,243 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

43 Какой объем занимают 10 кмоль азота при нормальных условиях?

Ответ:  $V = 224 \text{ м}^3$ .

44 Какой объем занимает 1 кмоль газа при давлении 2 МПа и температуре 200 °С?

Ответ:  $v = 1,97 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .

45 При какой температуре 1 кмоль газа занимает объем 4 м<sup>3</sup>, если давление газа  $P = 1 \text{ кПа}$ ?

Ответ:  $t = 198 \text{ °С}$ .

46 Какова будет плотность кислорода при температуре 0 °С и давлении 600 мм рт. ст., если при 760 мм рт. ст. и 15 °С она равна 1,310 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ:  $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$ .

47 Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает резервуар при 10 °С, чем при 50 °С, если давление остается неизменным?

Ответ: в 1,14 раза.

48 Баллон емкостью 0,9 м<sup>3</sup> заполнен воздухом при температуре 17 °С. Присоединенный к нему вакуумметр показывает разрежение 600 мм рт. ст. Определить массу воздуха в баллоне, если показание барометра равно 740 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 0,2018 \text{ кг}$ .

49 Масса пустого баллона для кислорода емкостью 50 л равно 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  до давления 100 бар.

Ответ:  $m = 86,57$  кг.

50 Для автогенной сварки привезен баллон кислорода вместимостью 100 л. Определить массу кислорода, если его давление 12 МПа и температура  $16^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $m = 16$  кг.

51 Определить необходимый объем аэростата, наполненного водородом, если подъемная сила, которую он должен иметь на максимальной высоте  $H = 7000$  м, равна 39 240 Н. Параметры воздуха на указанной высоте принять равными:  $P = 0,41$  бар,  $t = -30^\circ\text{C}$ .

Насколько уменьшится подъемная сила аэростата при заполнении его гелием? Чему равен объем аэростата  $V_2$  на поверхности земли при давлении 0,981 бар и температуре  $30^\circ\text{C}$ ?

Ответ:  $V_1 = 7311$  м<sup>3</sup>;  $\Delta H = -177$  Н;  $V_2 = 3738$  м<sup>3</sup>.

52 Сжатый воздух в баллоне имеет температуру  $15^\circ\text{C}$ . Во время пожара температура воздуха в баллоне поднялась до  $450^\circ\text{C}$ .

Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа? Начальное давление 4,8 МПа.

Ответ: да.

53 Сосуд емкостью 4,2 м<sup>3</sup> наполнен 15 кг окиси углерода. Определить давление в сосуде, если температура газа в нем  $t = 27^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,18$  бар.

54 Воздух, заключенный в баллон емкостью 0,9 м<sup>3</sup>, выпускают в атмосферу. Температура его в начале равна  $27^\circ\text{C}$ . Определить массу выпущенного воздуха, если начальное давление в баллоне

составляло 93,2 бар, после выпуска — 42,2 бар, а температура воздуха снизилась до 17°C.

Ответ:  $m = 51,8$  кг.

55 По трубопроводу протекает 10 м<sup>3</sup>/с кислорода при температуре 127°C и давлении 4 бар. Определить массовый расход газа в секунду.

Ответ:  $G = 33,5$  кг/с.

56 Поршневой компрессор всасывает в минуту 3 м<sup>3</sup> воздуха при температуре 17°C и барометрическом давлении 750 мм рт. ст., нагнетает его в резервуар, объем которого равен 8,5 м<sup>3</sup>. За сколько минут компрессор поднимает давление в резервуаре до 7 бар, если температура в нем будет оставаться постоянной? Начальное давление воздуха составляло 750 мм рт. ст. при температуре 17°C.

Ответ: за 17 мин.

57 Дутьевой вентилятор подает в топку парового котла воздух в количестве 102000 м<sup>3</sup>/ч при 300°C и давлении 155 мм вод. ст. Барометрическое давление воздуха в помещении 755 мм рт. ст. Определить часовую производительность вентилятора в кубических метрах (при нормальных условиях).

Ответ:  $V = 48\,940$  м<sup>3</sup>/ч.

58 Компрессор подает воздух в резервуар. За время работы компрессора давление в резервуаре повышается от атмосферного до 7 бар, а температура — от 20 до 25°C. Объем резервуара - 56 м<sup>3</sup>. Барометрическое давление, приведенное к 0°C, равно 750 мм рт. ст. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар.

Ответ:  $m = 391,7$  кг.

### 1.3 Смеси идеальных газов

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан **массовыми** ( $g_i$ ) или **объемными** ( $r_i$ ) долями:

$$g_i = \frac{m_i}{m}; \quad r_i = \frac{v_i}{v}, \quad (23)$$

где  $m_i$  — массы отдельных газов;

$m$  — масса всей смеси;

$v_i$  — приведенные объемы (объем каждого компонента отнесен к давлению и температуре смеси) компонентов газов, входящих в смесь;

$v$  — общий объем газовой смеси.

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

Для перевода массовых долей в объемные пользуются формулой

$$r_i = \frac{g_i R_i}{R_{см}}, \quad (24)$$

где  $R_{см}$  - газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);

$R_i$  - газовая постоянная отдельных компонентов, входящих в смесь, Дж/(кг·К).

Перевод объемных долей в массовые производится по формуле

$$g_i = \frac{r_i R_{см}}{R_i}. \quad (25)$$



**Плотность смеси  $\rho_{см}$**  определяется из выражения

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i \quad (26)$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}, \quad (27)$$

где  $\rho_i$  - плотность отдельных компонентов, входящих в смесь, кг/м<sup>3</sup>.

**Молекулярная (мольная) масса газовой смеси  $\mu_{см}$**  определяется по формуле

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n (r_i \mu_i), \quad (28)$$

где  $\mu_i$  - мольная масса компонентов, входящих в смесь, кг/кмоль.

**Газовую постоянную** смеси газов  $R_{см}$  можно выразить либо через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, либо через молекулярную массу смеси

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n (g_i R_i), \quad \text{или} \quad (29)$$

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n (r_i \mu_i)}. \quad (30)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью (закон Дальтона):

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (31)$$

где  $P$  — общее давление газовой смеси;

$P_i$  — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

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

$$P_i = P r_i, \quad (32)$$

где  $P_i$  — парциальное давление любого газа, входящего в смесь.

### Примеры решения задач

13 Массовые доли кислорода и азота в атмосферном воздухе соответственно равны 0,232 и 0,768. Определить объемные доли кислорода и азота, газовую постоянную и молекулярную массу воздуха, парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру 760 мм рт. ст.

Решение:

Пересчет массовых долей в объемные осуществляется по уравнению (24). Газовая постоянная воздуха определяется по уравнению (29):

$$R_{\text{см}} = g_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Газовые постоянные кислорода и азота взяты из приложения А. Теперь можно рассчитать объемные доли компонентов смеси:

$$r_{\text{O}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,232 \cdot 259,8}{287} = 0,21,$$

$$r_{\text{N}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,768 \cdot 296,8}{287} = 0,79.$$

Молекулярная масса смеси определяется из уравнения (28):

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9 \text{ кг/кмоль}$$

или из уравнения (30):

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

Парциальные давления определяем из уравнения (32):

$$P_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} P = 0,21 \cdot 760 = 159,6 \text{ мм рт. ст.};$$

$$P_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} P = 0,79 \cdot 760 = 600,4 \text{ мм рт. ст.}$$

14 Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода 6,67%. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Решение:

Газовую постоянную смеси находим по уравнению (29), газовые постоянные компонентов смеси приведены в приложении А:

$$R_{\text{см}} = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,0667 \cdot 4124 + 0,9333 \cdot 296,8 = 552 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Удельный объем газовой смеси найдем из характеристического уравнения (16):

$$v_{\text{H}} = \frac{R T_{\text{H}}}{P_{\text{H}}} = \frac{552 \cdot 273}{101325} = 1,49 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

### Задачи

59 В 1 м<sup>3</sup> сухого воздуха содержится примерно 0,21 м<sup>3</sup> кислорода и 0,79 м<sup>3</sup> азота. Определить массовый состав воздуха, его газовую постоянную и парциальные давления кислорода и азота.

Ответ:  $g_{\text{O}_2} = 0,232$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,768$ ;  $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;

$$P_{\text{N}_2} = 0,79 P_{\text{см}}; \quad P_{\text{O}_2} = 0,21 P_{\text{см}}.$$

60 Определить газовую постоянную смеси газов, состоящей из 1 м<sup>3</sup> генераторного газа и 1,5 м<sup>3</sup> воздуха, взятых при нормальных условиях, и найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа принять равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

$$\text{Ответ: } R_{\text{см}} = 295 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); P_{\text{г.г}} = 0,4 P_{\text{см}}; P_{\text{возд}} = 0,6 P_{\text{см}}.$$

61 Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: CO<sub>2</sub>=12,3%; O<sub>2</sub>=7,2%; N<sub>2</sub>=80,5%. Найти молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем продуктов сгорания при давлении 750 мм. рт. ст. и температуре 800°C.

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}}=30,3 \text{ кг/кмоль}; R_{\text{см}}=274 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг/м}^3.$$

62 Генераторный газ имеет следующий объемный состав: H<sub>2</sub>=7%; CH<sub>4</sub>=2%; CO=27,6%; CO<sub>2</sub>=4,85%; N<sub>2</sub>=58,6%. Определить массовые доли, молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при 15°C и 0,1 МПа.

$$\text{Ответ: } g_{\text{H}_2}=0,005; g_{\text{CH}_4}=0,012; g_{\text{CO}}=0,289; g_{\text{CO}_2}=0,079;$$

$$g_{\text{N}_2}=0,615; \mu_{\text{см}}=26,72 \text{ кг/кмоль}; R_{\text{см}}=310,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\rho_{\text{см}}=1,095 \text{ кг/м}^3; P_{\text{H}_2}=0,07 \text{ бар}.$$

63 Газ коксовых печей имеет следующий объемный состав: H<sub>2</sub>=57%; CH<sub>4</sub>=23%; CO=6%; CO<sub>2</sub>=2%; N<sub>2</sub>=12%. Определить молекулярную массу, массовые доли, газовую постоянную и плотность при температуре 15°C и давлении 1 бар.

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}}=10,77 \text{ кг/кмоль}; g_{\text{H}_2}=0,107; g_{\text{CO}_2}=0,082;$$

$$R_{\text{см}}=772 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \rho_{\text{см}}=0,45 \text{ кг/м}^3.$$

64 Генераторный газ состоит из следующих объемных частей:  $H_2=18\%$ ;  $CO=24\%$ ;  $CO_2=6\%$ ;  $N_2=52\%$ . Определить газовую постоянную генераторного газа и массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ:  $R_{см} = 342 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $g_{CO_2} = 10,86\%$ ;

$g_{N_2} = 60,03\%$ ;  $g_{H_2} = 1,48\%$ ;  $g_{CO} = 27,63\%$ .

65 Анализ продуктов сгорания топлива показал следующий их состав:  $CO_2=12,2\%$ ;  $O_2=7,1\%$ ;  $CO=0,4\%$ ;  $N_2= 80,3\%$ . Определить массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ:  $g_{CO_2} = 17,7\%$ ;  $g_{O_2} = 7,5\%$ ;  $g_{CO} = 0,37\%$ ;

$g_{N_2} = 74,43\%$ .

66 Определить газовую постоянную, плотность при нормальных условиях и объемный состав смеси, если ее массовый состав следующий:  $H_2=8,4\%$ ;  $CH_4=48,7\%$ ;  $C_2H_4=6,9\%$ ;  $CO=17\%$ ;  $CO_2=7,6\%$ ;  $O_2=4,7\%$ ;  $N_2=6,7\%$ .

Ответ:  $R_{см} = 717 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $r_{O_2} = 0,017$ ;  $r_{N_2} = 0,028$ ;

$r_{H_2} = 0,484$ ;  $r_{CO_2} = 0,02$ ;  $\rho_H = 0,518 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

67 Определить газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если объемный состав смеси следующий:  $CO_2=12\%$ ;  $CO=1\%$ ;  $H_2O=6\%$ ;  $O_2=7\%$ ;  $N_2=74\%$ , а общее давление ее составляет 750 мм рт. ст.

Ответ:  $R_{см} = 281 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $v = 0,76 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$P_{CO_2} = 90 \text{ мм рт. ст.}$

68 В резервуаре емкостью  $125 \text{ м}^3$  находится газ при давлении 5 бар и температуре  $18^\circ\text{C}$ . Объемный состав газа следующий:  $H_2=0,46$ ;  $CH_4=0,32$ ;  $CO=0,15$ ;  $N_2=0,07$ . После расходования некоторого

количества газа давление его понизилось до 3 бар, а температура упала до 12°C. Определить массу израсходованного коксового газа.

Ответ:  $m = 2167$  кг.

69 Массовый состав смеси следующий:  $\text{CO}_2=18\%$ ;  $\text{O}_2=12\%$  и  $\text{N}_2=70\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при температуре 180°C 8 кг ее занимали объем, равный 4 м<sup>3</sup>.

Ответ:  $P = 0,24$  МПа.

70 Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа 1,2 бар, а давление смеси 3 бар.

Ответ:  $g_{\text{CO}_2} = 0,512$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,488$ .

71 Газовая смесь имеет следующий массовый состав:  $\text{CO}_2=12\%$ ;  $\text{O}_2=8\%$  и  $\text{N}_2=80\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы плотность ее составляла 1,6 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ: до 0,213 МПа.

72 Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называют гремучим газом. Определить газовую постоянную смеси.

Ответ:  $R = 693$  Дж/(кг·К).

73 Определить массовые доли кислорода и азота, содержащиеся в воздухе, если известно, что в 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится 0,21 м<sup>3</sup>  $\text{O}_2$  и 0,79 м<sup>3</sup>  $\text{N}_2$ . Определить плотность воздуха и парциальные давления компонентов при 30°C и 745 мм рт. ст.

Ответ:  $g_{\text{O}_2} = 0,233$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,767$ ;  $\rho = 1,14$  кг/м<sup>3</sup>;

$P_{\text{O}_2} = 20,85$  кПа;  $P_{\text{N}_2} = 78,45$  кПа.

## 1.4 Теплоемкость газов

**Теплоемкостью** называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо его количественной единицы на 1°С. В зависимости от выбранной количественной единицы различают **молярную** теплоемкость [ $C_\mu$  - Дж/(кмоль·К)], **массовую** теплоемкость [ $C$  - Дж/(кг·К)] и **объемную** теплоемкость [ $C'$  - Дж/(м<sup>3</sup>·К)]. Принято относить 1 м<sup>3</sup> газа к нормальным условиям, поэтому в дальнейшем изложении объемная теплоемкость будет относиться к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> его, при нормальных условиях.

Пересчет джоулей в калории и обратно производится по соотношениям:

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}; 1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал.}$$

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Пересчет производится по следующим формулам:

$$C = \frac{C_\mu}{\mu}, \quad (33)$$

$$C' = \frac{C_\mu}{22,4}, \quad (34)$$

$$C' = C \rho_n, \quad (35)$$

где  $\mu$  - молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$\rho_n$  - плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкость:

$$\bar{C} = \frac{q}{t_2 - t_1}, \quad (36)$$

$$C = \frac{dq}{dt}, \quad (37)$$

где  $\bar{C}$  - средняя теплоемкость в пределах  $t_1 - t_2$ ;

$C$  – истинная теплоемкость;

$q$  — количество тепла, сообщаемого единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$ .

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления. Таким образом, различают **истинную и среднюю теплоемкости**:

а) мольную — при постоянном объеме ( $C_{\mu v}$  и  $\bar{C}_{\mu v}$ ) и постоянном давлении ( $C_{\mu p}$  и  $\bar{C}_{\mu p}$ );

б) массовую — при постоянном объеме ( $C_v$  и  $\bar{C}_v$ ) и постоянном давлении ( $C_p$  и  $\bar{C}_p$ );

в) объемную — при постоянном объеме ( $C'_v$  и  $\bar{C}'_v$ ) и постоянном давлении ( $C'_p$  и  $\bar{C}'_p$ ).

Между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существуют следующие зависимости:

$$C_p = C_v + R; \quad \frac{C_p}{C_v} = k, \quad (38)$$

где  $k$  – **показатель адиабаты**, зависит от атомности молекул, для одноатомных газов  $k = 1,67$  для двухатомных газов  $k = 1,4$ ; для трех- и многоатомных газов  $k = 1,33$ .



Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет криволинейный характер. В приложении Б приведены величины теплоемкостей для наиболее часто встречающихся в теплотехнических расчетах в интервале температур от 0°С до  $t$ . Расчеты средней теплоемкости в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  производят по следующей формуле:

$$\bar{C}_{t_1}^{t_2} = \frac{C_0^{t_2} \cdot t_2 - C_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad (39)$$

где  $C_0^t$  - теплоемкость газа в интервале от 0°С до  $t$ , значения берутся из таблиц Б.1-Б.6, в необходимых случаях производится интерполирование.

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания  $m$  кг или  $V_H$  м<sup>3</sup> газа в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ , при постоянном объеме  $Q_V$  или постоянном давлении  $Q_P$  пользуются формулами:

$$Q_V = m (\bar{C}_{v_0}^{t_2} t_2 - \bar{C}_{v_0}^{t_1} t_1) = V_H (\bar{C}_{v_0}'^{t_2} t_2 - \bar{C}_{v_0}'^{t_1} t_1), \quad (40)$$

$$Q_P = m (\bar{C}_{p_0}^{t_2} t_2 - \bar{C}_{p_0}^{t_1} t_1) = V_H (\bar{C}_{p_0}'^{t_2} t_2 - \bar{C}_{p_0}'^{t_1} t_1). \quad (41)$$

Часто в теплотехнических расчетах нелинейную зависимость теплоемкости от температуры заменяют близкой к ней линейной зависимостью. В этом случае истинная теплоемкость определяется из уравнения

$$C = a + b t, \quad (42)$$

а для определения средней теплоемкости при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$  пользуются уравнением

$$\bar{C} = a + b \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (43)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для данного газа (приложение В).

Для средней теплоемкости в пределах от 0°С до t эта формула принимает вид

$$\bar{C} = a + \frac{b}{2} t. \quad (44)$$

Для приближенных расчетов можно пользоваться следующими формулами:

$$C_v = \frac{R}{k-1}; \quad C_p = \frac{R k}{k-1}. \quad (45)$$

**Теплоемкость газовой смеси** определяется на основании следующих формул:

массовая теплоемкость смеси -

$$C_{см} = \sum_{i=1}^n (g_i C_i); \quad (46)$$

объемная теплоемкость смеси -

$$C'_{см} = \sum_{i=1}^n (r_i C'_i); \quad (47)$$

мольная теплоемкость смеси -

$$C_{\mu см} = \sum_{i=1}^n (r_i C_{\mu i}). \quad (48)$$

### Примеры решения задач

15 Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $C = \text{const}$ .

Решение:

Массовую теплоемкость можно рассчитать по уравнению (45).

Показатель адиабаты для двухатомных газов равен 1,4. Газовая постоянная для кислорода приведена в приложении А.

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{259,8}{1,4-1} = 649,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$C_p = \frac{R k}{k-1} = \frac{259,8 \cdot 1,4}{1,4-1} = 909,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для пересчета массовой теплоемкости в объемную необходимо знать плотность газа (см. приложение А):

$$C'_v = C_v \rho_n = 649,5 \cdot 1,429 = 928,1 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$C'_p = C_p \rho_n = 909,3 \cdot 1,429 = 1299,4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

16 Вычислить среднюю массовую и объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур от 0 до 1200<sup>0</sup>С, если известно, что средняя мольная теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении в этом интервале температур равна 32,192 кДж/(кмоль·К).

Решение:

На основании формулы (33) определим среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении:

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{C}_{\mu p}}{\mu} = \frac{32192}{28} = 1149,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (38):

$$\bar{C}_v = \bar{C}_p - R = 1149,7 - 296,8 = 852,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (35):

$$\bar{C}'_v = \bar{C}_v \rho_n = 852,9 \cdot 1,25 = 1066,1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

17 Вычислить среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800°С [в кДж/(кг·К)], считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800°С можно рассчитать по уравнению (39). Пользуясь табл. Б.3, получаем для воздуха:

$$\bar{C}_{p0}^{800} = 1,0710 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \bar{C}_{p0}^{200} = 1,0115 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отсюда

$$\bar{C}_{p200}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

18 Решить предыдущую задачу, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

Средняя массовая теплоемкость для воздуха определяется из выражения (табл. В.1)

$$\bar{C}_p = 0,9952 + 0,00009349 \frac{t_1 + t_2}{2} = 1,0419 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

19 Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении для кислорода в пределах 350 - 1000°С:

- а) считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной;
- б) считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

а) Исходя из уравнения (39) и данных табл. Б.3 определяем:

$$\bar{C}_{p350}^{1000} = \frac{1,035 \cdot 1000 - 0,9576 \cdot 350}{1000 - 350} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

б) Пользуясь формулой (43) и данными табл. В.1, получаем:

$$\bar{C}_{p\ 350}^{1000} = 0,9127 + 0,00012724 \frac{350+1000}{2} = 0,9986 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

20 Воздух в количестве  $6 \text{ м}^3$  при давлении 3 бар и температуре  $25^\circ\text{C}$  нагревается при постоянном давлении до  $130^\circ\text{C}$ . Определить количество подведенного к воздуху тепла, считая  $C=\text{const}$ .

Решение:

Количество теплоты можно определить по уравнению (41). Для этого необходимо вычислить массу и теплоемкость воздуха. Массу газа определяем по уравнению (15)

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6}{287 \cdot 298} = 21 \text{ кг.}$$

На основании формулы (45) и данных приложения А имеем:

$$C_p = \frac{R k}{k - 1} = \frac{287 \cdot 1,4}{1,4 - 1} = 1004,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$Q_p = m C_p (t_2 - t_1) = 21 \cdot 1004,5 \cdot (130 - 25) = 2,2 \text{ МДж.}$$

21 В закрытом сосуде объемом 300 л находится воздух при давлении 8 бар и температуре  $20^\circ\text{C}$ . Какое количество тепла необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до  $120^\circ\text{C}$ ? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$m = \frac{V P}{R T} = \frac{3 \cdot 10^{-1} \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 1,07 \text{ кг.}$$

Для воздуха (двухатомный газ), считая теплоемкость величиной постоянной, имеем:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Количество подведенного тепла согласно уравнению (40)

$$Q = m C_v (t_2 - t_1) = 1,07 \cdot 717,5 \cdot 100 = 76772 \text{ Дж} .$$

Теплоемкость воздуха с учетом ее зависимости от температуры определяем из табл. В.1. Пользуясь интерполяцией, находим:

$$C_v = 0,7209 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Относительная ошибка, следовательно, равна:

$$\frac{0,7209 - 0,7175}{0,7209} \cdot 100 = 0,6 \% .$$

Незначительная величина ошибки объясняется малым интервалом температур. При большой разности температур относительная ошибка может достигнуть весьма большой величины.

22 В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении 2 бар и температуре 20°C. Какое количество тепла необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до 300°C? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Решение:

Количество тепла, сообщаемое газу при  $v=\text{const}$ , определяется на основании формулы (40). Объем газа, заключенного в сосуде, приведенный к нормальным условиям, определяется по уравнению (21):

$$V_n = \frac{P V T_n}{P_n T} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 273}{1,013 \cdot 293} = 0,552 \text{ м}^3 .$$

Значения теплоемкостей определяем по табл. Б.6 и, следовательно,

$$Q_v = 0,552 \cdot (0,9852 \cdot 300 - 0,9374 \cdot 20) = 152,8 \text{ кДж.}$$

Конечное давление можно определить, если воспользоваться характеристическими уравнениями для начального и конечного состояний кислорода:

$$P_1 v = R T_1; \quad P_2 v = R T_2.$$

Следовательно,

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot \frac{573}{293} = 3,9 \text{ бара.}$$

23 В калориметре с идеальной тепловой изоляцией находится вода в количестве 0,8 кг при температуре  $t' = 15^\circ \text{C}$ . Калориметр изготовлен из серебра, теплоемкость которого  $C_c = 0,2345 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Масса калориметра 0,25 кг. В калориметр опускают 200 г алюминия при температуре  $t_a = 100^\circ \text{C}$ . В результате этого температура воды повышается до  $t'' = 19,24^\circ \text{C}$ . Определить теплоемкость алюминия.

Решение:

Обозначим массу алюминия, помещаемого в калориметр, через  $m_a$ , а теплоемкость алюминия — через  $C_a$ . Тогда уравнение теплового баланса для калориметра будет иметь вид

$$(m_b c_b + m_c c_c) t' + m_a c_a t_a = (m_b c_b + m_c c_c + m_a c_a) t''.$$

Производя простейшие преобразования и решая это уравнение относительно  $C_a$ , получаем:

$$C_a = \frac{(m_b c_b + m_c c_c) (t'' - t')}{m_a (t_a - t'')}.$$

Подставляя в полученное выражение значения входящих в него величин, получим

$$C_a = \frac{(0,8 \cdot 4,1868 + 0,25 \cdot 0,2345) (19,24 - 15)}{0,2 (100 - 19,24)} = 0,8946 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

## Задачи

74 Определить значение массовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $C = \text{const}$ .

$$\text{Ответ: } C_p = 0,916 \text{ кДж/(кг·К);}$$

$$C_v = 0,654 \text{ кДж/(кг·К).}$$

75 Определить среднюю массовую теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении в пределах  $0 - 825^\circ\text{C}$ , считая зависимость от температуры нелинейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_{p0}^{825} = 1,090 \text{ кДж/(кг·К).}$$

76 Вычислить значение истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении для температуры  $1000^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Определить относительную ошибку по сравнению с табличными данными.

$$\text{Ответ: } C_{\mu p} = 36,55 \text{ кДж/(кмоль·К); } \varepsilon = 1,79 \% .$$

77 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p$  и  $\bar{C}_v'$  в пределах от  $200^\circ\text{C}$  до  $800^\circ\text{C}$  для  $\text{CO}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_p = 1,1216 \text{ кДж/(кг·К);}$$

$$\bar{C}_v' = 1,0371 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К).}$$

78 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p'$  и  $\bar{C}_v'$  для воздуха в пределах  $400 - 1200^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_p' = 1,4846 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К); } \bar{C}_v' = 1,1137 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К).}$$



79 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p$  и  $\bar{C}_v'$  углекислого газа в пределах 400 - 1000°C, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,2142$  кДж/(кг·К);  $\bar{C}_v' = 2,3865$  кДж/(м<sup>3</sup>·К).

80 Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах 200 - 800°C, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $\bar{C}_v = 0,8164$  кДж/(кг·К).

81 Решить предыдущую задачу, если известно, что средняя молярная теплоемкость азота при постоянном давлении может быть определена по формуле

$$\bar{C}_{\mu p} = 28,7340 + 0,0023488 \bar{t}.$$

Ответ:  $\bar{C}_v = 0,8122$  кДж/(кг·К).

82 Воздух охлаждается от 1000 до 100°C в процессе с постоянным давлением. Какое количество тепла теряет 1 кг воздуха? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Ответ: 1)  $q = - 911,9$  кДж/кг; 2)  $q = - 990,1$  кДж/кг;  $\varepsilon = 8 \%$ .

83 Пользуясь формулой, которую получили в предыдущей задаче, определить истинную молярную теплоемкость кислорода при постоянном давлении для температуры 700°C. Сравнить полученное значение теплоемкости со справочным значением.

Ответ:  $C_{\mu} = 34,725$  кДж/(кмоль·К).

84 Найти количество тепла, необходимое для нагрева 1 м<sup>3</sup> (при нормальных условиях) газовой смеси следующего объемного состава:

$\text{CO}_2=14,5\%$ ,  $\text{O}_2=6,5\%$ ,  $\text{N}_2=79,0\%$  от 200 до 1200°C при  $P=\text{const}$  и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

Ответ:  $q = 1582,2 \text{ кДж/м}^3$ .

85 Газовая смесь имеет следующий состав по объему:  $\text{CO}_2 - 0,12$ ;  $\text{O}_2 - 0,07$ ;  $\text{N}_2 - 0,75$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0,06$ . Определить среднюю массовую теплоемкость, если смесь нагревается при постоянном давлении от 100 до 300°C.

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,0928 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

86 В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от 150 до 600°C. Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 360 кг/ч. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Ответ:  $Q = 47,84 \text{ кДж/с}$ .

87 Продукты сгорания топлива поступают в газоход парового котла при температуре газов 1100°C и покидают газоход при температуре 700°C. Состав газов по объему:  $\text{CO}_2=11\%$ ,  $\text{O}_2=6\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}=8\%$ ,  $\text{N}_2=75\%$ . Определить, какое количество тепла теряет 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, взятой при нормальных условиях.

Ответ:  $q = 697,5 \text{ кДж/м}^3$ .

88 В закрытом резервуаре объемом 100 л находится воздух при 0°C и давлении 760 мм рт. ст. Определить количество теплоты, затраченное на нагревание этого воздуха до 200°C.

Ответ:  $Q = 18,8 \text{ кДж}$ .

## 1.5 Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии. Аналитическое выражение закона в дифференциальной форме для любого тела имеет следующий вид:

$$dQ = dU + dL \quad (49)$$

или, если масса равна 1 кг, -

$$dq = du + dl, \quad (50)$$

где Q и q – полное и удельное количество теплоты, подводимое к рабочему телу;

U и u – полная и удельная внутренняя энергия рабочего тела;

L и l – полная и удельная работа.

Единицей измерения количества теплоты и работы является джоуль. **Джоуль** (Дж) – единица измерения механической энергии, представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 Н, на пути в 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы. Единицей измерения мощности является ватт (Вт): 1 Вт = 1 Дж / с. Количественная связь между единицами энергии приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношения между единицами энергии

Единицы измерения	Килоджоули (кДж)	Килокалории (ккал)	Киловатт – часы (кВт·ч)	Лошадиная сила – часы (л.с. · ч)
1 кДж	1	0,239	0,000278	0,000378
1 ккал	4,1868	1	0,001163	0,001581
1 кВт·ч	3600	859,8	1	1,36
1 л. с · ч	2650	632,4	0,7355	1

В термодинамике изменение **внутренней энергии** определяют по формуле

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (51)$$

где  $U_1$  – внутренняя энергия в начальном состоянии, Дж;

$U_2$  – внутренняя энергия в конечном состоянии, Дж.

Для бесконечно малого изменения состояния:

$$du = C_v dT. \quad (52)$$

Изменение полной внутренней энергии для конечного интервала изменения температуры можно определить по формулам:

$$\Delta u = \bar{C}_v (T_2 - T_1); \quad \Delta U = m \bar{C}_v (T_2 - T_1). \quad (53)$$

В формулах (52-53):

$\bar{C}_v$  – средняя теплоемкость рабочего тела (в интервале температур  $T_1 - T_2$ ) при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$m$  – масса рабочего тела, кг.

**Работа**, совершаемая системой при изменении объема, определяется по формулам:

$$dl = P dv; \quad l = \int_{v_1}^{v_2} P dv. \quad (54)$$

**Энтальпия** представляет собой полную энергию термодинамической системы, равную сумме внутренней энергии системы и потенциальной энергии, которая обусловлена тем, что газ находится под давлением. Единицы измерения полной энтальпии (H) – джоуль, удельной энтальпии (h) – джоуль на килограмм.

Элементарное изменение энтальпии

$$dh = du + d(pv) = C_p dT \quad (55)$$

или для конечного процесса при произвольной массе газа

$$\Delta H = m \bar{C}_p (T_2 - T_1). \quad (56)$$

Энтальпия – это теплота, подводимая к телу в процессе нагрева его при постоянном давлении. Первый закон термодинамики может быть записан следующим образом:

$$dq = dh - v dp. \quad (57)$$

Математическое выражение **1-го закона термодинамики для потока газа** -

$$q_n = h_2 - h_1 + l_T + (\omega_2^2 - \omega_1^2) / 2. \quad (58)$$

В дифференциальном виде уравнение (58) имеет вид

$$dq_n = dh + dl_T + \omega d\omega. \quad (59)$$

В уравнениях (58) – (59):

$q_n$  – теплота, подводимая к потоку газа извне, Дж;

$\omega$  - скорость газового потока, м/с.

**При смешении** химически невзаимодействующих газов, имеющих различные давления и температуры, необходимо уметь определять конечное состояние смеси. Если газы до смешения занимают объемы  $V_1, V_2, \dots, V_n$  при давлениях  $P_1, P_2, \dots, P_n$  и температурах  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а показатели адиабаты равны  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то параметры смеси определяются по формулам (смешение газов при  $V = \text{const}$ ):

температура смеси

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{k_i - 1}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{(k_i - 1) T_i}}; \quad (60)$$

давление смеси

$$P = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}; \quad (61)$$

объем смеси

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (62)$$

Для газов, у которых равны показатели адиабаты, формулы (60), (61) имеют вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}}; \quad P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{V}. \quad (63)$$

Если массовые расходы смешивающихся потоков равны  $G_1, G_2, \dots, G_n$  (килограмм в час), объемные расходы  $V_1, V_2, \dots, V_n$  (кубических метров в час), давления газов -  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , температуры -  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а показатели адиабаты равны  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то температура смеси определяется по формуле

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} \frac{P_i V_i}{T_i}}. \quad (64)$$

Объемный расход смеси в единицу времени при температуре  $T$  и давлении  $P$

$$V = \frac{T}{P} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}. \quad (65)$$

Для газов, у которых значения  $k$  равны, температура смеси определяется формулой (63). Если газовые потоки, помимо одинаковых значений  $k$ , имеют также равные давления, то формулы (64) и (65) принимают вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}}, \quad V = T \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}. \quad (66)$$

Все уравнения, относящиеся к смешению газов, выведены при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

**Коэффициент полезного действия** (КПД) тепловых установок характеризует степень совершенства превращения тепла в работу. КПД может быть вычислен, если известны расход топлива на 1 кВт·ч и теплота сгорания топлива (количество тепла, которое выделяется при полном сгорании массовой или объемной единицы топлива. Если расход топлива на 1 кВт·ч (обозначение -  $b$ ) выражен в килограммах на киловатт-час, а теплота сгорания топлива  $Q_H^P$  - в килоджоулях на килограмм, КПД тепловой установки определяется из выражения

$$\eta = \frac{3600}{Q_H^P b} . \quad (67)$$

Если же теплота сгорания выражена в килокалориях на килограмм, то формула (67) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{860}{Q_H^P b} . \quad (68)$$

### Примеры решения задач

24 В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28900 кДж/кг. Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% тепла, полученного при сгорании угля.

Решение:

Количество тепла, превращенного в электрическую энергию за 20 ч работы,

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18 = 3,2 \cdot 10^9 \text{ кДж.}$$

Эквивалентная ему электрическая энергия или работа

$$L = \frac{3,2 \cdot 10^9}{3600} = 89590 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, средняя электрическая мощность станции

$$N = 89590 / 20 = 4479 \text{ кВт}.$$

25 Паросиловая установка мощностью 4200 кВт имеет КПД, равный 0,2. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания равна 25000 кДж/кг.

Решение:

По формуле (67) находим выражение для расхода топлива:

$$b = \frac{3600}{\eta Q_H^P} = \frac{3600}{0,2 \cdot 25000} = 0,72 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Часовой расход топлива составит:

$$0,72 \cdot 4200 = 3024 \text{ кг/ч}.$$

26 Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при изменении его температуры от 300 до 50 °С. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной.

Решение:

Изменение внутренней энергии можно определить на основании формулы (53). Рассчитаем среднюю теплоемкость воздуха в данном интервале температур (табл. В.1):

$$\bar{C}_v = 0,7084 + 0,00009349 \frac{300 + 50}{2} = 0,7248 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$\Delta U = 1 \cdot 0,7248 \cdot (50 - 300) = -181,2 \text{ кДж}.$$



## Задачи

89 Определить часовой расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 25 МВт, если теплота сгорания топлива 33,85 МДж/кг и известно, что на превращение тепловой энергии в механическую используется только 35% тепла сожженного топлива.

Ответ:  $G = 7,59$  т/ч.

90 Мощность турбогенератора 12000 кВт, КПД генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55°C? Температура в машинном отделении равна 20°C; среднюю теплоемкость воздуха принять равной 1,0 кДж/(кг·K).

Ответ:  $G = 10,3$  кг/с.

91 Использование атомной энергии для производства тепловой или электрической энергии в техническом отношении означает применение новых видов топлив - ядерных горючих. Количество энергии, выделяемой при расщеплении 1 кг ядерных горючих, может быть условно названо их «теплотой сгорания». Для урана эта величина равна  $22,9 \cdot 10^6$  кВт·ч/кг. Во сколько раз уран как горючее эффективнее каменного угля с теплотой сгорания 27500 кДж/кг?

Ответ: В 3 млн. раз.

92 Важнейшим элементом атомной электростанции является реактор, или «атомный котел». Тепловой мощностью реактора называют полное количество тепла, которое выделяется в нем в течение часа. Обычно эту мощность выражают в киловаттах.

Определить годовой расход ядерного горючего для реактора с тепловой мощностью 500000 кВт, если теплота сгорания применяемо-

го урана равна  $22,9 \cdot 10^6$  кВт·ч/кг, а время работы реактора составляет 7000 ч.

Ответ:  $G = 153$  кг/год.

93 Теплоемкость газа при постоянном давлении опытным путем может быть определена в проточном калориметре. Для этого пропускают через трубопровод исследуемый газ и нагревают его электронагревателем. При этом измеряют количество газа, пропускаемого через трубопровод, температуры газа перед и за электронагревателем и расход электроэнергии. Давление воздуха в трубопроводе принимают неизменным. Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом проточного калориметрирования, если расход воздуха через трубопровод 690 кг/ч, мощность электронагревателя 0,5 кВт, температура воздуха перед электронагревателем  $18^\circ\text{C}$ , а температура воздуха за электронагревателем  $20,6^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,0$  кДж/(кг·К).

94 Метод проточного калориметрирования, описанный в предыдущей задаче, может быть также использован для определения количества газа или воздуха, протекающего через трубопровод. Определить часовой расход воздуха  $G$  кг/ч, если мощность электронагревателя 0,8 кВт, а приращение температуры воздуха составило  $1,8^\circ\text{C}$ . Определить также скорость воздуха  $\omega$  в трубопроводе за электронагревателем, если давление воздуха 900 мм. рт. ст., температура его за электронагревателем  $20,2^\circ\text{C}$ , а диаметр трубопровода 125 мм.

Ответ:  $G = 1600$  кг/ч,  $\omega = 25,4$  м/с.

95 При испытании двигателей внутреннего сгорания широким распространением пользуются так называемые гидротормоза. Работа двигателя при этом торможении превращается в теплоту трения и для уменьшения нагрева тормозного устройства применяется водяное ох-

лаждение. Определить часовой расход воды на охлаждение тормоза, если мощность двигателя 45 л.с., начальная температура воды 15°C; принять, что вся теплота трения передается охлаждающей воде.

Ответ:  $G = 632$  кг/ч.

96 При испытании нефтяного двигателя было найдено, что удельный расход топлива равен 170 г/(л.с.·ч). Определить эффективный КПД этого двигателя, если теплота сгорания топлива равна 41000 кДж/кг.

Ответ:  $\eta = 0,38$ .

97 В котельной электростанции за 10 часов работы сожжено 100 т каменного угля с теплотой сгорания 29300 кДж/кг. Определить количество выработанной электроэнергии и среднюю мощность станции, если КПД процесса преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 20%.

Ответ:  $Q = 162780$  кВт·ч;  $N_{\text{ср}} = 16278$  кВт.

98 В сосуд, содержащий 5 л воды при температуре 20°C, помещен электронагреватель мощностью 800 Вт. Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагревалась до температуры 100°C. Потерями тепла сосуда в окружающую среду пренебречь.

Ответ: 30 мин.

99 В калориметр, содержащий 0,6 л воды при температуре 20°C, опускают стальной образец массой 0,4 кг, нагретый до 200°C. Определить теплоемкость стали, если повышение температуры воды составило 12,5°C. Массой калориметра пренебречь.

Ответ:  $C = 0,469$  кДж/(кг·К).

100 Свинцовый шар падает с высоты 100 м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в тепло. Одна треть образовавшегося тепла передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание

шара. Теплоемкость свинца  $0,030$  ккал/(кг·К). Определить повышение температуры шара.

Ответ:  $\Delta t = 52^\circ$ .

101 Автомобиль массой  $1,5$  т останавливается под действием тормозов при скорости  $40$  км/ч. Определить конечную температуру тормозов  $t_2$ , если их масса равна  $15$  кг, начальная температура  $10^\circ\text{C}$ , а теплоемкость стали, из которой изготовлены тормозные части, равна  $0,46$  кДж/(кг·К). Потерями тепла в окружающую среду пренебречь.

Ответ:  $t_2 = 23,4^\circ\text{C}$ .

102 Предполагая, что все потери гидротурбины превращаются в тепло и тратятся на нагрев воды, определить КПД турбины по следующим данным: высота падения воды равна  $400$  м, нагрев воды составляет  $0,2^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\eta = 78,6\%$ .

103 В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание  $200$  кг стали на  $40^\circ\text{C}$  в течение  $20$  мин. Определить вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять равной  $0,46$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $3,07$  кВт.

104 Найти изменение внутренней энергии  $2$  м<sup>3</sup> воздуха, если температура его понижается от  $250$  до  $70^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха  $6$  бар. Ответ дать в килокалориях.

Ответ:  $\Delta U = 253,8$  ккал.

105 К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне  $100$  кДж тепла. Величина произведенной работы при этом составляет  $115$  кДж. Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно  $0,8$  кг.

Ответ:  $\Delta U = - 18,2$  кДж.

106  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 5 бар и температуре  $50^\circ\text{C}$  смешиваются с  $10 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 2 бар и температуре  $100^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру смеси.

Ответ:  $t_{\text{см}} = 82^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{см}} = 2,5$  бар.

107 В двух разобщенных между собой сосудах содержатся: 50 л азота при давлении 20 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  и 200 л углекислого газа при давлении 5 бар и температуре  $600^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Ответ:  $T = 684$  К;  $P = 8,9$  бар.

108 Три разобщенных между собой сосуда А, В, С заполнены различными газами. В сосуде А, имеющем объем 10 л, находится оксид серы  $\text{SO}_2$  при давлении 60 бар и температуре  $100^\circ\text{C}$ , в сосуде В с объемом 5 л — азот при давлении 4 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  и в сосуде С с объемом 5 л — азот при давлении 20 бар и температуре  $300^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов между собой. Считать, что теплообмен со средой отсутствует.

Ответ:  $P = 21,8$  бар,  $t = 118^\circ\text{C}$ .

109 В одном сосуде находится 100 л водорода при давлении 15 бар и температуре  $1200^\circ\text{C}$ , а в другом - 50 л азота при давлении 30 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Ответ:  $t = 467^\circ\text{C}$ ;  $P = 20,8$  бар.

110 Уходящие из трех паровых котлов газы при давлении 1 бар смешиваются в сборном газоходе и через дымовую трубу удаляются в

атмосферу. Объемный состав уходящих газов из отдельных котлов следующий: из первого котла -  $\text{CO}_2=10,4\%$ ;  $\text{O}_2 =7,2\%$ ;  $\text{N}_2=77,0\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}=5,4\%$ ; из второго котла -  $\text{CO}_2 = 11,8\%$ ;  $\text{O}_2 = 6,9\%$ ;  $\text{N}_2 = 75,6\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 5,8\%$ ; из третьего котла -  $\text{CO}_2= 12,0\%$ ;  $\text{O}_2 = 4,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 77,8\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 6,1\%$ . Часовые расходы газов составляют  $G_1 = 12\ 000$  кг/ч;  $G_2= 6500$  кг/ч;  $G_3 = 8400$  кг/ч, а температурсы газов – соответственно:  $t_1 = 130\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 180\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_3 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить температуру уходящих газов после смешения в сборном газоходе. Принять, что показатели адиабаты этих газов одинаковы.

Ответ:  $t_2 = 164\text{ }^\circ\text{C}$ .

111 В газоходе смешиваются три газовых потока, имеющих одинаковое давление, равное 2 бар. Первый поток представляет собой азот с объемным расходом  $V_1= 8200$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , второй поток — двуокись углерода с расходом  $7600$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и третий поток — воздух с расходом  $6400$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить температуру газов после смешения и их объемный расход в общем газопроводе.

Ответ:  $t_1 = 423\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $V = 23000$  м<sup>3</sup>/ч.

112 Продукты сгорания из газохода парового котла в количестве  $400$  кг/ч при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  должны быть охлаждены до  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и направлены в сушильную установку. Газы охлаждаются смешением газового потока с потоком воздуха при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Давление в обоих газовых потоках одинаковое. Определить часовой расход воздуха, если принять, что  $R_{\text{газа}}=R_{\text{воздуха}}$ , теплоемкость продуктов сгорания равна теплоемкости воздуха.

Ответ:  $G_{\text{возд}}=36\ 6$  кг/ч.

## 1.6 Основные термодинамические процессы

**Изохорным** называют процесс, протекающий при неизменном объеме рабочего тела. Зависимость между конечными и начальными параметрами (закон Шарля):

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1. \quad (69)$$

Работа расширения в изохорном процессе равна нулю, так как изменение объема равно нулю. Следовательно,

$$q = du = C_v dT, \quad Q = m C_v dT \quad (70)$$

или для конечного изменения температуры и произвольной массы газа:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1). \quad (71)$$

**Изобарным** называют процесс, протекающий при постоянном давлении. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Гей – Люссака):

$$V_2 / V_1 = T_2 / T_1. \quad (72)$$

Работа, которую выполняет газ при расширении, в данном случае определяется следующим образом:

$$L = P (V_2 - V_1) = m R (T_2 - T_1). \quad (73)$$

Количество теплоты, затраченное на расширение газа при постоянном давлении, равно изменению **энтальпии** газа:

$$q = \Delta h = C_p (T_2 - T_1). \quad (74)$$

**Изотермическим** называют процесс, протекающий при постоянной температуре. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Бойля-Мариотта):

$$P_2 / P_1 = V_1 / V_2 \quad \text{или} \quad PV = \text{const}. \quad (75)$$

Изменение внутренней энергии равно нулю, т.к.  $T = \text{const}$ .

Работа изотермического процесса определяется по формуле:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (76)$$

**Адиабатным** называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Уравнение адиабаты имеет следующий вид:

$$P v^k = \text{const} \quad \text{или} \quad P_1 v_1^k = P_2 v_2^k, \quad (77)$$

где  $k$  - показатель адиабаты.

Зависимость между начальными и конечными параметрами:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k. \quad (78)$$

Работа расширения при адиабатном процессе совершается за счет уменьшения внутренней энергии:

$$q = \Delta u + l = 0; \quad l = -\Delta u = C_v (T_1 - T_2). \quad (79)$$

Работу расширения 1 кг газа в адиабатном процессе можно вычислить и по другой формуле:

$$l = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (80)$$

Если масса газа равна  $m$ , то

$$L = \frac{1}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (81)$$

**Политропными** процессами называют процессы, которые протекают при постоянной теплоемкости. Уравнение политропы имеет вид

$$P v^n = \text{const}, \quad (82)$$

где  $n$  – показатель политропы, может принимать любое численное значение в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но для данного процесса эта величина постоянная.

Зависимость между основными параметрами процесса:



$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (83)$$

Работа расширения в политропном процессе определяется по формуле

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (84)$$

Количество подведенного (или отведенного) тепла можно определить с помощью 1-го закона термодинамики:

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = C_n (T_2 - T_1), \quad (85)$$

где  $C_n$ - теплоемкость идеального газа в политропном процессе.

### Примеры решения задач

27 В закрытом сосуде заключен газ при разрежении 50 мм рт. ст. и температуре 70°C. Показание барометра — 760 мм рт. ст. До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало равным 100 мм. рт. ст.?

Решение:

Так как процесс происходит при  $V = \text{const}$ , то согласно формуле (69) получаем:

$$\frac{760 - 50}{760 - 100} = \frac{273 + 70}{T_2} \quad \text{или} \quad T_2 = \frac{660 \cdot 343}{710} = 318,8 \text{ К}; \quad t_2 = 45,8^\circ \text{С}.$$

28 В закрытом сосуде емкостью 0,6 м<sup>3</sup> содержится воздух при давлении 5 бар и температуре 20°C. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж. Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха в сосуде:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,6}{287 \cdot 293} = 3,57 \text{ кг.}$$

Количество тепла, отводимого от воздуха при  $V = \text{const}$ , определяется уравнением (70):

$$Q = m C_v (t_2 - t_1).$$

Теплоемкость определим по уравнению (45):

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Определим конечную температуру:

$$t_2 = \frac{Q}{m C_v} + t_1 = \frac{-105000}{3,57 \cdot 717,5} + 20 = -20,7^\circ \text{C}.$$

Исходя из соотношения параметров в изохорном процессе (69) имеем:

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 5 \cdot \frac{273 - 20,7}{293} = 4,3 \text{ бар.}$$

29 Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30°C. Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при  $V=\text{const}$  до 16 бар. Принять зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Из соотношения параметров изохорного процесса – уравнение (69) – получаем:

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К}; \quad t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{ С}.$$

Пользуясь данными приложения Б, находим:

$$\bar{C}_{v1} = 0,7173 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \bar{C}_{v2} = 0,7351 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Масса воздуха, находящегося в резервуаре, определяется из уравнения Клапейрона (15):

$$m = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг}.$$

Количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху,

$$Q = 0,8278 \cdot (0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30) = 184,8 \text{ кДж}.$$

30 Какое количество тепла необходимо затратить, чтобы нагреть  $2 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном избыточном давлении 2 бар от 100 до  $500^\circ \text{С}$ ? Какую работу при этом совершит воздух? Давление атмосферы принять равным 760 мм рт. ст.

Решение:

Пользуясь данными приложения Б (табл. Б.3), находим:

$$C_{p1} = 1,0061 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad C_{p2} = 1,0387 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$q_p = 1,0387 \cdot 500 - 1,0061 \cdot 100 = 418,7 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Массу воздуха определяем из уравнения (15):

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{(2+1,013) \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 373} = 5,63 \text{ кг}.$$

Количество тепла

$$Q = m \cdot q = 5,63 \cdot 418,7 = 2357 \text{ кДж}.$$

Найденное количество тепла можно определить не только по массе воздуха, но и по его объему. В этом случае в уравнении (41) используем объемные теплоемкости.

Пользуясь приложением Б, табл. Б.5, находим:

$$C'_{p1} = 1,3004 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) ; C'_{p2} = 1,3427 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Следовательно,

$$q_p = 1,3427 \cdot 500 - 1,3004 \cdot 100 = 541,4 \text{ кДж}/\text{м}^3 .$$

Объем воздуха должен быть приведен к нормальным условиям по уравнению (21). Отсюда

$$V_H = \frac{P V T_H}{T P_H} = \frac{3,013 \cdot 2 \cdot 273}{373 \cdot 1,01} = 4,35 \text{ м}^3 .$$

Таким образом,

$$Q_p = 541,4 \cdot 4,35 = 2356 \text{ кДж} .$$

Работа газа по уравнению (73)

$$L = m R \Delta T = 5,63 \cdot 287 \cdot 400 = 646,4 \text{ кДж} .$$

31 В цилиндре находится воздух при давлении 5 бар и температуре 400 °С. От воздуха отнимается тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура 0 °С. Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л . Определить количество отнятого тепла, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Решение:

Объем воздуха при нормальных условиях легко определить из выражения (21):

$$V_H = \frac{P V T_H}{P_H T} = \frac{5 \cdot 0,4 \cdot 273}{1,013 \cdot 273} = 0,8 \text{ м}^3 .$$

Теплоемкость воздуха находим по приложению Б (табл. Б.5):

$$C'_p = 1,3289 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Количество тепла на основании формулы (74) равно:

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

Количество тепла можно определить не только по объему воздуха, но и по его массе. Масса воздуха определяется из характеристического уравнения (15):

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,4}{287 \cdot 673} = 1,035 \text{ кг}.$$

Теплоемкость воздуха находим по приложению Б:

$$C_p = 1,0283 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

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

Конечный объем определяется из уравнения (72):

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

Изменение внутренней энергии определяем по уравнению (53), данные по объемной теплоемкости взяты из приложения Б:

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

Работа, затраченная на сжатие, по формуле (73)

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

32 Определить, какая часть тепла, подводимого к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая — на изменение внутренней энергии.

Решение:

Аналитическое выражение первого закона термодинамики (50) может быть представлено в виде

$$\frac{du}{dq} + \frac{dl}{dq} = 1.$$

Величина

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{du}{dq}$$

определяет ту долю от всего подводимого к газу тепла, которая превращается в работу расширения. Для идеального газа в изобарном процессе  $du$  определяется по уравнению (52),  $dq$  – по уравнению (74), тогда, принимая  $k = 1,4$ , получаем:

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{1}{1,4} = 0,285.$$

Следовательно, в изобарном процессе только 28,5% тепла, подводимого к газу, превращается в работу. Все остальное тепло (71,5%) расходуется на увеличение внутренней энергии.

33 К газообразным продуктам сгорания, находящимся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, подводится при постоянном давлении столько тепла, что температура смеси поднимается с 500 до 1900 °С. Массовый состав газовой смеси следующий:  $\text{CO}_2 = 15\%$ ;  $\text{O}_2 = 5\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 6\%$ ;  $\text{N}_2 = 74\%$ . Определить количество тепла, подведенное к 1 кг газообразных продуктов сгорания, считая теплоемкость нелинейно зависящей от температуры.

Решение:

Количество тепла, участвующее в изобарном процессе, определяется на основании формулы (74), оно равно разности энтальпий

конечного и начального состояний или произведению теплоемкости газовой смеси на разность температур. Следовательно,

$$q = \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p2i} g_i) t_2 - \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p1i} g_i) t_1.$$

На основании табл. Б.3 получаем:

$$Q_p = (1,2259 \cdot 0,15 + 1,0940 \cdot 0,05 + 2,4166 \cdot 0,06 + 1,1857 \cdot 0,74) \cdot 1900 - (1,0828 \cdot 0,15 + 0,9793 \cdot 0,05 + 1,9778 \cdot 0,06 + 1,0660 \cdot 0,74) \cdot 500 = 1836 \text{ кДж/кг.}$$

34 1 кг воздуха при температуре 30°C и начальном давлении 1 бар сжимается изотермически до конечного давления 10 бар. Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество тепла, отводимого от газа.

Решение:

Определяем начальный удельный объем воздуха из уравнения состояния (15):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 303}{1 \cdot 10^5} = 0,87 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Исходя из зависимости между параметрами в изотермическом процессе (75), определяем конечный объем:

$$v_2 = v_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,87 \cdot \frac{1}{10} = 0,087 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха, по уравнению (76)

$$l = R T \ln \frac{P_1}{P_2} = 2,303 \cdot 287 \cdot 303 \cdot \lg \frac{1}{10} = -200 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от газа в изотермическом процессе, равно работе, затраченной на сжатие.

35 Как будут соотноситься между собой значения работы изотермического сжатия, вычисленные для равной массы различных газов, при прочих одинаковых условиях?

Решение:

Значения работы изотермического сжатия для 1 кг различных газов при одинаковых условиях выражаются следующими уравнениями (76):

$$l_1 = R_1 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_2 = R_2 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_3 = R_3 T \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ и так далее,}$$

поэтому

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

т.е. работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

36 1 кг воздуха при начальной температуре 30°C и давлении 1 бар сжимается адиабатно до конечного давления 10 бар. Определить затрачиваемую работу, конечные объем и температуру.

Решение:

Из соотношения параметров в адиабатном процессе по уравнению (78) находим:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Принимая  $k = 1,4$ , получаем:

$$T_2 = 303 \cdot 10^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 303 \cdot 10^{0,286} = 585 \text{ К}; \quad t_2 = 312^\circ \text{C}.$$

Затраченная работа по уравнению (80)

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



Конечный объем определяется из уравнения состояния (16):

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{287 \cdot 585}{10 \cdot 10^5} = 0,168 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

37 В двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на 200 °С ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия  $P_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 70$  °С. Показатель адиабаты  $k = 1,36$ ,  $R = 314$  Дж/(кг·К), температура самовоспламенения равна 650 °С. Определить величину работы сжатия и степень сжатия.

Решение:

Из уравнения (78) имеем:

$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left( \frac{723}{343} \right)^{\frac{1}{0,36}} = 2,108^{2,776} = 7,29.$$

Работа сжатия по уравнению (80)

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{314}{0,36} (343 - 723) = - 331,4 \text{ кДж/кг}.$$

38 Адиабатным сжатием повысили температуру воздуха в двигателе так, что она стала равной температуре воспламенения нефти; объем при этом уменьшился в 14 раз.

Определить конечную температуру и конечное давление воздуха, если начальные параметры  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 100$  °С.

Решение:

Конечная температура определяется по формуле (78), отсюда

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 373 \cdot 14^{0,4} = 1067 \text{ К}.$$

Конечное давление определяется соответственно (78):

$$P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 \cdot \left( \frac{1067}{373} \right)^{1.4} = 40 \text{ бар} .$$

39 В баллоне емкостью 100 л находится воздух при давлении 50 бар и температуре 20°C. Давление окружающей среды 1 бар. Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и по адиабате. Определить также минимальную температуру, которую будет иметь воздух в баллоне, если открыть вентиль и выпускать воздух из баллона до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды, и при условии, что теплообмен воздуха с окружающей средой будет отсутствовать.

Решение:

Работа изотермического расширения определяется по уравнению (76):

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 2.303 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0.1 \cdot \lg 50 = 1956 \text{ кДж} .$$

Конечный объем воздуха (75)

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0.1 \cdot 50 = 5 \text{ м}^3 .$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot (5 - 0.1) = 490 \text{ кДж} .$$

Таким образом, полезная работа воздуха составит:

$$1956 - 490 = 1466 \text{ кДж} .$$

Работа адиабатного расширения определяется по формуле

$$L_{\text{ад}} = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{50 \cdot 0,1 \cdot 10^5}{0,4} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{50} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] = 840 \text{ кДж.}$$

Конечный объем воздуха (78)

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,1 \cdot 50^{\frac{1}{1,4}} = 1,636 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot 1,536 = 153,6 \text{ кДж.}$$

Полезная работа воздуха составит:

$$840 - 153,6 = 686,4 \text{ кДж.}$$

Минимальная температура определяется из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 98 \text{ К; } t_2 = -177^\circ \text{C.}$$

40 Из сосуда, содержащего углекислоту при давлении 12 бар и температуре 20°C, вытекает 2/3 содержимого. Определить конечное давление и температуру, если в процессе истечения не происходит теплообмена со средой (k принять равным 1,28).

Решение:

Если из сосуда вытекает 2/3 содержимого, то удельный объем оставшейся в сосуде углекислоты возрастает втрое. Поэтому

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 3^{0,28} = 1,36.$$

Следовательно,

$$T_2 = \frac{T_1}{1,36} = \frac{293}{1,36} = 215,4 \text{ К}; \quad t_2 = 57,6^\circ \text{С.}$$

Конечное давление

$$P_2 = P_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = \frac{12}{4,081} = 2,94 \text{ бар.}$$

41 Воздушный буфер состоит из цилиндра, плотно закрытого подвижным поршнем. Длина цилиндра 50 см, а диаметр 20 см. Параметры воздуха, находящегося в цилиндре, соответствуют параметрам окружающей среды:  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ .

Определить энергию, которую может принять воздушный буфер при адиабатном сжатии воздуха, если движущийся без трения поршень продвинется на 40 см. Определить также конечное давление и конечную температуру воздуха.

Решение:

Начальный объем воздуха

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} l = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 0,5 = 0,0157 \text{ м}^3,$$

а конечный объем

$$V_2 = \frac{1}{5} V_1 = 0,00314 \text{ м}^3.$$

На адиабатное сжатие воздуха, находящегося в цилиндре, будет затрачена работа

$$L = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,0157}{0,4} (1 - 0,5^{0,4}) = -3570 \text{ Дж.}$$

Затрата работы для преодоления атмосферного давления составит:

$$P_1(V_2 - V_1) = 10^5 \left( -\frac{4}{5} \right) \cdot 0,9157 = 1256 \text{ Дж.}$$

Следовательно, аккумулированная в воздушном буфере энергия составит:

$$3570 - 1256 = 2314 \text{ Дж.}$$

Температура и давление в конце процесса определяются из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 1,91 = 558 \text{ К}; \quad P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 1,5^{1,4} = 9,52 \text{ бара.}$$

42 1 кг воздуха при давлении 5 бар и температуре 111 °С расширяется политропно до давления 1 бар. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенного тепла и полученную работу, если показатель политропы равен 1,2.

Решение:

Определяем начальный объем воздуха:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 384}{5 \cdot 10^5} = 0,22 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечный объем воздуха находим из уравнения (83):

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,22 \cdot 5^{\frac{1}{1,2}} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечную температуру проще всего найти из характеристического уравнения (16):

$$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,84}{287} = 293 \text{ К.}$$

Величину работы находим из уравнения (84):

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{0.2} \cdot (384 - 293) = 130600 \text{ Дж / кг.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) = \frac{287}{1.4-1} \cdot (293 - 384) = -65,8 \text{ кДж / кг.}$$

Количество тепла, сообщенного воздуху, по уравнению (85)

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 0.72 \cdot \frac{1.2-1.4}{1.2-1} \cdot (20 - 111) = 65.8 \text{ кДж / кг.}$$

Нетрудно видеть, что в этом процессе внешняя работа совершается за счет подведенного тепла и уменьшения внутренней энергии. Исходя из этого можно проверить полученные результаты следующим образом:

$$q = \Delta u + l; \quad l = q - \Delta u = 65,8 - (-65,8) = 131,6 \text{ кДж / кг.}$$

43 1,5 кг воздуха сжимают политропно от  $P_1=0,9$  бар и  $t_1=18^\circ\text{C}$  до  $P_2=10$  бар; температура при этом повышается до  $t_2=125^\circ\text{C}$ . Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенного тепла.

Решение:

Из соотношения между параметрами политропного процесса (83) можно получить:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{10}{0,9}} = 0,13,$$

отсюда

$$n = \frac{1}{1-0,13} = 1,149.$$

Конечный объем определяем из характеристического уравнения (15):

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{1,5 \cdot 287 \cdot 398}{10 \cdot 10^5} = 0,171 \text{ м}^3.$$

Затраченная работа по уравнению (84)

$$L = \frac{m R}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \cdot 287}{0,149} \cdot (18 - 125) = - 309200 \text{ Дж}.$$

Количество отведенного тепла определяем по уравнению (85), считая теплоемкость воздуха не зависящей от температуры:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 1,5 \cdot 0,7175 \cdot \frac{1,149-1,4}{1,149-1} \cdot (125 - 18) = - 195,4 \text{ кДж}.$$

44 Воздух в количестве  $0,01 \text{ м}^3$  при давлении 10 бар и температуре  $25^\circ\text{C}$  расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до 1 бар. Определить конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенное тепло, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателем  $n = 1,3$ .

Решение:

а) Изотермическое расширение

Конечный объем определяется по формуле (75):

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,01 \cdot \frac{10}{1} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то конечная температура  $t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}$ .

Работа газа по уравнению (76)

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot 2,303 \cdot \lg 10 = 23000 \text{ Дж.}$$

Количество подведенного тепла по 1-му закону термодинамики равно работе, т.к. изменение внутренней энергии равно нулю.

б) Адиабатное расширение

Конечный объем определяется по уравнению (77):

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха на основании уравнения (78)

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \cdot (0,1)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 298 \cdot \frac{1}{1,931} = 154,3 \text{ К}; \quad t_2 = -118,7^\circ \text{С}.$$

Работа газа по уравнению (81)

$$L = \frac{1}{1,4-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 12000 \text{ кДж.}$$

в) Политропное расширение

Конечный объем определяется из уравнения (82):

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,3}} = 0,05885 \text{ м}^3.$$

Конечная температура по уравнению (83)

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,3}{1,3}} = 175,2 \text{ К}; \quad t_2 = -97,8^\circ \text{С}.$$

Работа газа по уравнению (84)

$$L = \frac{1}{1,25-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 13700 \text{ кДж.}$$

Подведенное тепло можно определить по следующему уравнению, полученному из уравнений (84) и (85):



$$Q = L \frac{k - n}{k - 1} = 13,7 \cdot \frac{0,1}{0,4} = 3,425 \text{ кДж} .$$

45  $20 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 1 бар и температуре  $18^\circ\text{C}$  сжимаются по политропе до давления 8 бар, причем показатель политропы равен 1,25. Какую работу надо затратить для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха и какое количество тепла отводится при сжатии?

Решение:

Конечная температура определяется по уравнению (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 291 \cdot \left( \frac{8}{1} \right)^{\frac{0,25}{1,25}} = 291 \cdot 1,51 = 439 \text{ К} .$$

Масса газа определится из характеристического уравнения (15) для начального состояния газа:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{10^5 \cdot 20}{287 \cdot 291} = 23,95 \text{ кг} .$$

Объем воздуха в конце сжатия

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{23,95 \cdot 287 \cdot 439}{8 \cdot 10^5} = 3,77 \text{ м}^3 .$$

Работа газа по формуле (84)

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{10^5}{0,25} \cdot (1 \cdot 20 - 8 \cdot 3,77) = -4064000 \text{ Дж} .$$

Работа, затрачиваемая на получение  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха,

$$l = \frac{-L}{V_2} = -\frac{4064}{3,77} = -1078 \text{ кДж / м}^3 .$$

Количество тепла, отводимого при сжатии воздуха, по уравнению (85) составит:

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 23,95 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,25-1,4}{1,25-1} \cdot 148 = -1548 \text{ кДж} .$$

## Задачи

113 Газ при давлении 10 бар и температуре 20°C нагревается при постоянном объеме до температуры 300°C. Определить конечное давление газа.

Ответ:  $P_2 = 19,56$  бар.

114 В закрытом сосуде емкостью 0,3 м<sup>3</sup> содержится 2,75 кг воздуха при давлении 8 бар и температуре 25°C. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0°C.

Ответ:  $P_2 = 7,32$  бар;  $v = 0,109$  м<sup>3</sup>/кг.

115 В закрытом сосуде заключен газ при давлении 28 бар и температуре 120°C. Чему будет равно конечное давление, если температура упадет до 25°C?

Ответ:  $P_2 = 21,2$  бар.

116 В закрытом сосуде находится газ при разрежении 20 мм рт. ст. и температуре 10°C. Показание барометра составляют 750 мм рт. ст. После охлаждения газа разрежение стало равным 150 мм рт. ст. Определить конечную температуру газа.

Ответ:  $t_2 = -40,4$ °C.

117 До какой температуры нужно нагреть газ при  $V = \text{const}$ , если начальное давление газа 2 бар и температура 20°C, а конечное давление 5 бар.

Ответ: до  $t_2 = 459,5$ °C.

118 В закрытом сосуде емкостью 0,5 м<sup>3</sup> содержится двуокись углерода при  $P_1 = 6$  бар и  $t_1 = 527$ °C. Как изменится давление газа, если от него отнять 100 ккал? Принять зависимость  $C = f(t)$  линейной.

Ответ:  $P_2 = 4,2$  бар.

119 До какой температуры нужно охладить  $0,8 \text{ м}^3$  воздуха с начальным давлением 3 бар и температурой  $15^\circ\text{C}$ , чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 1 бар? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Ответ: до  $t_2 = -177^\circ\text{C}$ ;  $Q = -402 \text{ кДж}$ .

120 Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении 125 бар. Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла, если начальная температура кислорода  $10^\circ\text{C}$ , а конечная -  $30^\circ\text{C}$ . Теплоемкость кислорода считать постоянной, не зависящей от температуры.

Ответ:  $P_2 = 134 \text{ бар}$ ;  $Q = 133 \text{ кДж}$ .

121 В цилиндре диаметром 400 мм содержится 80 л воздуха при давлении 2,9 бар и температуре  $15^\circ\text{C}$ . Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, до какой величины должна увеличиться сила, действующая на поршень, чтобы последний оставался неподвижным, если к воздуху подводятся 20 ккал тепла.

Ответ:  $N = 51,1 \text{ кН}$ .

122 В калориметрической бомбе емкостью  $300 \text{ см}^3$  находится кислород при давлении 26 бар и температуре  $22^\circ\text{C}$ . Определить температуру кислорода после подвода к нему тепла в количестве 1 ккал, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ:  $t_2 = 593^\circ\text{C}$ .

123 Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав:  $\text{CO}_2$  - 14%;  $\text{O}_2$  - 6%;  $\text{N}_2$  - 75%;  $\text{H}_2\text{O}$  - 5%, нагревается при постоянном давлении от 600 до  $2000^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, подведенного к 1 кг газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Ответ:  $q_p = 1841 \text{ кДж/кг}$ .

124 Определить количество тепла, необходимое для нагревания  $2000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении 5 бар от  $150$  до  $600^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Ответ:  $Q_p = 3937 \text{ МДж}$ .

125 В установке воздушного отопления внешний воздух при температуре  $-15^\circ\text{C}$  нагревается в калорифере при  $P = \text{const}$  до  $60^\circ\text{C}$ . Какое количество тепла надо затратить для нагрева  $1000 \text{ м}^3$  наружного воздуха? Теплоемкость воздуха считать постоянной. Давление воздуха принять равным  $760 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ:  $Q = 103\,033 \text{ кДж}$ .

126  $0,2 \text{ м}^3$  воздуха, имеющего начальную температуру  $18^\circ\text{C}$ , подогреваются в цилиндре диаметром  $50 \text{ см}$  при постоянном давлении  $2 \text{ бар}$  до температуры  $200^\circ\text{C}$ . Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченного тепла, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ:  $L = 25\,000 \text{ Дж}$ ;  $h = 0,64 \text{ м}$ ;  $Q = 88,3 \text{ кДж}$ .

127 На отходящих газах двигателя мощностью  $N = 2500 \text{ кВт}$  установлен подогреватель, через который проходит  $60\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $15^\circ\text{C}$  и давлении  $1,01 \text{ бар}$ . Температура воздуха после подогревателя равна  $75^\circ\text{C}$ . Определить, какая часть тепла топлива использована в подогревателе? Коэффициент полезного действия двигателя принять равным  $0,33$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ:  $17,4\%$ .

128 К  $1 \text{ м}^3$  воздуха, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении  $335 \text{ кДж}$  тепла. Объем воздуха при этом увеличивается до  $1,5 \text{ м}^3$ . Начальная температура воздуха равна  $15^\circ\text{C}$ . Какая устанавли-

вается в цилиндре температура и какова работа расширения? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ:  $t_2 = 159^\circ\text{C}$ ;  $L = 95,1$  кДж.

129  $2\text{ м}^3$  воздуха с начальной температурой  $15^\circ\text{C}$  расширяются при постоянном давлении до  $3\text{ м}^3$  вследствие сообщения газу  $837$  кДж тепла. Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

Ответ:  $t_2 = 159^\circ\text{C}$ ;  $P = 2,4$  бар;  $L = 239$  кДж.

130 Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура газов  $300^\circ\text{C}$ , конечная –  $160^\circ\text{C}$ ; расход газов равен  $1000$  кг/ч. Начальная температура воздуха составляет  $15^\circ\text{C}$ , а расход его равен  $910$  кг/ч. Определить температуру нагретого воздуха, если потери воздухоподогревателя составляют  $4\%$ . Средние теплоемкости для отходящих из котла газов и воздуха принять соответственно равными  $1,0467$  и  $1,0048$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $168,9^\circ\text{C}$ .

131 В цилиндре двигателя внутреннего сгорания находится воздух при температуре  $500^\circ\text{C}$ . Вследствие подвода тепла конечный объем воздуха увеличился в  $2,2$  раза. В процессе расширения воздуха давление в цилиндре практически оставалось постоянным. Определить конечную температуру воздуха и удельные количества тепла и работы, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $t_2 = 1428^\circ\text{C}$ ;  $q_p = 1088,7$  кДж/кг;  $l = 266,3$  кДж/кг.

132 Воздух, выходящий из компрессора с температурой  $190^\circ\text{C}$ , охлаждается в охладителе при постоянном давлении  $5$  бар до температуры  $20^\circ\text{C}$ . При этих параметрах производительность компрессора

равна  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Определить часовой расход охлаждающей воды, если она нагревается на  $10^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $V = 733 \text{ л/ч}$ .

133 При сжигании в топке парового котла каменного угля объем продуктов сгорания составляет  $11,025 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Анализ продуктов сгорания показывает следующий их объемный состав:  $\text{CO}_2$  -  $10,3\%$ ;  $\text{O}_2$  -  $7,8\%$ ;  $\text{N}_2$  -  $75,3\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  -  $6,6\%$ . Считая количество и состав продуктов сгорания неизменными по всему газовому тракту парового котла, а зависимость теплоемкости от температуры — нелинейной, определить количество тепла, теряемого с уходящими газами (на  $1 \text{ кг}$  топлива), если на выходе из котла температура газов равна  $180^\circ\text{C}$ , а температура окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ . Давление продуктов сгорания принято равным атмосферному.

Ответ:  $Q_{yx}=2418 \text{ кДж/кг}$ .

134 Воздух в количестве  $0,5 \text{ кг}$  при  $P_1 = 5 \text{ бар}$  и  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество тепла, сообщаемого газу.

Ответ:  $P_2 = 1 \text{ бар}$ ;  $L = Q = 70 \text{ кДж}$ .

135 Для осуществления изотермического сжатия  $0,8 \text{ кг}$  воздуха при  $P_1 = 1 \text{ бар}$  и  $t = 25^\circ\text{C}$  затрачена работа в  $100 \text{ кДж}$ . Как велико давление  $P_2$  сжатого воздуха и сколько тепла необходимо при этом отвести от газа?

Ответ:  $P_2 = 3,22 \text{ бар}$ ;  $Q = - 90 \text{ кДж}$ .

136  $8 \text{ м}^3$  воздуха при  $P_1 = 0,9 \text{ бар}$  и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  сжимаются при постоянной температуре до  $8,1 \text{ бар}$ . Определить конечный объем, затраченную работу и количество тепла, которое необходимо отвести от газа.

Ответ:  $V_2 = 0,889 \text{ м}^3$ ;  $L = Q = - 1581 \text{ кДж}$ .

137 При изотермическом сжатии  $0,3 \text{ м}^3$  воздуха с начальными параметрами  $P_1 = 10 \text{ бар}$  и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  отводится  $500 \text{ кДж}$  тепла. Определить конечный объем и конечное давление.

Ответ:  $V_2 = 0,057 \text{ м}^3$ ;  $P_2 = 52,6 \text{ бар}$ .

138 В воздушный двигатель подается  $0,0139 \text{ м}^3/\text{с}$  воздуха при давлении  $5 \text{ бар}$  и  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ . Определить мощность, полученную при изотермическом расширении воздуха в машине, если  $P_2 = 1 \text{ бар}$ .

Ответ:  $L = 11,188 \text{ кВт}$ .

139 Воздух при давлении  $1 \text{ бар}$  и температуре  $27^\circ\text{C}$  сжимается в компрессоре до давления  $35 \text{ бар}$ . Определить величину работы, затраченной на сжатие  $100 \text{ кг}$  воздуха, если сжатие производится изотермически.

Ответ:  $L = - 30 576 \text{ кДж}$ .

140 При изотермическом сжатии  $2,1 \text{ м}^3$  азота, взятого при давлении  $1 \text{ бар}$ , от газа отводится  $335 \text{ кДж}$  тепла. Определить конечный объем, конечное давление и затраченную работу.

Ответ:  $V_2 = 0,426 \text{ м}^3$ ;  $L = - 335 \text{ кДж}$ ;  $P_2 = 4,93 \text{ бар}$ .

141  $0,5 \text{ м}^3$  кислорода при давлении  $10 \text{ бар}$  и температуре  $30^\circ\text{C}$  сжимаются изотермически до объема, в  $5$  раз меньше начального. Определить объем и давление кислорода после сжатия, работу сжатия и количество тепла, отнятого у газа.

Ответ:  $P_2 = 50 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,1 \text{ м}^3$ ;  $L = - 805 \text{ кДж}$ .

142 Газ расширяется в цилиндре изотермически до объема, в  $5$  раз больше первоначального. Сравнить величины работ: полного расширения и расширения на первой половине хода поршня.

Ответ:  $L_2/L_1 = 0,684$ .

143 Воздуху в количестве  $0,1 \text{ м}^3$  при давлении 10 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  сообщается 125 кДж тепла; температура его при этом не изменяется. Определить конечное давление, конечный объем и получаемую работу.

Ответ:  $P_2 = 2,86 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$ ;  $L = 125 \text{ кДж}$ .

144 1 кг воздуха при температуре  $15^\circ\text{C}$  и начальном давлении 1 бар адиабатно сжимается до 8 бар. Определить работу, конечный объем и конечную температуру.

Ответ:  $t_2 = 248^\circ\text{C}$ ;  $v_2 = 0,187 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $l = -167,2 \text{ кДж/кг}$ .

145 Воздух при давлении 4,5 бар, расширяясь адиабатно до 1,2 бар, охлаждается до  $t_2 = -45^\circ\text{C}$ . Определить начальную температуру и работу, совершенную 1 кг воздуха.

Ответ:  $t_1 = 61^\circ\text{C}$ ;  $l = 75,3 \text{ кДж/кг}$ .

146 1 кг воздуха, занимающий объем  $0,0887 \text{ м}^3/\text{кг}$  при давлении 10 бар, расширяется до 10-кратного объема. Определить конечное давление и работу, совершенную воздухом, в изотермическом и адиабатном процессах.

Ответ: 1)  $T = \text{const}$ ;  $P_2 = 1 \text{ бар}$ ;  $l = 204 \text{ кДж/кг}$ ;

2)  $dQ = 0$ ;  $P_2 = 0,4 \text{ бар}$ ;  $l = 133,5 \text{ кДж/кг}$ .

147 Воздух при температуре  $25^\circ\text{C}$  адиабатно охлаждается до  $t_2 = -55^\circ\text{C}$ ; давление при этом падает до 1 бар. Определить начальное давление и работу расширения 1 кг воздуха.

Ответ:  $P_1 = 3 \text{ бар}$ ;  $l = 57,4 \text{ кДж/кг}$ .

148  $0,8 \text{ м}^3$  углекислого газа при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 7 бар адиабатно расширяются до трехкратного объема. Определить конечные параметры, величину полученной работы (показатель адиабаты принять равным 1,28).

Ответ:  $P_2 = 1,71 \text{ бар}$ ,  $t_2 = -57,6^\circ\text{C}$ ;  $L = 535,7 \text{ кДж}$ .



149 До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси? Начальные параметры:  $P_1 = 1$  бар;  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Температура воспламенения смеси  $t_2 = 550^\circ\text{C}$ ; показатель адиабаты - 1,39.

Ответ:  $P_2 = 42$  бар.

150 Работа, затраченная на адиабатное сжатие 3 кг воздуха, составляет 471 кДж. Начальное состояние воздуха характеризуется параметрами:  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ ;  $P_1 = 1$  бар. Определить конечную температуру и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $t_2 = 234^\circ\text{C}$ ;  $U_2 - U_1 = -471$  кДж.

151 В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении 1 бар и температуре  $50^\circ\text{C}$ . Объем камеры сжатия двигателя составляет 16% от объема, описываемого поршнем. Определить конечное давление и конечную температуру газовой смеси при адиабатном ее сжатии. Показатель адиабаты принять равным 1,38.

Ответ:  $P_2 = 4$  бар;  $t_2 = 412^\circ\text{C}$ .

152 В двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимается выше температуры воспламенения нефти. Какое минимальное давление должен иметь воздух в конце процесса сжатия, если температура воспламенения нефти равна  $800^\circ\text{C}$ ? Во сколько раз при этом уменьшится объем воздуха? Начальное давление воздуха 1 бар, начальная температура воздуха  $80^\circ\text{C}$ . Сжатие воздуха считать адиабатным.

Ответ:  $P_2 = 49$  бар;  $V_1 / V_2 = 16$ .

153 Объем воздуха при адиабатном сжатии в цилиндре двигателя внутреннего сгорания уменьшается в 13 раз. Начальная темпе-

ратура воздуха перед сжатием  $77^{\circ}\text{C}$ , а начальное давление  $0,9$  бар. Определить температуру и давление воздуха после сжатия.

Ответ:  $t_2 = 703^{\circ}\text{C}$ ;  $P_2 = 32,7$ бар.

154  $2$  кг воздуха при давлении  $1$  бар и температуре  $15^{\circ}\text{C}$  адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления  $7$  бар. Определить конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие.

Ответ:  $t_2 = 229^{\circ}\text{C}$ ;  $L = - 307,1$  кДж.

155  $1$  м<sup>3</sup> воздуха при давлении  $0,95$  бар и начальной температуре  $10^{\circ}\text{C}$  сжимается по адиабате до  $3,8$  бар. Определить температуру и объем воздуха в конце сжатия и работу, затраченную на сжатие.

Ответ:  $t = 148^{\circ}\text{C}$ ;  $V_2 = 0,373$  м<sup>3</sup>;  $L = - 117,5$  кДж.

156 Воздух при температуре  $127^{\circ}\text{C}$  изотермически сжимается так, что объем его становится равным  $1/4$  начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления. Определить температуру воздуха в конце адиабатного расширения.

Ответ:  $t_2 = - 4^{\circ}\text{C}$ .

157  $1$  кг воздуха при температуре  $17^{\circ}\text{C}$  сжимается адиабатно до объема, составляющего  $1/5$  начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема. Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

Ответ:  $l = 67$  кДж/кг.

158 Воздух при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  должен быть охлажден посредством адиабатного расширения до температуры  $-60^{\circ}\text{C}$ . Конечное давление воздуха при этом должно составлять  $1$  бар. Определить начальное давление воздуха и удельную работу расширения.

Ответ:  $P_1 = 3,04$  бар;  $l = 57,8$  кДж/кг.

159 Воздух в количестве  $3 \text{ м}^3$  расширяется политропно от давления 5,4 бара и температуры  $45^\circ\text{C}$  до давления 1,5 бара. Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным  $10 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенного тепла.

Ответ:  $m = 1,064$ ;  $t_2 = 21,4^\circ\text{C}$ ;  $L = 1875 \text{ кДж}$ ;  $Q = 1575 \text{ кДж}$ .

160 В цилиндре двигателя с изобарным подводом тепла происходит сжатие воздуха по политропе с показателем  $n = 1,33$ . Определить температуру и давление воздуха в конце сжатия, если степень сжатия  $\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = 14$ ,  $t = 77^\circ\text{C}$  и  $P_1 = 1 \text{ бар}$ .

Ответ:  $t_2 = 564^\circ\text{C}$ ;  $P_2 = 33,9 \text{ бар}$ .

161 В процессе политропного сжатия затрачивается работа, равная  $195 \text{ кДж}$ , причем в одном случае от газа отводится  $250 \text{ кДж}$ , а в другом - газу сообщается  $42 \text{ кДж}$ . Определить показатели обеих политроп.

Ответ: 1)  $n = 0,9$ ; 2)  $n = 1,49$ .

162  $1,5 \text{ м}^3$  воздуха сжимаются от 1 бар и  $17^\circ\text{C}$  до 7 бар; конечная температура при этом равна  $100^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, которое необходимо отвести, затраченную работу и показатель политропы?

Ответ:  $n = 1,147$ ;  $L = - 290 \text{ кДж}$ ;  $Q = 183 \text{ кДж}$ .

163 Горючая смесь в цилиндре двигателя, имеющая температуру  $100^\circ\text{C}$  и давление 0,9 бар, подвергается сжатию по политропе с показателем  $n = 1,33$ . Определить конечное давление и степень сжатия в момент, когда температура достигнет  $400^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\epsilon = 5,9$ ;  $P_2 = 9,5 \text{ бар}$ .

164 В процессе политропного расширения воздуху сообщается 83,7 кДж тепла. Определить изменение внутренней энергии воздуха и произведенную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а давление его уменьшилось в 8 раз.

Ответ:  $\Delta U = 16,7$  кДж;  $L = 6702$  Дж.

165 Воздух расширяется по политропе, совершая при этом работу, равную 270 кДж, причем в одном случае воздуху сообщается 420 кДж тепла, а в другом - от воздуха отводится 92 кДж тепла. Определить в обоих случаях показатели политропы.

Ответ: 1)  $n = 0,78$ ; 2)  $n = 1,88$ .

166 Смесь коксового газа с воздухом сжимается по политропе с показателем  $n = 1,38$ ; начальное давление  $P_1 = 1$  бар, начальная температура  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ . Определить конечную температуру и давление, если степень сжатия  $\varepsilon = 4$ .

Ответ:  $t_2 = 276^\circ\text{C}$ ;  $P_2 = 6,8$  бар.

167 В газовом двигателе политропно сжимается горючая смесь до температуры  $450^\circ\text{C}$ . Начальное давление смеси 0,9 бара, начальная температура  $80^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,35$ . Определить работу сжатия и степень сжатия. Газовую постоянную смеси принять равной 340 Дж/(кг·К).

Ответ:  $l = - 360$  кДж/кг;  $\varepsilon = 7,82$ .

168  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 2 бар и температуре  $40^\circ\text{C}$  сжимаются до давления 11 бар и объема  $0,5 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенного тепла.

Ответ:  $n = 1,23$ ;  $L = - 652$  кДж;  $Q = - 272$  кДж.

169 Находящийся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания воздух при давлении 0,9 бар и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  должен быть так сжат, чтобы конечная температура его поднялась до  $650^\circ\text{C}$ . Определить, какое

должно быть отношение объема камеры сжатия двигателя к объему, описываемому поршнем, если сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,3$ .

Ответ:  $V_2 = 0,05121 V_n$ .

170 1 кг воздуха при давлении 4 бар и температуре  $100^\circ\text{C}$  расширяется до давления 1 бар. Определить конечную температуру, количество тепла и совершенную работу, если расширение происходит: а) изохорно, б) изотермически, в) адиабатно и г) политропно с показателем  $n = 1,2$ .

Ответ: а)  $t_2 = -180^\circ\text{C}$ ;  $l = 0$ ;  $q = -202$  кДж/кг;

б)  $t_1 = t_2$ ,  $l = 148,2$  кДж/кг;  $q = 148,2$  кДж/кг;

в)  $t_2 = -22^\circ\text{C}$ ;  $l = 87,5$  кДж/кг;  $q = 0$ ;

г)  $t_2 = 24^\circ\text{C}$ ;  $l = 10,9$  кДж/кг,  $q = 54,5$  кДж/кг.

171  $5\text{ м}^3$  воздуха при давлении 4 бар и  $60^\circ\text{C}$  расширяются по политропе до трехкратного объема и давления 1 бар. Определить показатель политропы, работу, количество сообщенного извне тепла и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $n = 1,26$ ;  $L = 1923$  кДж;

$Q = 672,4$  кДж;  $U_2 - U_1 = -1250,6$  кДж.

## 1.7 Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем. Математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \quad (86)$$

где  $dS$  — бесконечно малое приращение энтропии системы;

$dQ$  — бесконечно малое количество тепла, полученного системой от источника тепла;

$T$  — абсолютная температура источника тепла.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства — обратимым процессам. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = T dS, \quad (87)$$

а так как согласно первому закону термодинамики

$$dQ = dU + P dV,$$

то уравнение (87) принимает следующий вид:

$$T dS = dU + P dV .$$

**Изменение энтропии** между двумя произвольными состояниями газа 1 и 2 определяют по следующим формулам:

при **переменной теплоемкости**, считая зависимость ее от температуры линейной, -

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1), \quad (88)$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} + b (T_2 - T_1), \quad (89)$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{P_2}{P_1} + a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1); \quad (90)$$

при постоянной теплоемкости -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (91)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (92)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (93)$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат TS имеют следующий вид (при постоянной теплоемкости):

уравнение изохоры -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (94)$$

уравнение изобары -

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (95)$$

уравнение изотермы -

$$T = \text{const}, \quad (96)$$

при этом изменение энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}; \quad (97)$$

уравнение адиабаты -

$$s = \text{const}; \quad (98)$$

(127)

(128)

(129)

уравнение политропы -

$$s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (99)$$

Широким распространением при решении термодинамических задач пользуется диаграмма TS. Адиабаты в этой диаграмме изображаются вертикалями, изотермы — горизонталями, изохоры и изобары идеального газа — логарифмическими кривыми. Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рис. 1.

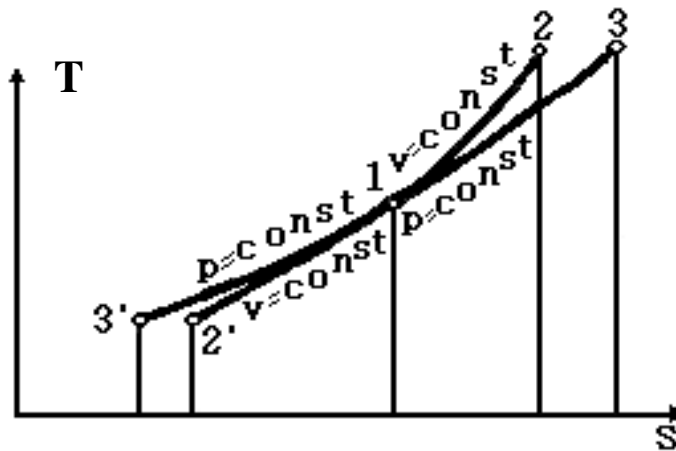


Рисунок 1 – Изображение изобарного и изохорного процессов на TS-диаграмме

Если работа совершается с помощью газа, параметры которого отличаются от параметров окружающей среды, то **максимальная работа**, которую может произвести этот газ, достижима лишь при условии его перехода от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. При этом **максимальная полезная работа** меньше максимальной работы на величину работы вытеснения воздуха окружающей среды.

Величина максимальной полезной работы определяется формулой



$$I_{\max \text{ полезн}} = u_1 - u_2 - T_0(s_1 - s_2) - P_0(v_2 - v_1). \quad (100)$$

В этой формуле параметры, имеющие индекс 1 и 2, относятся соответственно к начальному и конечному состоянию источника работы, а параметры с индексом 0 относятся к рабочей среде.

Так как выражения

$$u_1 - u_2 \text{ и } T_0(S_1 - S_2)$$

представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процесса, то формулу (97) можно представить в следующем виде:

$$I_{\max \text{ полезн}} = I_{\text{ад}} - I_{\text{из}} - P_0(v_2 - v_1). \quad (101)$$

### Примеры решения задач

46 1 кг кислорода при температуре 127°C расширяется до пятикратного объема; температура его при этом падает до 27°C. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

По уравнению (91)

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{259,6}{1,4-1} \ln \frac{300}{400} + 259,6 \ln 5 = 0,23 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

47 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при  $V = \text{const}$  давление повышается в 1,5 раза. Определить общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

Изменение энтропии в адиабатном процессе будет равно нулю.

Изменение энтропии в изохорном процессе определится по формуле (94):

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{P_3}{P_2} = c_v \ln 1,5 = 2,303 \frac{287}{1,4-1} \lg 1,5 = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

следовательно,

$$\Delta s = \Delta s_v = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

48  $10 \text{ м}^3$  воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры  $400^\circ\text{C}$ . Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы  $n = 2,2$ . Считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить энтропию воздуха в конце каждого процесса.

Решение:

Находим массу  $10 \text{ м}^3$  воздуха при нормальных условиях:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 10}{287 \cdot 273} = 12,9 \text{ кг}.$$

Определяем изменение энтропии в каждом из перечисленных процессов:

1) изохорное сжатие -

$$\Delta s_1 = s_1 = m c_v \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 8,42 \text{ кДж}/\text{К};$$

2) изобарное сжатие -

$$\Delta s_2 = s_2 = m c_p \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 1,0117 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 11,78 \text{ кДж}/\text{К};$$

3) адиабатное сжатие -

$$\Delta s = s_3 = 0;$$

4) политропное сжатие -

$$\Delta s_4 = s_4 = m c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \frac{2,2-1,4}{2,2-1} 2,303 \lg \frac{673}{273} = 5,56 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

49 В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от 25 до - 37 °С. Начальное давление воздуха 4 бар, количество его 2 кг. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенного к воздуху тепла составляет 89,2 кДж.

Решение:

Количество тепла, сообщаемого газу в политропном процессе, на основании уравнения (85) составляет

$$Q = m c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) .$$

Подставляя значения известных величин, получаем:

$$\frac{n-k}{n-1} = - \frac{89,2}{2 \cdot 0,723 \cdot 62} = - 0,995 .$$

Отсюда показатель политропы  $n = 1,2$ .

Из соотношения параметров политропного процесса определяем конечное давление:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} ; \quad P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 4 \left( \frac{236}{298} \right)^6 = 1 \text{ бар} .$$

Изменение энтропии по уравнению (92)

$$\Delta S = 2 \cdot 2,3 \left[ \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} \lg \frac{236}{298} - 287 \lg \frac{1}{4} \right] = 0,338 \text{ кДж}/\text{К} .$$

50 В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении 50 бар и температуре 20 °С. Параметры среды:  $P_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20$  °С.

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  $P_1 = 50$  бар до давления среды  $P_2 = 1$  бар. Максимальная полезная работа определяется на основании формулы (100):

$$L_{\text{max полезн}} = T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1)$$

или

$$L_{\text{max полезн}} = m T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1).$$

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг};$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{50 \cdot 0,3}{1} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе определяется по формуле (97)

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{P_1}{P_2},$$

то

$$\begin{aligned} L_{\text{max полезн}} &= m T_0 R \ln \frac{P_1}{P_2} - P_0 (V_2 - V_1) = \\ &= 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot 2,3 \cdot 1,699 - 10^5 (15 - 0,3) = 4377 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

51 Определить максимальную полезную работу, которая может быть произведена 1 кг кислорода, если его начальное состояние характеризуется параметрами  $t_1 = 400^\circ\text{C}$  и  $P_1 = 1$  бар, а состояние среды - параметрами  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 1$  бар.

Решение:

Максимальная работа, которую произведет при данных условиях кислород, может быть получена лишь при условии перехода его от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. Так как температура кислорода в начальном состоянии выше температуры среды, то прежде всего необходимо обратимым процессом снизить температуру кислорода до температуры среды. Таким процессом может явиться только адиабатное расширение кислорода. При этом конечный объем и конечное давление определяются из следующих соотношений:

$$\frac{v_a}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{260 \cdot 673}{1 \cdot 10^5} = 1,75 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$v_a = v_1 \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,75 \left( \frac{673}{293} \right)^{2,5} = 14,05 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$p_a = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{259,6 \cdot 293}{14,05} = 0,0542 \text{ бар}.$$

После адиабатного расширения необходимо обратимым путем при  $t = \text{const}$  сжать кислород от давления 0,0542 бар до давления окружающей среды, т. е. осуществить изотермическое сжатие кислорода до 1 бар. При этом конечный объем кислорода

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{260 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,762 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Максимальная полезная работа определяется по формуле (101):

$$L_{\max \text{ полезн}} = I_{\text{АД}} - I_{\text{ИЗ}} - P_0(v_2 - v_1) = 124,8 \text{ кДж/кг.}$$

Задача может быть решена также и графическим способом – через площади на PV-диаграмме.

### Задачи

172 1 кг воздуха сжимается от  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  до  $P_2 = 5$  бар и  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ:  $\Delta s = -0,196 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

173 Определить приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до  $400^\circ\text{C}$ ; б) при нагревании его по изохоре от 0 до  $880^\circ\text{C}$ ; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ: а)  $\Delta s_p = 2,744 \text{ кДж/K}$ ;

б)  $\Delta s_v = 3,134 \text{ кДж/K}$ ; в)  $\Delta s_T = 2,359 \text{ кДж/K}$ .

174 1 кг воздуха сжимается по политропе от 1 бар и  $20^\circ\text{C}$  до 8 бар при  $n = 1,2$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенного тепла и затраченную работу.

Ответ:  $t_2 = 141^\circ\text{C}$ ;  $q = -87,1 \text{ кДж/кг}$ ;

$\Delta s = -0,02445 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $l = -173,0 \text{ кДж/кг}$ .

175 В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 100 бар. Температура среды  $20^\circ\text{C}$ , давление среды 1 бар. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

Ответ:  $L_{\max \text{ полезн}} = 7220 \text{ кДж}$ .

176 Торпеда приводится в действие и управляется автоматически, двигаясь на заданной глубине. Для двигателя торпеды использу-

ется имеющийся в ней запас сжатого воздуха. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести двигатель торпеды, если объем сжатого воздуха в ней 170 л, давление 180 бар, а температура воздуха и морской воды  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Торпеда отрегулирована на движение под уровнем моря на глубине 4 м. Определить также силу, с которой торпеда устремляется вперед, если радиус ее действия равен 4 км, а потерями привода можно пренебречь.

Ответ:  $L_{\text{max полезн}} = 11810 \text{ кДж}$ ;  $N = 295 \text{ Н}$ .

177. В сосуде объемом 400 л заключен воздух при давлении 1 бар и температуре  $40^\circ\text{C}$ . Параметры среды:  $P_0 = 1 \text{ бар}$  и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Определить максимальную полезную работу, которую может произвести воздух, заключенный в сосуде.

Ответ:  $L_{\text{max полезн}} = 4600 \text{ Дж}$ .

178 Айсберг массой  $10^9 \text{ кг}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  дрейфует в Гольфстриме, температура воды в котором  $20^\circ\text{C}$ . Через некоторое время айсберг растаял и осталась вода при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии океанской воды, связанное с таянием айсберга.

Ответ:  $\Delta S = 1500000 \text{ МДж/К}$ .

179 Определить изменение энтропии кислорода массой 1 кг при давлении 1 МПа и температуре  $427^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $S = 0,2 \text{ кДж}$ .

180 При подземном взрыве ядерной бомбы произошел выброс горячей породы массой  $10^{10} \text{ кг}$  при температуре 3000 К. Выброшенная порода остывает до температуры земной коры 600 К. Удельную теплоемкость породы принять  $3352 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Определить изменение энтропии выброшенной породы.

Ответ:  $\Delta S = 5,36 \cdot 10^{13} \text{ Дж/К}$ .

## 1.8 Круговые процессы

С помощью второго закона термодинамики можно определять степень совершенства процесса перехода тепла в работу в тепловых двигателях. Переход тепла в работу в них осуществляется в результате круговых процессов или циклов.

**Круговым процессом** или **циклом** называют совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

Работа кругового процесса ( $l_0$ ) изображается на PV-диаграмме площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла. Прямой цикл ( $l_0 > 0$ ) характерен для тепловых двигателей, обратный цикл ( $l_0 < 0$ ) – для холодильных машин.

Для оценки степени совершенства любого цикла вводят термический коэффициент полезного действия  $\eta_t$ :

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}, \quad (102)$$

где  $q_1$  - количество тепла, заимствованного 1 кг рабочего тела от внешнего (или верхнего) источника тепла;

$q_2$  - количество тепла, отданного 1 кг рабочего тела внешнему охладителю (или нижнему источнику);

$l_0$  - полезно использованное в цикле тепло.

**Цикл Карно** состоит из двух изотерм 1-2 и 3-4 и двух адиабат 2-3 и 4-1 (рис. 2 - 3). В цикле Карно так же, как и в любом другом цикле, нельзя перевести все подведенное тепло в работу. Для цикла Карно уравнение для термического коэффициента полезного действия принимает вид



$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (103)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - соответственно температуры верхнего и нижнего источника тепла, К.

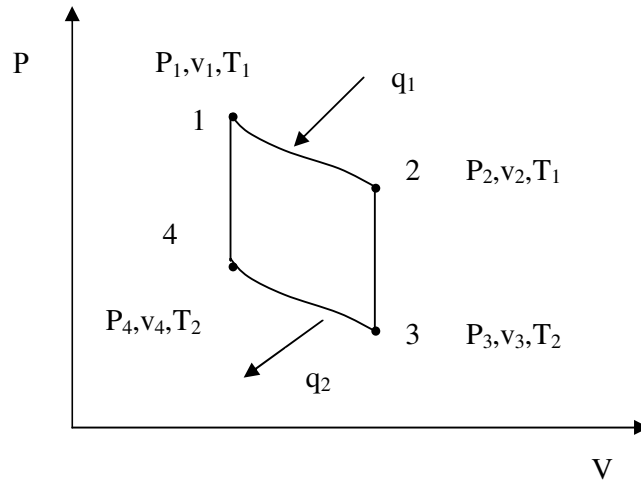


Рисунок 2 – Прямой обратимый цикл Карно в PV-координатах

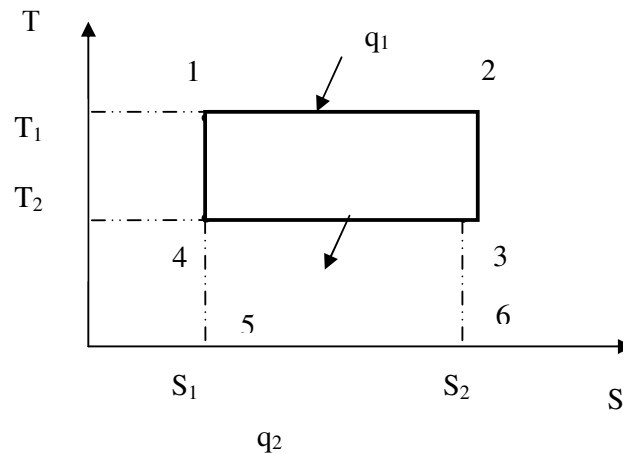


Рисунок 3 – Прямой обратимый цикл Карно в TS-координатах

Пользуясь TS-диаграммой, можно определить термический КПД цикла графическим путем:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{\text{пл. 1-2-3-4}}{\text{пл. 1-2-6-5}}. \quad (104)$$

Цикл Карно в заданном диапазоне температур  $T_1$  и  $T_2$  имеет наибольший термический КПД по сравнению с любым другим циклом. Однако по ряду практических соображений цикл Карно в тепловых двигателях не осуществляется.

В настоящее время в **двигателях внутреннего сгорания (ДВС)** осуществляются следующие циклы:

а) с подводом тепла **при постоянном объеме** (цикл состоит из двух адиабат и двух изохор – рис. 4), характеристиками которого являются степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ , термический КПД  $\eta_t$ :

$$\epsilon = V_1 / V_2; \quad \lambda = P_3 / P_2; \quad (105)$$

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) = 1 - 1 / \epsilon^{k-1}, \quad (106)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

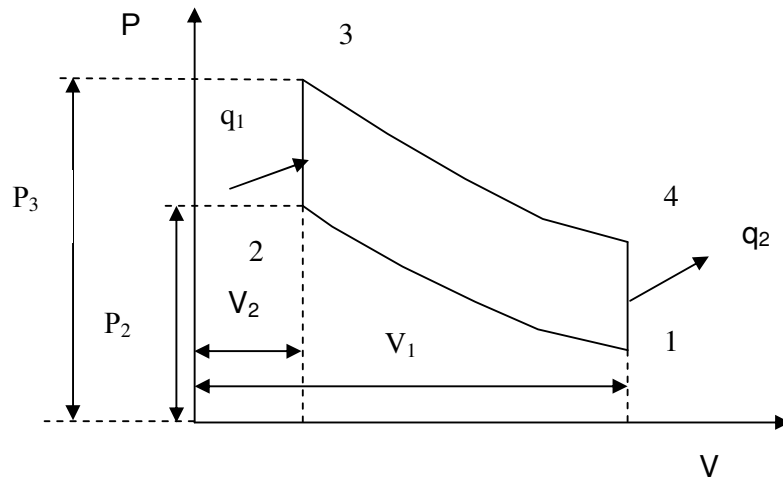


Рисунок 4 – PV-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме

б) с подводом тепла **при постоянном давлении** (цикл состоит

из двух адиабат, одной изобары и одной изохоры - рис. 5), характеристиками которого являются: степень сжатия  $\epsilon$ , степень предварительного расширения  $\rho$ , термический КПД  $\eta_t$ :

$$\epsilon = v_1 / v_2; \quad \rho = v_3 / v_2; \quad (107)$$

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = c_v (T_4 - T_1) / c_p (T_3 - T_2). \quad (108)$$

или

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}. \quad (109)$$

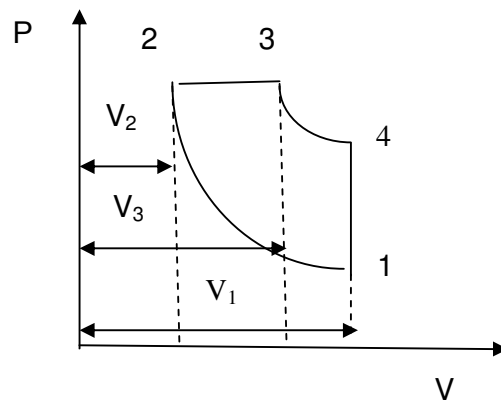


Рисунок 5 – PV-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при  $P = \text{const}$

в) **смешанный цикл**, с подводом части тепла при постоянном объеме и части - при постоянном давлении (цикл состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары - рис. 6), характеристиками которого являются: степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ , степень предварительного расширения  $\rho$  и термический КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)}. \quad (110)$$

Методика определения термического КПД более сложных циклов приведена в задаче 114.

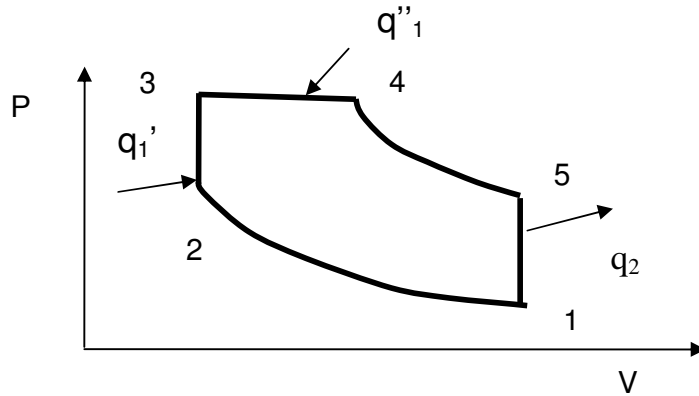


Рисунок 6 – PV-диаграмма цикла ДВС со смешанным подводом теплоты

**Газотурбинные установки (ГТУ)** могут быть 2 видов: установки с подводом теплоты при постоянном давлении и установки с подводом теплоты при постоянном объеме. Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива **при  $P = \text{const}$**  (рис. 7) состоит из двух адиабат и двух изобар.

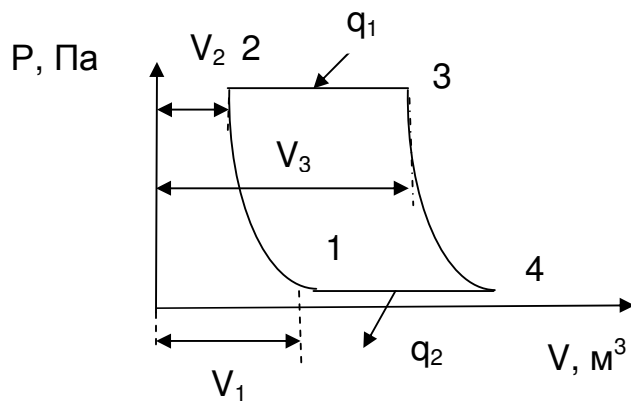


Рисунок 7 – PV-диаграмма цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении

Основными характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре  $\beta$  и термический КПД:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}; \quad (111)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (112)$$

Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива **при  $V = \text{const}$**  (рис. 8) состоит из двух адиабат, одной изохоры и одной изобары. Основными характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре  $\beta$ , степень добавочного повышения давления  $\lambda$  и термический КПД:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \lambda = \frac{P_3}{P_2}; \quad (113)$$

$$\eta_t = 1 - k \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{k}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}, \quad (114)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

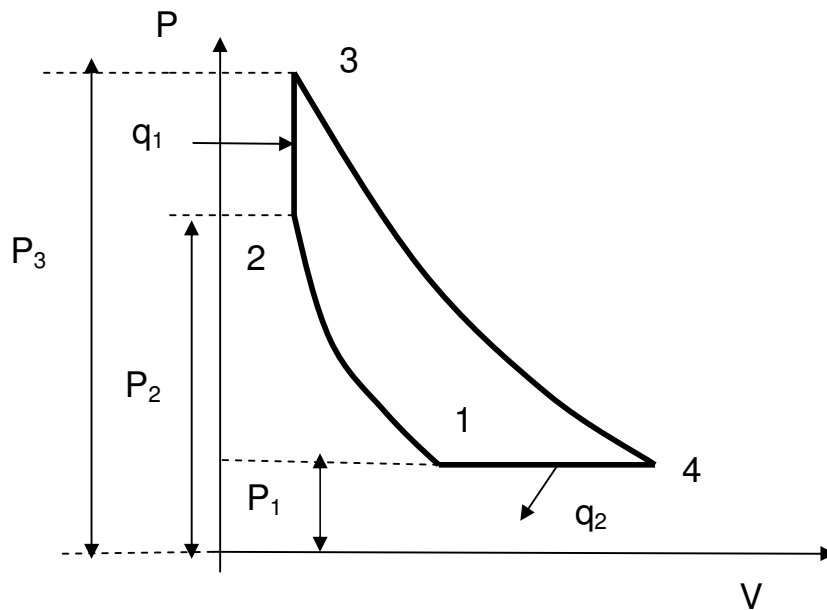


Рисунок 8 – PV-диаграмма цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме

Процессы, протекающие в идеальном **компрессоре**, также являются циклическими. Работа, расходуемая на сжатие 1 кг газа в одноступенчатом компрессоре, Дж/кг, определяется в зависимости от характера процесса сжатия по формулам:

**при изотермном сжатии -**

$$l_0 = p_1 v_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = R T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad (115)$$

**при политропном сжатии -**

$$l_0 = \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]; \quad (116)$$

**при адиабатном сжатии -**

$$l_0 = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} P_2 v_2 \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (117)$$

или

$$l_0 = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (118)$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 м<sup>3</sup> газа начального состояния в одноступенчатом компрессоре, Дж/м<sup>3</sup>, в случае политропного сжатия определяется по формуле

$$L_0 = \frac{n}{n-1} P_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (119)$$

Мощность, расходуемая на сжатие газа в компрессоре, кВт

$$N = \frac{L_0 V}{3600 \cdot 1000} = \frac{l_0 G}{3600 \cdot 1000}, \quad (120)$$

где  $V$  – объемная производительность компрессора, м<sup>3</sup>/ч;

$G$  – массовая производительность компрессора, кг/ч.

Теоретическая производительность компрессора, м<sup>3</sup>/мин,

$$V_T = F S n_0, \quad (121)$$

где  $F$  - площадь поршня, м<sup>2</sup>;

$S$  - ход поршня, м;

$n_0$  - число оборотов вала компрессора в минуту.

Объемный коэффициент полезного действия, учитывающий влияние относительного объема вредного пространства на производительность компрессора,

$$\lambda_v = 1 - a_0 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (122)$$

где  $a_0$  — относительный объем вредного пространства (отношение объема вредного пространства  $V_0$  к объему, описываемому поршнем,  $V_{оп}$ );

$n$  — показатель политропы расширения газа вредного пространства.

Для получения газа высокого давления применяются **многоступенчатые компрессоры**. В этом случае допустимая степень повышения давления газа в одной ступени

$$\lambda = \sqrt[z]{\frac{P_z}{P_1}}, \quad (123)$$

где  $z$  - необходимое число ступеней многоступенчатого компрессора;

$P_z$  - конечное давление газа за компрессором;

$P_1$  - начальное давление газа перед компрессором.

Конечные давления по ступеням (давления нагнетания) определяются следующим образом:

$$P^I = \lambda P_1 ;$$

$$P^{\text{II}} = \lambda P^{\text{I}} = \lambda^2 P_1 ;$$

$$P^z = \lambda P^{z-1} = \lambda^z P_1 . \quad (133)$$

Полная работа многоступенчатого компрессора равна сумме работ, затраченных во всех ступенях компрессора.

При промежуточном охлаждении газа после каждой ступени до начальной температуры всасываемого газа (для 3-ступенчатого компрессора -  $T_1=T_2=T_5$ ) при равенстве допустимой степени повышения давления  $\lambda$  и показателя политропы сжатия  $n$  по ступеням ( $T_2=T_4=T_6$ ) в каждой ступени будет расходоваться на сжатие газа одинаковая работа и работа многоступенчатого компрессора будет равна работе одной ступени, умноженной на число ступеней:

$$l_0 = z \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (125)$$

Количество тепла, отводимого водой рубашки от 1 кг газа при его политропном сжатии в цилиндре компрессора,

$$q = C_n (t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1). \quad (126)$$

Количество тепла, отводимого от 1 кг сжатого газа при его охлаждении при  $P=\text{const}$  в холодильнике (промежуточном или конечном),

$$q = C_p (t_2 - t_1). \quad (127)$$

### Примеры решения задач

52 1 кг воздуха совершает цикл Карно (см. рис. 2) в пределах температур  $t_1 = 627^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , причем наивысшее давление составляет 60 бар, а наинизшее — 1 бар.



Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенного и отведенного тепла.

Решение:

**Точка 1:**  $P_1 = 60$  бар;  $T_1 = 900$  К. Удельный объем газа определяем из характеристического уравнения (16):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 900}{60 \cdot 10^5} = 0,043 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 2:**  $T_2 = 900$  К. Давление находим из уравнения адиабаты (процесс 2-3):

$$\frac{P_2}{P_3} = \left( \frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{900}{300} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 46,8 ; \quad P_2 = 46,8 \text{ бар} ; \quad P_3 = 46,8 \cdot 1 = 46,8 \text{ бар} .$$

Удельный объем находим из уравнения изотермы (процесс 1-2):

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 ; \quad v_2 = \frac{P_1 v_1}{P_2} = \frac{60 \cdot 0,043}{46,8} = 0,055 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 3:**  $P_3 = 1$  бар;  $T_3 = 300$  К;

$$v_3 = \frac{R T_3}{P_3} = \frac{287 \cdot 300}{1 \cdot 10^5} = 0,861 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 4:**  $T_4 = 300$  К. Давление воздуха находим из уравнения адиабаты (процесс 4 - 1), удельный объем – из уравнения изотермы (процесс 3 - 4):

$$\frac{P_1}{P_4} = \left( \frac{T_1}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 46,8 ; \quad P_4 = \frac{P_1}{46,8} = 1,284 \text{ бар} ; \quad v_4 = \frac{P_3 v_3}{P_4} = \frac{1 \cdot 0,861}{1,284} = 0,671 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0,667 .$$

Подведенное количество тепла

$$q_1 = R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 287 \cdot 900 \cdot \ln \frac{0,055}{0,043} = 63,6 \text{ кДж/кг} .$$

Отведенное количество тепла

$$q_2 = R T_2 \ln \frac{v_3}{v_4} = 287 \cdot 300 \cdot \ln \frac{0,861}{0,671} = 21,5 \text{ кДж/кг} .$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг} .$$

Для проверки можно воспользоваться формулой (102):

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{42,1}{63,6} = 0,662.$$

53 Для идеального цикла поршневого ДВС с подводом тепла при  $V = \text{const}$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенного и отведенного тепла, если:  $P_1=1$  бар;  $t_1=20^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 3,6$ ;  $\lambda = 3,33$ ;  $k = 1,4$ . Рабочее тело - воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Решение:

Расчет ведем для 1 кг воздуха.

**Точка 1:**  $P_1=1$ бар;  $t_1=20^\circ\text{C}$ . Удельный объем определяем из уравнения состояния (15):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 2:** Удельный объем находим исходя из степени сжатия:

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{0,84}{3,6} = 0,233 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Температура в конце адиабатного сжатия определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 3,6^{0,4} = 489 \text{ К}; \quad t_2 = 216^\circ \text{ С.}$$

Давление в конце адиабатного сжатия определяем по характеристическому уравнению (15):

$$P_2 = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 489}{0,233 \cdot 10^5} = 6,02 \text{ бар.}$$

**Точка 3:** Удельный объем  $v_3=v_2=0,233 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 2-3) получаем:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda = 3,33.$$

Следовательно,

$$P_3 = P_2 \lambda = 6,02 \cdot 3,33 = 20 \text{ бар}; \quad T_3 = T_2 \lambda = 489 \cdot 3,33 = 1628 \text{ К}; \quad t_3 = 1355^\circ \text{ С.}$$

**Точка 4:** Удельный объем  $v_4=v_1=0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Температура в конце адиабатного расширения – уравнение (78):

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = 1628 \cdot \left( \frac{0,233}{0,84} \right)^{0,4} = 976 \text{ К.}$$

Давление в конце адиабатного расширения определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4-1):

$$P_4 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 1 \cdot \frac{976}{293} = 3,33 \text{ бар.}$$

Определяем количество подведенного и отведенного тепла:

$$q_1 = C_v (T_3 - T_2) = \frac{287}{1,4 - 1} (1628 - 489) = 825 \text{ кДж / кг};$$

$$q_2 = C_v (T_4 - T_1) = \frac{287}{1,4 - 1} (976 - 293) = 495 \text{ кДж / кг};$$

Термический КПД цикла определяем по формуле (102):

$$\eta_t = \frac{825 - 495}{825} = 0,4$$

или по формуле (106)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{3,6^{0,4}} = 0,4.$$

Работа цикла

$$l_o = q_1 - q_2 = 330 \text{ кДж/кг.}$$

54 В идеальном одноступенчатом компрессоре массовой производительностью  $G=180$  кг/ч сжимается воздух до давления 4,9 бар. Определить теоретически необходимую мощность электродвигателя компрессора, отведенное в рубашку цилиндра компрессора тепло и расход охлаждающей воды, если сжатие происходит политропно ( $n=1,3$ ), а охлаждающая вода нагревается на  $25^\circ\text{C}$ . Начальное давление воздуха  $P_1=0,98$  бар и температура  $t_1=0^\circ\text{C}$ .

Решение:

Работа, расходуемая на сжатие 1 кг газа в одноступенчатом компрессоре при политермическом режиме, определяется по формуле (116):

$$l_o = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{1,3}{0,3} \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot 273 \cdot (5^{0,231} - 1) = 153 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность, расходуемая на сжатие газа в компрессоре, определяем по формуле (120)

$$N = \frac{l_o \cdot G}{3600 \cdot 1000} = \frac{153000 \cdot 180}{3600000} = 7,63 \text{ кВт.}$$

Удельное количество отведенной теплоты определяем по формуле (85)

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 0,17 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1} (396 - 273) = -29,1 \text{ кДж/кг.}$$

Температуру в конце политропного сжатия определяем из соотношения (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 273 \cdot 5^{0,231} = 396 \text{ К} .$$

Определяем полное количество отведенной теплоты:

$$Q = q G = - \frac{29,1 \cdot 180}{3600} = - 1,46 \text{ кДж / с} .$$

Расход охлаждающей воды составляет:

$$G_{\text{воды}} = \frac{Q}{C \cdot \Delta t} = \frac{1,46}{4,18 \cdot 25} = 139 \cdot 10^{-4} \text{ кг / с} .$$

55 Определить расход воды на охлаждение воздуха в рубашке двухступенчатого компрессора производительностью 10 м<sup>3</sup>/мин в промежуточном и конечном холодильниках, если в холодильниках воздух охлаждается до начальной температуры, а вода нагревается на 15°С. Воздух перед компрессором имеет давление P<sub>1</sub>=0,98 бар и температуру t<sub>1</sub>=10°С, сжатие воздуха в компрессоре происходит политропно (n=1,3) до конечного давления P<sub>2</sub>=8,8 бар.

Решение:

Количество тепла, отводимого в рубашке компрессора :  
от 1 кг воздуха -

$$q = C (t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) ;$$

от G кг воздуха -

$$Q = q G .$$

Количество тепла, отводимого в промежуточном и конечном холодильниках: от 1 кг воздуха -

$$q_{\text{хол}} = C_p (t_2 - t_1) ;$$

от  $G$  кг воздуха -

$$Q_{\text{хол}} = q_{\text{хол}} G.$$

Массовую производительность компрессора определяем из характеристического уравнения (15):

$$G = \frac{P V}{R T} = \frac{1 \cdot 10^4 \cdot 10}{\frac{287}{1,4-1} \cdot 283} = 12,05 \text{ кг/мин}.$$

Промежуточное давление – уравнения (123) и (124):

$$P_2' = \lambda P_1 = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} P_1 = 2,94 \text{ бар}.$$

Температура в конце сжатия – уравнение (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n-z}} = 283 \cdot \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1,3-1,4}{1,3-2}} = 283 \cdot 9^{0,115} = 365 \text{ К}.$$

Количество тепла, отводимого в рубашке компрессора,

$$Q = 12,05 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1,0} (92-15) = -220 \text{ кДж/мин}.$$

Количество тепла, отводимого в промежуточном и конечном холодильниках,

$$Q_{\text{хол}} = 12,05 \cdot \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot (92-15) = 932 \text{ кДж/мин}.$$

Расход охлаждающей воды

$$G_{\text{воды}} = \frac{2(Q + Q_{\text{хол}})}{C \Delta t} = \frac{2 \cdot (220 + 932)}{4,19 \cdot 15} = 36,7 \text{ кг/мин}.$$

## Задачи

181 Определить термический КПД цикла Карно (см. рис. 2), давление, объем и температуру во всех точках, работу цикла, количе-

ство подведенного и отведенного, тепла, если известно, что рабочим телом является 1 кг сухого воздуха,  $P_1=1$  ат,  $v_1=1,3$  м<sup>3</sup>/кг,  $T_3=T_4=890$  К,  $P_2=4$  ат,  $k=1,4$ .

Ответ:  $\eta_t=0,5$ ;  $T_1=T_2=445$  К;  $v_2=0,325$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_3=44,5$  бар;  
 $v_3=0,0575$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_4=11,1$  бар;  $v_4=0,23$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $q_1=354$  кДж/кг;  $q_2=177$  кДж/кг;  $l_{ц}=177$  кДж/кг.

182 Определить параметры всех точек цикла Карно (см. рис. 2), работу  $l_{ц}$  и термический КПД цикла, если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха, подведенное тепло  $q_1=712$  кДж/кг,  $P_1=0,98$  бар,  $t_1=33$  °С,  $t_3=800$  °С, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

Ответ:  $P_1=0,98$  бар;  $T_1=306$  К;  $v_1=0,896$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_2=1,96$  бар;  
 $T_2=306$  К;  $v_2=0,448$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_3=159$  бар;  $T_3=1073$  К;  
 $v_3=0,0194$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_4=15$  бар;  $T_4=1073$  К;  
 $v_4=0,0194$  м<sup>3</sup>/кг;  $l_{ц}=510$  кДж/кг;  $\eta_t=0,715$ .

183 Определить параметры точек цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме (см. рис. 4), если известно, что  $P_1=0,78$  бар,  $t_1=87$  °С, степень сжатия  $\varepsilon=7,0$  и степень повышения давления  $\lambda=3,2$ , рабочим телом является 1 кг сухого воздуха, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

Ответ:  $v_1=1,32$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_1=360$  К;  $P_2=11,9$  бар;  $v_2=0,189$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_2=780$  К;  $P_3=37,8$  бар;  $v_3=0,189$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_3=2496$  К;  
 $P_4=2,5$  бар;  $v_4=1,32$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_4=1155$  К.

184 Определить количество подведенного и отведенного тепла, работу сжатия, работу расширения, полезную работу и КПД цикла предыдущей задачи. Сравнить КПД данного цикла с КПД цикла Карно, протекающего в том же интервале температур. Определить также мощность, если расход воздуха 10 кг/ч. Теплоемкость принять постоянной.

Ответ:  $q_1=1230$  кДж/кг;  $q_2=570$  кДж/кг;  
работа сжатия  $l=301$  кДж/кг;  
работа расширения  $l=962$  кДж/кг;  
 $l_{ц}=282000$  кДж/кг;  $N=110$  кВт;  $\eta_t=0,538$ ;  
для цикла Карно  $\eta_t=0,856$ ;  $\Delta =37\%$ .

185 Определить параметры точек цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении (см. рис. 5), если  $P_1=0,676$  бар,  $t_1=45^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon =13$ , степень предварительного расширения  $\rho =2,2$ ; рабочее тело - сухой воздух, показатель адиабаты принять постоянным  $k=1,4$ .

Ответ:  $T_1=318$  К;  $P_1=0,88$  бар;  $v_1=1,035$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_2=886$  К;  $P_2=32$  бар;  $v_2=0,0796$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_3=1945$  К;  $P_3=32$  бар;  $v_3=0,175$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_4=955$  К;  $P_4=2,66$  бар;  $v_4=1,03$  м<sup>3</sup>/кг.

186 Определить для цикла задачи 185 количество подведенного  $q_1$  и отведенного  $q_2$  тепла, работу сжатия, работу расширения, КПД цикла и мощность при расходе воздуха 1 кг/с. Теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными.

Ответ:  $q_1=1065$  кДж/кг;  $q_2 =456$  кДж/кг;  
работа сжатия  $l=407$  кДж/кг;  
работа расширения  $l=1010$  кДж/кг;  
 $\eta_t =0,57$ ;  $N=606$  кВт.

187 Определить параметры точек смешанного термического цикла ДВС (см. рис. 6), если  $P_1=0,83$  бар,  $t_1= 57^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon=15$ ; степень повышения давления  $\lambda= 1,6$ ; степень предварительного расширения  $\rho = 1,4$ ; показатель адиабаты  $k= 1,4$ ; рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

Ответ:  $T_1=330$  К;  $P_1=0,834$  бар;  $v_1=1,14$  м<sup>3</sup>/кг;



$$T_2=974 \text{ К}; P_2=36,9 \text{ бар}; v_2=0,076 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_3=1557 \text{ К}; P_3=59 \text{ бар}; v_3=0,076 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_4=2180 \text{ К}; P_4=59 \text{ бар}; v_4=0,1064 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_5=845 \text{ К}; P_5=2,13 \text{ бар}; v_5=1,14 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

188 Определить для цикла, данного в задаче 187, количество подведенного и отведенного тепла, среднее КПД цикла и мощность при расходе воздуха 30 кг/мин.

$$\text{Ответ: } q_1=1040 \text{ кДж/кг}; q_2=369 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t=65\%; N=366 \text{ кВт}.$$

189 Определить параметры точек, количество подведенного и отведенного тепла, КПД, работу цикла и мощность при расходе воздуха 5 кг/с термического цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении (см. рис. 7), если  $P_1=0,93 \text{ бар}$ ,  $t_1=27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\frac{v_3}{v_2}=1,5$ ,  $\frac{P_2}{P_1}=4$ , рабочее тело - сухой воздух, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными.

$$\text{Ответ: } v_1=0,923 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1=0,93 \text{ бар}; T_1=300 \text{ К};$$

$$v_2=0,342 \text{ м}^3/\text{кг}; P_2=3,73 \text{ бар}; T_2=444 \text{ К};$$

$$v_3=0,513 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=3,73 \text{ бар}; T_3=666 \text{ К};$$

$$v_4=1,385 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4=0,95 \text{ бар}; T_4=450 \text{ К};$$

$$q_1=223 \text{ кДж/кг}; q_2=151 \text{ кДж/кг};$$

$$l_u=72 \text{ кДж/кг}; N=360 \text{ кВт}.$$

190 Для цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме (см. рис. 8) определить параметры точек, количество подведенного тепла, КПД и мощность при расходе воздуха 3 кг/с, если  $P_1=0,98 \text{ бар}$ ,  $t_1=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\frac{P_2}{P_1}=3$ ,  $\lambda=\frac{P_3}{P_2}=1,7$ , рабочее тело - сухой воздух, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } P_1=0,98 \text{ бар}; T_1=293 \text{ К}; v_1=0,857 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_2=2,94 \text{ бар}; T_2=401 \text{ К}; v_2=0,392 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_3=2,94 \text{ бар}; T_3=682 \text{ К}; v_3=0,392 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_4=0,98 \text{ бар}; T_4=426 \text{ К}; v_4=1,2 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$q_1=201 \text{ кДж/кг}; \eta_t=0,333; N=200 \text{ кВт}.$$

191 Определить параметры точек, КПД и работу термического цикла ДВС (рис. 4), если известно, что  $P_1=0,98$  бар,  $t_1=30^\circ\text{C}$ ;

$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = 6,0$  и количество подведенного тепла  $q_1=1256$  кДж/кг, рабочим

телом является 1 кг сухого воздуха, теплоемкость  $C_v$  принять постоянной, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } P_1=0,98 \text{ бар}; T_1=303 \text{ К}; v_1=0,886 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_2=12,05 \text{ бар}; T_2=620 \text{ К}; v_2=0,148 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_3=46,1 \text{ бар}; T_3=2375 \text{ К}; v_3=0,148 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_4=3,76 \text{ бар}; T_4=1160 \text{ К}; v_4=0,886 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\eta_t=0,514; l_{ц}=646 \text{ кДж/кг}.$$

192 Определить параметры точек, КПД и количество подведенного тепла термического цикла ДВС (см. рис. 5), если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха,  $P_1=0,93$  бар,  $q_2=629$  кДж/кг, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } v_1=0,904 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1=0,93 \text{ бар}; T_1=293 \text{ К};$$

$$v_2=0,0753 \text{ м}^3/\text{кг}; P_2=30,8 \text{ бар}; T_2=792 \text{ К};$$

$$v_3=0,202 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=30,8 \text{ бар}; T_3=2130 \text{ К};$$

$$v_4=0,904 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4=3,72 \text{ бар}; T_4=1171 \text{ К};$$

$$\eta_t=0,535; q_1=1350 \text{ кДж/кг}.$$

193 Определить параметры точек, количество подведенного тепла и КПД смешанного цикла ДВС (см. рис. 6), если  $P_1=0,98$  бар,

$t_1=47^\circ\text{C}$ ,  $P_2=39,2$  бар,  $\rho = \frac{v_4}{v_3} = 1,5$  и количество отведенного тепла

$q_2=5870$  кДж/кг; рабочим теплом является 1 кг сухого воздуха, тепло-

емкость  $c_v = 0,71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  и  $c_p = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Ответ:  $P_1=0,98$  бар;  $T_1=320$  К;  $v_1=0,395$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_2=39,2$  бар;  $T_2=920$  К;  $v_2=0,0665$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_3=79,6$  бар;  $T_3=1855$  К;  $v_3=0,0665$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_4=79,6$  бар;  $T_4=2783$  К;  $v_4=0,1$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_5=3,49$  бар;  $T_5=1140$  К;  $v_2=0,935$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $q_1=1600$  кДж/кг;  $\eta_t=0,633$ .

194 В идеальном одноступенчатом компрессоре сжимается воздух до давления  $P_2=2,74$  бар. Начальная температура воздуха  $t_1=17$  °С, давление  $P_1=0,98$  бар. Определить работу, затраченную на сжатие 1 кг воздуха, и конечную температуру, если сжатие происходило: а) изотермно; б) политропно при  $n=1,25$ ; в) адиабатно при  $k=1,41$ .

Ответ: а)  $T_1=T_2=290$  К;  $l=85,7$  кДж/кг;  
б)  $T_2=356$  К;  $l=96$  кДж/кг;  
в)  $T_2=392$  К;  $l=100$  кДж/кг.

195 В идеальном компрессоре производительностью 20 м<sup>3</sup>/мин адиабатно сжимается воздух до давления 5,9 бар. Начальное давление воздуха  $P_1=0,98$  бар и температура  $t_1=20$  °С. Определить, как изменится теоретическая мощность, затрачиваемая на сжатие, если конечное давление воздуха в компрессоре понизится до  $P_3=2,9$  бар.

Ответ: мощность уменьшается на 44 %.

196 Идеальный поршневой компрессор производительностью 150 м<sup>3</sup>/ч сжимает воздух от давления  $P_1=0,98$  бар до  $P_2=3,92$  бар. Как изменится теоретическая мощность компрессора, если его использовать для сжатия азота (N<sub>2</sub>), сохранив прежнюю объемную производительность? Какой должна быть теоретическая мощность при сжатии в

том же компрессоре 150 кг/ч азота и воздуха? Во всех случаях пределы изменения давления остаются одинаковыми, процесс сжатия изотермный, начальная температура 20° С.

Ответ:  $N=5,68$  кВт. При сжатии азота и сохранении той же объемной производительности необходимо затрачивать прежнюю мощность. Для сжатия 150 кг/ч азота надо затрачивать мощность  $N=5,03$  кВт, для сжатия 150 кг/ч воздуха -  $N=4,87$  кВт.

197 Одноступенчатый поршневой компрессор имеет диаметр цилиндра  $D=300$  мм, ход поршня  $S=450$  мм, относительный объем мертвого пространства  $a_0=3\%$  и число оборотов  $n_0=980$  об/мин. Давление воздуха в конце сжатия в 3,2 раза превышает начальное давление. Определить теоретическую производительность компрессора для случаев а) адиабатного, б) политропного ( $n=1,18$ ) и в) изотермного расширения остающегося в мертвом пространстве воздуха.

Ответ:  $V = 31,2$  м<sup>3</sup>/мин; а)  $v' = 30$  м<sup>3</sup>/мин;  
б)  $v'' = 29,6$  м<sup>3</sup>/мин; в)  $v''' = 29,15$  м<sup>3</sup>/мин.

198 Воздух сжимается в компрессоре, техническая характеристика которого дана в задаче 197. Как изменится теоретическая производительность компрессора, если давление воздуха в конце сжатия будет превышать начальное давление: а) в 10 раз, б) в 20 раз? Расширение остающегося в мертвом пространстве воздуха считать политропным,  $n=1,18$ .

Ответ:  $V = 31,2$  м<sup>3</sup>/мин; а)  $v' = 25,5$  м<sup>3</sup>/мин;  
б)  $v'' = 20,4$  м<sup>3</sup>/мин.

199 В одноступенчатом поршневом компрессоре сжимается воздух, начальное давление которого 745 мм рт. ст. и температура

10°C. Определить величину максимально допустимого повышения давления воздуха в цилиндре компрессора при: а) адиабатном,  $k=1,41$  и б) политропном,  $n=1,25$  (при охлаждении цилиндра) сжатии, если оно ограничивается температурой вспышки компрессорного масла  $t=165^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $T_2=438\text{ K}$ ; а)  $P_2/P_1=5,8$ ;  $P_2=5,76\text{ бар}$ ;

б)  $P_2/P_1=12,9$ ;  $P_2=12,8\text{ бар}$ .

200 Определить, сколько ступеней должен иметь идеальный компрессор при адиабатном сжатии в нем воздуха от начального давления  $P_1=0,98\text{ бар}$  до конечного давления  $P_2=49\text{ бар}$ , если в каждой ступени повышение давления не должно быть больше, чем в 3,8 раза. Определить также промежуточные давления.

Ответ:  $z = 2,92$ . При  $z = 3$   $\lambda = 3,68$ ;

$P' = 3,6\text{ бар}$ ;  $P'' = 13,29\text{ бар}$ .

201 В идеальном компрессоре воздух сжимается от начального давления  $P_1=0,98\text{ бар}$  при  $t_1=0^\circ\text{C}$  до конечного давления  $P_2=24,5\text{ бар}$ . Определить, какую температуру будет иметь воздух в конце: а) одноступенчатого, б) двухступенчатого, в) трехступенчатого сжатия, если сжатие происходит политропно,  $n=1,25$ , с промежуточным охлаждением до начальной температуры.

Ответ: а)  $T_2 = 519\text{ K}$ ;  $t_2 = 236^\circ\text{C}$ ; б)  $T_2 = 377\text{ K}$  ;

$t_2 = 104^\circ\text{C}$ ; в)  $T_2 = 338\text{ K}$  или  $t_2 = 65^\circ\text{C}$ .

## 1.9 Истечение газов и паров. Дросселирование

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход. В этих случаях необходимо прежде всего найти отношение

$$\beta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $P_2$  – давление среды на выходе из сопла;

$P_1$  - давление среды на входе в сопло.

Полученное числовое значение сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым из равенства

$$\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_1} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (128)$$

и равным: для одноатомных газов - 0,487; двухатомных - 0,528; для трех- и многоатомных газов – 0,546.

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta > \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость истечения газа, м/с, определяется по формуле

$$\omega = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (129)$$

Теоретическая скорость истечения газа (м/с) может быть также определена по формуле

$$\omega = 1,41 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (130)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях, Дж/кг.

Если значения энтальпии выражены в килоджоулях на килограмм, то формула принимает следующий вид:

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2}. \quad (131)$$

Действительная скорость истечения всегда меньше теоретической, так как процесс истечения связан с наличием трения:

$$\omega = 1,41 \psi \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (132)$$

где  $\psi$  - скоростной коэффициент сопла.

Расход газа, кг/с, определяется по формуле

$$G = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (133)$$

где  $F$  – площадь выходного сечения сопла, м<sup>2</sup>.

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta \leq \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость истечения газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определяется по формуле

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1}. \quad (134)$$

Критическая скорость может быть также определена по уравнению

$$\omega_{кр} = 1,41 \cdot \sqrt{h_1 - h_{кр}}, \quad (135)$$

Расход газа, кг/с, в этом случае будет максимальным и определяется по формуле

$$G_{max} = F \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}}. \quad (136)$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяют сопло Лаваля. В минимальном сечении сопла Лаваля скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами  $P_{кр}$  и  $v_{кр}$ . Площадь минимального сопла,  $m^2$ , определяется по формуле

$$F_{min} = \frac{G_{max} \cdot v_{кр}}{\omega_{кр}}. \quad (137)$$

Площадь выходного сечения сопла,  $m^2$ ,

$$F = f_{min} \frac{\omega_{кр} \cdot v_2}{\omega \cdot v_{кр}} = \frac{G \cdot v_2}{\omega}, \quad (138)$$

где  $v_2$  – удельный объем газа при давлении среды  $P_2$ ,

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (139)$$

Длина расширяющейся части сопла определяется по уравнению

$$l = \frac{d - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (140)$$

где  $d$  и  $d_{min}$  – соответственно диаметры выходного и минимального сечений;

$\alpha$  - угол конусности расширяющейся части сопла.

При прохождении газа или пара через суженное сечение происходит снижение его давления. Этот процесс называют **дресселированием** или **мятием**. В процессе дресселирования газа или пара наряду со снижением давления всегда возрастает удельный объем. Температура идеальных газов при дресселировании остается неизменной, температура же реальных газов остается постоянной лишь при определенной начальной температуре газа, называемой **темпе-**



**ратурой инверсии**; приближенное значение этой температуры определяется из выражения

$$T_{\text{инв}} \approx T_{\text{кр}}, \quad (141)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура газа или пара, К.

Если же температура подвергающегося дросселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа меньше температуры инверсии, и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

С достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова, т.е.

$$h_1 = h_2. \quad (142)$$

Задачи, связанные с дросселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дросселирования. Проще всего они решаются при помощи  $h$ - $s$ -диаграммы: конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку, с изобарой конечного давления.

### **Примеры решения задач**

56 Воздух из резервуара с постоянным давлением 100 бар и температурой 15°C вытекает в атмосферу через трубку с внутренним диаметром 10 мм. Определить скорость истечения воздуха и его секундный расход. Наружное давление равно 1 бар. Процесс расширения воздуха считать адиабатным.

Решение:

Определяем величину  $\beta$  и сравниваем ее с критическим значением для воздуха:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{100} < \beta_{кр} = 0,528.$$

Скорость истечения будет критической и определяется по формуле (134):

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с}.$$

Секундный расход определяем по формуле (136), предварительно рассчитав площадь сечения сопла и начальный удельный объем воздуха:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2 ;$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288}{100 \cdot 10^5} = 0,00827 \text{ м}^3 / \text{кг} ;$$

$$G_{max} = 0,0000785 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \left( \frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}} \cdot \frac{100 \cdot 10^5}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с}.$$

57 В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживают давление  $P_1 = 50$  бар. Газ вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 40 бар. Начальная температура кислорода  $100^\circ\text{C}$ . Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла  $F = 20 \text{ мм}^2$ . Найти также теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если истечение будет происходить в атмосферу. В обоих случаях считать истечение адиабатным. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Решение:

Отношение давлений составляет:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{40}{50} = 0,8 > \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{кр} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения меньше критической и определяется по формуле (129). Из характеристического уравнения (15) определяем начальный удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{259,8 \cdot 373}{50 \cdot 10^5} = 0,0194 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Все остальные величины, входящие в формулу (129), известны. Подставляя их значения, получаем

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0,0194 \left[ 1 - \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 205 \text{ м/с} .$$

Секундный расход найдем по формуле (133):

$$G = 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot \frac{50 \cdot 10^5}{0,0194} \left[ \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,175 \text{ кг/с} .$$

При истечении в атмосферу отношение давлений

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{50} < \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{кр} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход будет максимальным. По формуле (134) с учетом показателя адиабаты для воздуха, равной 1,4, получаем:

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{\frac{287}{1,4-1} \cdot 373} = 336 \text{ м/с} .$$

Максимальный расход определяем по формуле (136) с учетом  $k=1$ :

$$G_{\max} = 0,686 f \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} = 0,686 \cdot 0,00002 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^5}{0,0194}} = 0,22 \text{ кг/с} .$$

58 Воздух при давлении 10 бар и температуре 300°С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением  $P_2 = 1$  бар. Расход воздуха 4 кг/с. Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным 10°. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

Решение:

Площадь минимального сечения сопла определяем по формуле (137). Удельный объем воздуха в минимальном сечении  $v_{кр}$  находим из соотношения параметров адиабатного процесса :

$$\frac{v_{кр}}{v_1} = \left( \frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} .$$

Значение  $v_1$  определяем из начальных условий:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 573}{10 \cdot 10^5} = 0,164 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Критическое отношение давлений для воздуха

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 0,528 .$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла,

$$P_{кр} = 0,528 P_1 = 0,528 \cdot 10 = 5,28 \text{ бар} ;$$

$$v_{кр} = v_1 \left( \frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot \left( \frac{10}{5,28} \right)^{1,4} = 0,259 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Теоретическая скорость воздуха  $\omega_{кр}$  в минимальном сечении по формуле, полученной в примере 57,

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 573} = 432 \text{ м/с}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла должна быть:

$$F_{min} = \frac{4 \cdot 0,259}{432} \cdot 10^6 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{f_{min}}{\pi/4}} = \sqrt{\frac{2400}{0,785}} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла по формуле (138)

$$F = \frac{G v_2}{\omega}.$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,85 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла по уравнению (129)

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 0,164 \left[ 1 - \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 744 \text{ м/с}$$

и, следовательно, площадь выходного сечения сопла

$$F = \frac{4 \cdot 0,85}{744} \cdot 10^6 = 4680 \text{ мм}^2,$$

а диаметр выходного сечения сопла

$$d = \sqrt{\frac{F}{0,785}} = \sqrt{\frac{4680}{0,785}} = 77,0 \text{ мм}.$$

Длина расширяющейся части определяется по формуле (140):

$$l = \frac{77,0 - 55,4}{2 \cdot 0,0875} = 123 \text{ мм} .$$

59. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление  $P_1 = 14$  бар, температура  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , а противодействие равно 0,06 бар? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Решение:

Из  $h$ -диаграммы (приложение К)

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 896 \text{ кДж/кг} ,$$

а по уравнению (131)

$$\omega = 44,76 \sqrt{896} = 1340 \text{ м/с} .$$

60 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление пара в котле 12 бар, температура  $300^\circ\text{C}$ . Процесс расширения пара считать адиабатным. Барометрическое давление принять равным 750 мм рт. ст.

Решение:

Отношение давлений равно 0,0834, т.е. оно меньше критического отношения давлений для перегретого пара, составляющего 0,546. Следовательно, если истечение происходит не через сопло Лавалья, то скорость истечения будет равна критической скорости. Для перегретого пара эта скорость определяется по уравнению (139). Для нахождения  $h_{кр}$  определяем  $P_{кр}$ :

$$P_{кр} = P_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 12 \cdot 0,546 = 6,6 \text{ бар} .$$

Проведя на  $hs$ -диаграмме (приложение Г) адиабату от точки, характеризуемой  $P_1 = 12$  бар и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , до изобары  $P_2 = 6,6$  бар, получаем:

$$h_1 - h_{кр} = 148 \text{ кДж/кг}$$

и, таким образом,

$$\omega_{кр} = 44,76 \sqrt{148} = 546 \text{ м/с}.$$

61 Решить предыдущую задачу при условии, что истечение пара происходит через сопло Лаваля.

Решение:

В этом случае скорость истечения больше критической. Она определится из уравнения

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2},$$

причем  $h_2$  будет соответствовать состоянию пара в конце адиабатного расширения при  $P = 1$  бар.

Пользуясь  $hs$ -диаграммой, получаем  $h_2 - h_1 = 492$  кДж/кг и, таким образом,

$$\omega = 44,76 \sqrt{492} = 990 \text{ м/с}.$$

62 Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от 8 бар до 6 бар. Начальная температура воздуха  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Определить изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

Решение:

Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия воздуха в начальном и конечном состояниях

одинакова, т.е.  $h_1 = h_2$ , то конечную температуру воздуха можно принять равной начальной, т.е.  $t_2 = t_1 = 20^\circ\text{C}$ .

Приращение энтропии можно определить по формуле (92):

$$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

и, так как для рассматриваемого процесса  $T_2 = T_1$ , то

$$\Delta s = -R \ln \frac{P_2}{P_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2} = 287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{8}{6} = 82,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

63 Водяной пар при давлении 18 бар и температуре  $250^\circ\text{C}$  дросселируется до давления 10 бар. Определить температуру пара в конце дросселирования.

Решение:

Находим на диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара и проводим через найденную точку линию постоянной энтальпии. На пересечении с изобарой  $P_2 = 10$  бар находим точку, характеризующую конечное состояние пара. Температура, соответствующая этой точке, равна  $234^\circ\text{C}$ .

### Задачи

202 Воздух при постоянном давлении  $P_1 = 60$  бар и  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  вытекает в среду с давлением  $P_2 = 40$  бар.

Определить теоретическую скорость и конечную температуру при адиабатном истечении.

Ответ:  $\omega = 257$  м/с;  $t_2 = -6^\circ\text{C}$ .

203 Через сопло форсунки компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия подается воздух для распыливания нефти,



поступающей в цилиндр двигателя. Давление воздуха  $P_1 = 50$  бар, а его температура  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ . Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя 35 бар. Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха из сопла форсунки.

Ответ:  $\omega = 241$  м/с.

204 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если  $P_1 = 70$  бар,  $P_2 = 45$  бар,  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ ,  $F = 10$  мм<sup>2</sup>.

Ответ:  $\omega = 282$  м/с;  $G = 0,148$  кг/с.

205 Воздух при давлении  $P_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  вытекает из резервуара. Найти значение  $P_2$ , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, и величину этой скорости.

Ответ:  $P_{2\text{кр}} = 0,528$  бар;  $\omega_{\text{кр}} = 310$  м/с.

206 К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении 10 бар и температуре  $600^\circ\text{C}$ . Давление за соплами 1,2 бар. Расход газа, отнесенный к одному соплу,  $G = 1440$  кг/ч. Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным  $10^\circ$ . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

Ответ:  $d_{\text{min}} = 19,4$  мм;  $d = 25$  мм;  $l = 32$  мм.

207 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха через сопло Лавалья, если  $P_1 = 8$  бар и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а давление среды на выходе из сопла  $P_2 = 1$  бар. Сравнить полученную скорость с критической.

Ответ:  $\omega = 514$  м/с;  $\omega_{\text{кр}} = 313$  м/с.

208 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление в котле 1,5 бар и степень сухости 0,95. Процесс расширения пара считать адиабатным.

Ответ:  $\omega = 360$  м/с.

209 Влажный пар с параметрами  $P_1 = 18$  бар и  $x_1 = 0,92$  вытекает в среду с давлением  $P_2 = 12$  бар; площадь выходного сечения сопла  $20$  мм<sup>2</sup>. Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

Ответ:  $\omega = 380$  м/с;  $G = 0,05$  кг/с.

210 Определить теоретическую скорость истечения пара из сопла Лаваля для следующих данных:  $P_1 = 16$  бар,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ ,  $P_2 = 1$  бар. Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Ответ:  $\omega = 1040$  м/с.

211 Водяной пар давлением 20 бар с температурой  $400^\circ\text{C}$  при истечении из сопла расширяется по адиабате до давления 2 бар. Определить площадь минимального и выходного сечения сопла, а также скорости истечения в этих соплах, если расход пара 4 кг/с. Процесс расширения пара в сопле принять адиабатным.

Ответ:  $F_{\min} = 16$  см<sup>2</sup>;  $F_{\max} = 36$  см<sup>2</sup>;

$\omega_{\text{кр}} = 580$  м/с;  $\omega = 1050$  м/с.

212 Парогенератор вырабатывает 1800 кг/ч пара давлением 10,8 бар. Каким должно быть сечение предохранительного клапана, чтобы при внезапном прекращении отбора пара давление не превысило 10,8 бар?

Ответ:  $F_{\min} = 321$  мм<sup>2</sup>.

213 Для обдувки поверхностей нагрева паровых котлов пользуются так называемыми обдувочными аппаратами, снабженными соплами, через которые обычно пропускают пар или воздух.

Определить диаметры минимального и выходного сечения сопла для часового расхода 1000 кг сухого насыщенного пара, если начальное давление его  $P_1 = 20,6$  бар, а конечное  $P_2 = 1,0$  бар. Процесс расширения пара принять адиабатным. Определить также теоретическую скорость истечения пара из сопла.

Ответ:  $d_{\min} = 11,2$  мм;  $d = 22,4$  мм;  $\omega = 1000$  м/с.

214 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 200^\circ\text{C}$  дросселируется от давления 12 бар до давления 7 бар. Определить энтальпию воздуха после дросселирования (принимая, что энтальпия его при  $0^\circ\text{C}$  равна нулю) и изменение энтропии в рассматриваемом процессе.

Ответ:  $h=202,4$  кДж/кг;  $\Delta s=0,157$  кДж/(кг·К).

215 В стальном баллоне находятся 6,25 кг воздуха при давлении 50 бар. При выпуске из баллона воздуха он дросселируется до давления 25 бар. Определить приращение энтропии в процессе дросселирования.

Ответ:  $\Delta s = 0,199$  кДж/К.

216 Пар при давлении 1 бар и  $x_1 = 0,9$  дросселируется до давления 1 бар. Определить конечную сухость пара.

Ответ:  $x_2 = 0,96$ .

217 До какого давления необходимо дросселировать пар при  $P_1 = 60$  бар и  $x_1 = 0,96$ , чтобы он стал сухим насыщенным?

Ответ:  $P_2 = 2,6$  бар.

218 Пар при давлении 20 бар и степени сухости 0,9 дросселируется до давления 8 бар. Определить состояние пара в конце дросселирования.

Ответ:  $x_2 = 0,921$ .

219 Пар при давлении 100 бар и  $t_1 = 320^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2 = 30$  бар. Определить параметры конечного состояния и изменение температуры пара.

Ответ:  $x_2 = 0,99$ ;  $\Delta t = 85^\circ\text{C}$ .

220 Отработавший пар из паровой турбины поступает в конденсатор в количестве 125 т/ч. Состояние отработавшего пара:  $P_2 = 0,044$  бар и  $x = 0,89$ . Определить диаметр входного патрубка конденсатора, если скорость пара в нем  $\omega = 120$  м/с.

Ответ:  $d = 3,22$  м.

221 Определить площади минимального и выходного сечений сопла Лаваля, если известны начальные параметры пара:  $P_1 = 9,8$  бар,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Давление за соплом  $P_2 = 2,45$  бар. Расход пара через сопло 720 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94.

Ответ:  $F_{\min} = 165 \text{ мм}^2$ ;  $F_{\max} = 210 \text{ мм}^2$ .

222 В паровую турбину подается пар со следующими параметрами:  $P_1 = 60$  бар,  $t_1 = 400^\circ\text{C}$ . В клапанах турбины пар дросселируется до 55 бар и поступает в расширяющиеся сопла, давление за которыми  $P_2 = 10$  бар. Расход пара через одно сопло 8000 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94. Определить площади минимального и выходного сечений.

Ответ:  $F_{\min} = 355 \text{ мм}^2$ ;  $F_{\max} = 546 \text{ мм}^2$ .

223 По паропроводу течет влажный пар, параметры которого:  $P_1 = 10$  бар и  $x_1 = 0,98$ . Часть пара через дроссельный вентиль перепускается в паропровод, давление в котором  $P_2 = 1,2$  бар. Определить состояние пара в паропроводе низкого давления.

Ответ: пар перегретый,  $t_2 = 130^\circ\text{C}$ .

## 1.10 Пары. Водяной пар

В зависимости от состояния пар может быть сухим, влажным и перегретым. **Сухой пар**, находящийся в равновесии с жидкостью, - это насыщенный пар. **Влажный пар** - это механическая смесь сухого пара и кипящей жидкости. **Перегретый пар** является ненасыщенным паром. Для аналитического решения задач на пары используются таблицы водяного пара (Приложение Д) и приводимые ниже формулы.

**Сухой пар.** Основными параметрами состояния сухого пара являются:  $P$ , Па - абсолютное давление;  $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;  $t''$ , °С - температура насыщения.

Состояние сухого пара полностью характеризуется или давлением или температурой насыщения, а все остальные параметры и термодинамические величины для него могут быть найдены по паровым таблицам – приложение Д. В таблицах Д.1 и Д.2 для 1 кг сухого пара содержатся величины следующих данных:

- $P$ , МПа - абсолютное давление;
- $t_n$ , °С или  $T_n$ , К - температура насыщения;
- $v'$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем кипящей жидкости;
- $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем сухого пара;
- $\rho''$ , кг/м<sup>3</sup> - плотность сухого пара;
- $h'$ , кДж/кг - энтальпия кипящей жидкости;
- $h''$ , кДж/кг — энтальпия сухого пара;
- $r$ , кДж/кг — теплота парообразования;
- $s'$ , кДж/(кг·К) - энтропия кипящей жидкости;
- $s''$ , кДж/(кг·К) - энтропия сухого пара.

Энтальпия и энтропия сухого пара кипящей жидкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$h'' = h' + r; \quad s'' = s' + \frac{r}{T_H}. \quad (143)$$

**Влажный пар.** В 1 кг влажного пара содержится  $x$  кг сухого пара (степень сухости влажного пара) и  $(1-x)$  кг кипящей жидкости (степень влажности). Состояние влажного пара принято обычно характеризовать одной из следующих пар параметров:  $P, x; P, (1-x); t'', x; t'', (1-x)$ .

Удельный объем влажного пара

$$v_x = x v'' + (1-x) v' = v' + x (v'' - v'), \quad (144)$$

при  $x > 0,5$  и небольших давлениях с достаточной степенью точности

$$v_x = x v''. \quad (145)$$

Энтальпия влажного пара

$$h_x = h' + x (h'' - h') = h' + x r. \quad (146)$$

Внутренняя энергия влажного пара

$$u_x = h_x - P v_x. \quad (147)$$

Энтропия влажного пара

$$s_x = s' + x (s'' - s') = s' + \frac{x r}{T_H}. \quad (148)$$

**Перегретый пар.** Основными параметрами состояния перегретого пара являются:  $P, Pa$  - абсолютное давление;  $v, m^3/kg$  - удельный объем;  $t, ^\circ C$  или  $T, K$  - температура перегрева.

Состояние перегретого пара характеризуется двумя параметрами:  $P$  и  $t$  – приложение Е. В таблицах для 1 кг перегретого пара содержатся величины следующих данных:

$P, Pa$  - абсолютное давление;

$t, ^\circ C$  - температура перегретого пара;

$v, m^3/kg$  - удельный объем перегретого пара;

$h$ , кДж/кг - энтальпия перегретого пара;

$s$ , кДж/(кг·К) - энтропия перегретого пара.

Тепло, идущее на перегрев пара, при  $P = \text{const}$ , кДж/кг,

$$q_{II} = h - h'' = \bar{C}_p (t - t''), \quad (149)$$

где  $\bar{C}_p$  - средняя массовая теплоемкость перегретого пара для интервала температур насыщения и перегрева, кДж/(кг·К).

Энтальпия перегретого пара, кДж/кг,

$$h = h'' + q_{II} = h'' + \bar{C}_p (t - t''). \quad (150)$$

Внутренняя энергия перегретого пара, кДж/кг,

$$u = h - P v. \quad (151)$$

Энтропия перегретого пара, кДж/(кг·К),

$$s = s'' + \left( \frac{C_p}{T} \right)_{CP} (t - t''), \quad (152)$$

где  $\left( \frac{C_p}{T} \right)_{CP}$  - средняя величина отношения истинной теплоемкости при  $P = \text{const}$  к абсолютной температуре для интервала температур насыщения и перегрева.

### **Основные паровые процессы и их исследование по таблицам водяного пара**

Изохорный процесс ( $v = \text{const}$ ). Тепло, участвующее в процессе, идет исключительно на изменение внутренней энергии пара, так как работа процесса равна нулю:

$$q = u_2 - u_1. \quad (153)$$

Для определения конечных параметров пара по начальным используется уравнение процесса –  $v_2 = v_1$ .

Изобарный процесс ( $P=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы, уравнение может быть представлено в виде

$$q = h_2 - h_1 . \quad (154)$$

Изотермический процесс ( $T=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) \quad (155)$$

происходит за счет изменения ее потенциальной части, причем при росте объема пара внутренняя энергия увеличивается и наоборот.

Тепло, участвующее в процессе,

$$q = T (s_2 - s_1) . \quad (156)$$

Работа процесса

$$l = q - \Delta u . \quad (157)$$

Адиабатный процесс ( $dq=0$ ). Из уравнения первого закона термодинамики следует, что работа для адиабатного процесса

$$l = u_1 - u_2 . \quad (158)$$

Для нахождения конечных параметров процесса по начальным используется уравнение адиабаты –  $s_2 = s_1$ .

Процесс при постоянной степени сухости ( $x=\text{const}$ ). Возможно лишь приближенное решение процесса. Участвующее в процессе тепло

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} (s_2 - s_1) . \quad (159)$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики.

При аналитическом решении процессов с парами начальное и



конечные значения внутренней энергии, энтальпии и энтропии определяются по приведенным формулам в зависимости от вида пара в начале и конце процесса.

**Исследование паровых процессов по  $h$ - $s$ -диаграмме водяного пара** – приложение Г. Решение с помощью диаграммы более наглядно и значительно сокращает время, необходимое для расчета.

По  $h$ - $s$ -диаграмме определяют состояние для перегретого, сухого насыщенного и влажного водяного пара. По любой точке диаграммы можно найти следующие величины:

$v$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;

$t$ , °С - температура;

$P$ , Па - давление абсолютное;

$h$ , кДж/кг - энтальпия;

$s$ , кДж/(кг·К) - энтропия.

Значение внутренней энергии (кДж/кг) подсчитывается по формуле

$$u = h - P v . \quad (160)$$

Рассмотрим основные задачи, решаемые по  $h$ - $s$ -диаграмме.

**Изохорный процесс** ( $v = \text{const}$ ). На рис. 9 изображен изохорный процесс на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество тепла, участвующего в процессе, определяется по формуле (153), которая одновременно служит для нахождения изменения внутренней энергии. Работа изохорного процесса, как и для газов, равняется нулю.

**Изобарный процесс** ( $P = \text{const}$ ). На рис. 10 представлен изобарный процесс на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество участвующего в процессе тепла находится по разности энтальпий (154).

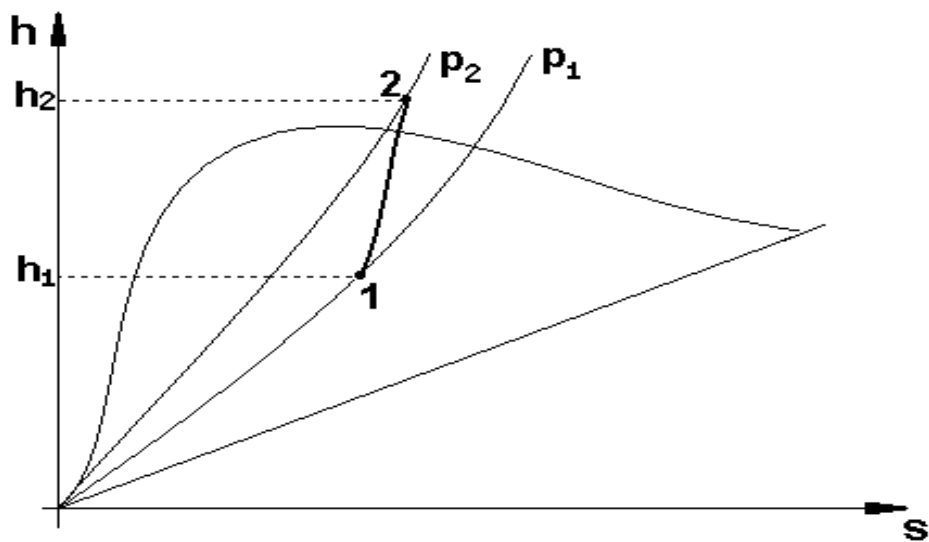


Рисунок 9 – Изображение изохорного процесса на  $h$ - $s$ -диаграмме

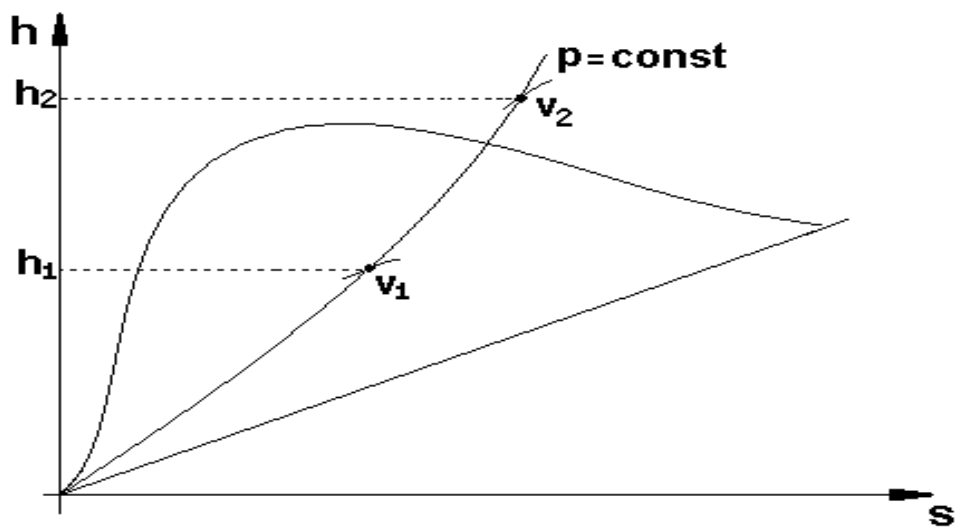


Рисунок 10 – Изображение изобарного процесса на  $h$ - $s$ -диаграмме

Изменение внутренней энергии находят по формуле (155). Работу изобарного процесса можно определить или по формуле

$$l = P(v_2 - v_1), \quad (161)$$

или по уравнению первого закона термодинамики (50).

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ). На рис. 11 изображен изотермический процесс на  $hs$ -диаграмме.

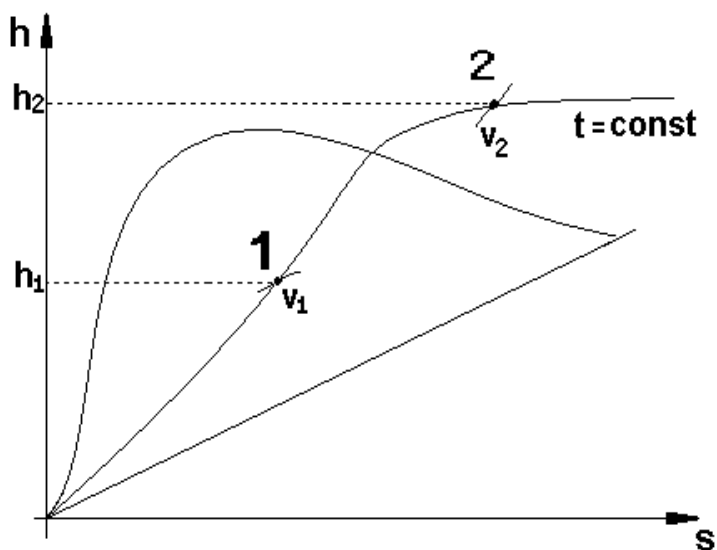


Рисунок 11 – Изображение изотермического процесса на  $hs$ -диаграмме

Тепло, изменение внутренней энергии (потенциальной ее части) и работу процесса находят по формулам (155) – (157).

**Адиабатный процесс** ( $dq=0$ ). На рис. 12 представлен адиабатный процесс, протекающий без участия тепла, т. е. и без изменения энтропии.

Изменение внутренней энергии для адиабатного процесса определяют, как и для прочих процессов, по выражению (155). Работа процесса равна изменению внутренней энергии.

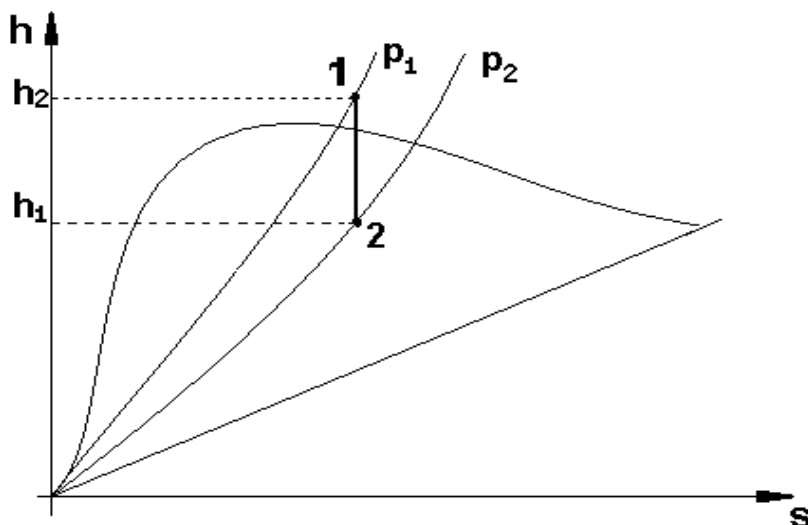


Рисунок 12 – Изображение адиабатного процесса на hs-диаграмме

**Процесс при постоянной степени сухости** ( $x=\text{const}$ ). Если в первом приближении линию  $x=\text{const}$  в Ts-диаграмме принять за прямую линию, то тепло процесса, определяемое площадью под линией, можно найти по формуле

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s . \quad (162)$$

Применительно к hs-диаграмме (рис. 13) эта формула примет вид

$$q = \frac{t_1 + 273 + t_2 + 273}{2} (s_2 - s_1) . \quad (163)$$

Изменение внутренней энергии в процессе находят обычным способом (155). Работа процесса определяется по уравнению (157).

**Теоретический паросиловой цикл** (цикл Ренкина). Для определения основных величин цикла – термического КПД, работы 1 кг пара, удельных расходов пара и тепла - достаточно на диаграмме изобразить линию расширения пара в паровом двигателе 1-2 (рис. 14).

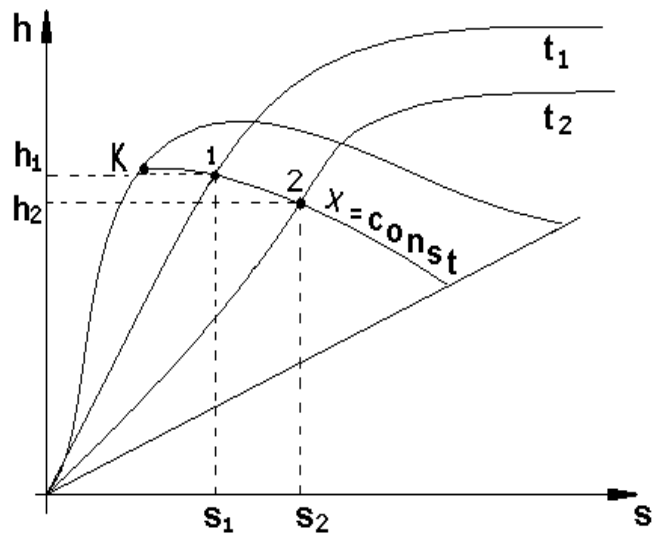


Рисунок 13 – Изображение процесса при постоянной степени сухости на  $hs$ -диаграмме

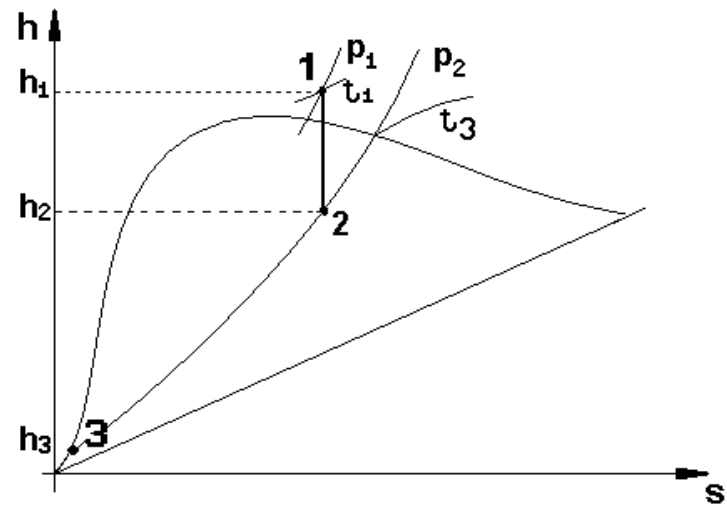


Рисунок 14 – Изображение процесса расширения пара в паровом двигателе на  $hs$ -диаграмме

## Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_3}, \quad (164)$$

поскольку энтальпия конденсата (точка 3) численно равна температуре насыщения в той же точке. Работа 1 кг пара

$$l_u = h_2 - h_1. \quad (165)$$

Удельный расход пара на 1 кВт·ч

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{h_1 - h_2}; \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (166)$$

Удельный расход тепла на 1 кВт·ч

$$q = G (h_1 - h_3) \cong G (h_1 - t_3); \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (167)$$

или

$$q = \frac{3600}{\eta_t}; \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (168)$$

В формулах (166) – (168) величина 3600 кДж/(кВт·ч) является тепловым эквивалентом.

**Дросселирование.** Термодинамическая характеристика процесса дросселирования  $h = \text{const}$ . Если состояние пара до дросселирования определяется точкой 1 (рис. 15) и давление  $P_2$  после дросселирования задано, то конечное состояние определится точкой 2, лежащей на пересечении горизонтальной линии, проведенной из точки 1, с изобарой  $P_2$ .

При этом по расположению точки 2 видно, что в результате дросселирования пар, будучи вначале влажным, стал перегретым, что удельный объем его возрос, что температура снизилась, а энтропия возросла.

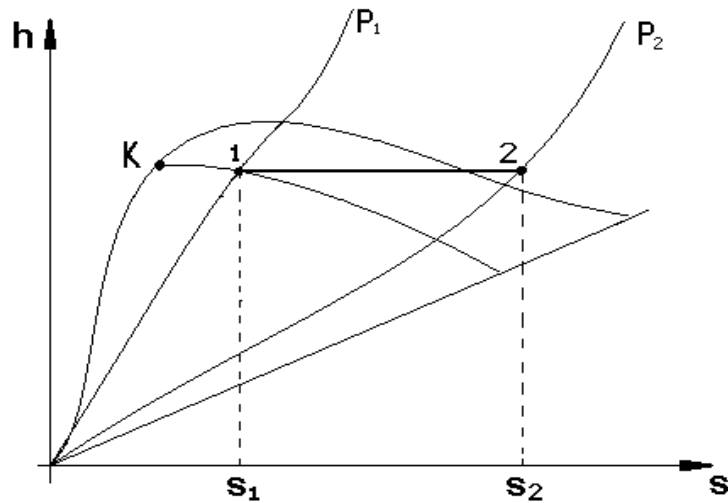


Рисунок 15 – Изображение процесса дросселирования пара на hs-диаграмме

Эффект изменения температуры при дросселировании называется дроссель-эффектом (эффектом Джоуля - Томсона), который принято различать по величине и знаку.

Под дифференциальным дроссель-эффектом понимают величину

$$\epsilon = \left( \frac{dT}{dP} \right)_h, \quad (169)$$

т. е. изменение температуры при дросселировании на  $dP$ , причем поскольку всегда  $dp < 0$ , то

при  $dT < 0$   $\epsilon > 0$  (положительный дроссель-эффект),

при  $dT > 0$   $\epsilon < 0$  (отрицательный дроссель-эффект),

при  $dT = 0$   $\epsilon = 0$  (нулевой дроссель-эффект).

Интегральный дроссель-эффект есть изменение температуры при дросселировании на конечное количество единиц давления:

$$\Delta T = \int_{P_1}^{P_2} \varepsilon dP . \quad (170)$$

Его знак совпадает со знаком дифференциального дроссель-эффекта. Поскольку дросселирование происходит без теплообмена с внешней средой (адиабатически необратимо), то отмеченное возрастание энтропии указывает на необратимость процесса дросселирования.

### Примеры решения задач

64 В трубу парового котла поступает 1000 кг/ч воды при температуре насыщения. Найти плотность выходящей из трубы пароводяной смеси, если давление в котле  $P_{абс}=40$  ат, теплоглощение трубы 40000 ккал/ч; изменением давления по высоте трубы можно пренебречь.

Решение:

Определяем по табл. Д.2 приложения Д теплоту парообразования  $r$ , удельный объем кипящей воды  $v'$  и сухого пара  $v''$  при давлении 40 ат (3,92 МПа).

Количество получающегося пара в трубе

$$G_{п} = \frac{Q}{r} = \frac{40000 \cdot 4,186}{1713,2,6} = 97,7 \text{ кг/ч} .$$

Степень сухости смеси в выходном сечении трубы

$$x = \frac{G_{п}}{G_{вод}} = \frac{97,7}{1000} = 0,0977 .$$

Удельный объем смеси по уравнению (144)

$$v_x = 0,0977 \cdot 0,05078 + (1 - 0,0977) \cdot 0,0012493 = 0,00608 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Следовательно, плотность смеси



$$\rho_x = \frac{1}{0,00608} = 164 \text{ кг/м}^3.$$

65 На получение пара давлением  $P=75$  ат затрачено тепла 480 ккал/кг. Определить состояние пара и его плотность, если пар получался из воды с температурой  $150^\circ\text{C}$ .

Решение:

Энтальпия воды при температуре  $150^\circ\text{C}$  (по табл. Д.1 приложения Д) составляет 632,2 кДж/кг.

Энтальпия пара

$$h = h' + q = 632,2 + 480 \cdot 4,186 = 2641,5 \text{ кДж/кг}.$$

Характеристики водяного пара при давлении 75 ат (7,35 МПа) следующие (табл. Д.2 приложения Д):

$$h' = 1231 \text{ кДж/кг}; h'' = 2758,6 \text{ кДж/кг}; r = 1492 \text{ кДж/кг}; \rho'' = 38,6 \text{ кг/м}^3.$$

Сравнивая энтальпию полученного пара с энтальпией сухого пара, устанавливаем, что пар влажный.

Степень сухости пара определяем исходя из уравнения (146):

$$x = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{2641,5 - 1231}{1492} = 0,94.$$

Плотность полученного пара

$$\rho_x = \frac{\rho''}{x} = \frac{38,6}{0,94} = 41,06 \text{ кг/м}^3.$$

66 В резервуаре объемом  $0,75 \text{ м}^3$  находится сухой насыщенный пар давлением 1 МПа. Пар подогревается при неизменном объеме, и к концу нагревания его давление повышается до 1,4 МПа.

Определить количество затраченного на нагревание тепла.

Решение:

Сухой насыщенный пар при  $P=1$  МПа имеет удельный объем  $v''=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг и энтальпию  $h''=2777,8$  кДж/кг. Следовательно, его внутренняя энергия

$$u'' = h'' - P_1 v'' = 2777,8 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,1945 = 2583,3 \text{ кДж/кг.}$$

К концу нагревания пар будет перегрет, причем его энтальпия будет равна (интерполяция по таблицам перегретого пара для  $P=1,4$  МПа,  $v=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг – приложение Е): 3197,3 кДж/кг.

Внутренняя энергия перегретого пара

$$u = h - P_2 v = 3197,3 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1945 = 2906,3 \text{ кДж/кг.}$$

Масса пара в сосуде

$$m = \frac{V}{v''} = \frac{0,75}{0,1945} = 3,85 \text{ кг.}$$

На нагревание было затрачено тепло

$$Q = m (u - u'') = 3,85 \cdot (2906,3 - 2583,3) = 1244 \text{ кДж.}$$

67 Найти количество получающегося сухого насыщенного пара в сепараторе непрерывной продувки парового котла производительностью 200 т/ч, если процент непрерывной продувки равен 2,5%, давление в котле  $P_1=3$  МПа, а котловая вода перед входом в сепаратор дросселируется до  $P_2=0,3$  МПа. КПД сепаратора принять равным 98%.

Решение:

Энтальпия котловой воды при давлении 3 МПа составляет 1009,4 кДж/кг (табл. Д.2). При давлении 0,3 МПа энтальпия воды – 561,7 кДж/кг; энтальпия сухого насыщенного пара - 2725,5 кДж/кг; теплота парообразования – 2163,8 кДж/кг.

Количество выделяемого сепаратором пара

$$G = \frac{0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot (10009,4 - 561,7) \cdot 0,98}{2163,8} = 1043 \text{ кг/ч.}$$

68 Какое количество воды можно нагреть от 10 до 20°C водой, выходящей из сепаратора непрерывной продувки (см. задачу 67), если вода в теплообменнике непрерывной продувки должна быть охлаждена до 50°C? Потеря тепла теплообменником в окружающую среду 5%.

Решение:

Энтальпия воды при 50°C (табл. Д.1) 209,3 кДж/кг.

Количество подогреваемой воды

$$G_{\text{вод}} = \frac{(561,75 - 209,3) \cdot 0,95 \cdot (0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 - 1043)}{20 - 10} = 31400 \text{ кг/ч.}$$

69 В установке для подогрева сетевой воды (системы теплофикации) имеются пиковые и основные подогреватели. Первые обогреваются паром с давлением 5 ат и температурой 250°C, а вторые - паром с  $P_2=1,2$  ат температурой 130°C. Конденсат пиковых подогревателей направляется в основные, где происходит частичное использование его энтальпии.

Определить часовые расходы пара на пиковые и основные подогреватели, если:

- количество воды, которую следует подогреть,  $G_w=30$  т/ч;
- вода в установке подогревается с  $t_1=60^\circ$  до  $t_2=110^\circ\text{C}$ ;
- разность между температурой воды, выходящей из основных подогревателей, и температурой насыщения обогревающего их пара составляет  $8^\circ\text{C}$ ;
- КПД подогревателей  $\eta=98\%$ .

Решение:

Температура насыщения пара при  $P_2=1,2 \text{ ат} = 0,12 \text{ МПа}$  (табл. Д.2) составляет  $t''=104,25^\circ\text{C}$ , следовательно, при входе в пиковые подогреватели сетевая вода будет иметь температуру

$$t = 104,25 - 8 = 96,25^\circ\text{C}.$$

Энтальпия пара при  $250^\circ\text{C}$  составляет  $h_5=2801 \text{ кДж/кг}$  (табл. Д.1). Энтальпия кипящей воды при  $P_1=5 \text{ ат} = 0,49 \text{ МПа}$  (табл. Д.2) составляет  $h'_5=640,1 \text{ кДж/кг}$ .

Расход пара на пиковые подогреватели

$$G_5 = \frac{G_w \cdot 10^3 \cdot (t_2 - t)}{\eta (h_5 - h'_5)} = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot (110 - 96,25)}{0,98 \cdot (2801 - 640,1)} = 775 \text{ кг/ч}.$$

Энтальпия пара при  $130^\circ\text{C}$  –  $h_{1,2}=2720,6 \text{ кДж/кг}$ . Энтальпия кипящей воды при  $P_2=1,2 \text{ ат} = 0,12 \text{ МПа}$  –  $h'_{1,2}=439,34 \text{ кДж/кг}$ .

Суммарный теплосъем с основных подогревателей

$$q_{\text{оп}} = G_w \cdot 10^3 \cdot C_w (t - t_1) = 30 \cdot 10^3 \cdot 4,186 \cdot (96,25 - 60) = 4,55 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч},$$

из которых на конденсат пиковых подогревателей приходится:

$$q' = \eta G_5 (h'_5 - h'_{1,2}) = 0,98 \cdot 775 \cdot (640,1 - 439,34) = 151887 \text{ кДж/ч}$$

и на пар при давлении  $0,12 \text{ МПа}$  -

$$q_{\text{оп}} - q' = 4,55 \cdot 10^6 - 151887 = 4,4 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Часовой расход пара на основные подогреватели

$$G_{1,2} = \frac{4,4 \cdot 10^6}{0,98 \cdot (2720,6 - 439,34)} = 1955 \text{ кг/ч}.$$

70 Найти с помощью  $h_s$ -диаграммы теплоту парообразования для давления  $5 \text{ бар}$ .

Решение:

На  $h_s$ -диаграмме находим изобару  $P=5 \text{ бар}$  (приложение Г).

На изобаре при любой степени сухости берется точка 1 и рассматривается изобарный процесс 1-2 (точка 2 – сухой насыщенный пар), для которого подведенное тепло

$$q = h_2'' - h_1 = r(1 - x).$$

Например, точка 1:  $P_1=5$  бар;  $x=0,8$ ;  $h_1=2340$  кДж/кг. Точка 2:  $P_2=5$  бар;  $h_2=2750$  кДж/кг. Теплота парообразования для давления 5 бар будет соответственно равна

$$r = \frac{h_2'' - h_1}{1 - x} = \frac{2750 - 2340}{1 - 0,8} = 2050 \text{ кДж/кг}.$$

71 В сосуде неизменной емкости находится 1 кг пара с давлением 30 бар и температурой  $600^\circ\text{C}$ . От пара отводится 400 кДж тепла. До каких значений упадут давление и температура пара внутри сосуда?

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме исходную точку 1 ( $P_1=30$  бар;  $t_1=600^\circ\text{C}$ ) и находим: значение энтальпии –  $h_1=3690$  кДж/кг и удельного объема –  $v_1=0,133$  м<sup>3</sup>/кг. Внутренняя энергия для нее будет:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 880 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3290 \text{ кДж/кг}.$$

В изохорном процессе теплообмен связан лишь с изменением внутренней энергии. Следовательно,

$$u_2 = u_1 - q = 3290 - 400 = 2890 \text{ кДж/кг}.$$

Давление в точке 2 находим интерполяцией. Для этого на изохоре  $v=0,133$  м<sup>3</sup>/кг берем две точки с давлениями (произвольными):  $P_3=20$  бар и  $P_4=24$  бар, определяем по диаграмме их энтальпию и подсчитываем для них внутреннюю энергию:

для  $P_3=20$  бар -

$$u_3 = 3080 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 2820 \text{ кДж/кг};$$

для  $P_4=24$  бар -

$$u_4 = 3310 \cdot 10^3 - 24 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3000 \text{ кДж/кг}.$$

Давление в конце процесса находят интерполяцией:

$$P_2 = 20 + \frac{(24 - 20)(2890 - 2820)}{3000 - 2820} = 23,5 \text{ бар}.$$

Находим на диаграмме точку 2 и определяем ее температуру  $t_2=350^\circ\text{C}$ .

72 Сухой насыщенный пар при постоянном давлении 10 бар сначала перегревается до  $600^\circ\text{C}$ , а затем при неизменном объеме вновь охлаждается до сухого насыщенного состояния. Найти изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме точки 1, 2 и 3 и определяем их характеристики:

$$P_1=10 \text{ бар}; x=1; h_1=2770 \text{ кДж/кг}; s_1=6,68 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_1=0,22 \text{ м}^3\text{/кг};$$

$$t_2=600^\circ\text{C}; h_2=3700 \text{ кДж/кг}; s_2=8,06 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_2=0,4 \text{ м}^3\text{/кг};$$

$$v_3=0,4 \text{ м}^3\text{/кг}; P_3=4 \text{ бар}; x=1; h_3=2750 \text{ кДж/кг}; s_3=6,88 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Находим изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе:

$$\Delta h = h_3 - h_1 = 2750 - 2770 = -20 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u = u_3 - u_1 = (2750 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5 \cdot 0,4) - (2770 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,22) = -21,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = s_3 - s_1 = 6,88 - 6,68 = 0,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

73 Процесс протекает при неизменной 90%-ной сухости от давления  $P_1=20$  бар до давления  $P_2=1$  бар. Найти участвующее в процессе тепло, изменение внутренней энергии и работу пара по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ s-диаграмме (приложение Г) точки 1 и 2 и определяем их характеристики:

$$P_1=20 \text{ бар}; x=0,9;$$

$$t_1=212 \text{ }^\circ\text{C}; h_1=2620 \text{ кДж/кг}; s_1=5,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_1=0,11 \text{ м}^3\text{/кг};$$

$$P_2=1 \text{ бар}; x=0,9;$$

$$t_2=100 \text{ }^\circ\text{C}; h_2=2450 \text{ кДж/кг}; s_2=6,76 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_2=1,5 \text{ м}^3\text{/кг}.$$

Найдем подведенное тепло по уравнению (162):

$$q \cong \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s = \frac{485 + 373}{2} (6,76 - 5,97) = 339 \text{ кДж/кг},$$

затем изменение внутренней энергии в процессе

$$\Delta u = (2450 \cdot 10^3 - 10^5 \cdot 1,5) - (2620 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,11) = -137,5 \text{ кДж/кг}.$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики:

$$l = q - \Delta u = 339 - (-137,5) = 485,5 \text{ кДж/кг}.$$

74 Перегретый пар давлением  $P_1=100$  бар и температурой  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2=10$  бар. Определить средний дифференциальный дроссель-эффект по величине и знаку.

Решение:

Для нахождения состояния пара после дросселирования из точки 1 ( $P_1=100$  бар;  $t_1=350 \text{ }^\circ\text{C}$ ) проводим линию  $h=\text{const}$  до пересечения с заданным конечным давлением  $P_2=10$  бар. По  $h$ s-диаграмме на-

ходим  $t_2=243^\circ\text{C}$ . Следовательно, средний дифференциальный дроссель-эффект

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{P_2 - P_1} = \frac{243 - 350}{10 - 100} = 1,185 .$$

Поскольку при дросселировании всегда  $\Delta P < 0$ , а в данном случае и  $\Delta t < 0$ , то знак дроссель-эффекта положительный ( $\varepsilon > 0$ ).

75 Для подачи потребителю пара в сухом насыщенном состоянии давлением 6 бар используется пар, вырабатываемый котлами при  $P_2=40$  бар и  $350^\circ\text{C}$ . После дросселирования пар пропускается через поверхностный пароохладитель, где происходит его охлаждение при неизменном давлении. Сколько тепла за 1 ч отводится от пара в охладителе, если расход его составляет 5000 кг/ч?

Решение:

Наносим на  $h_s$ -диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара, вырабатываемого котлами, – точка 1, после дросселирования – точка 2 и направляемого потребителю – точка 3. Определим значение энтальпии до и после пароохладителя:

$$h_1=3090 \text{ кДж/кг}; h_2=2760 \text{ кДж/кг}.$$

Поскольку охлаждение пара в поверхностном охладителе происходит при  $P=\text{const}$ , то отведенное тепло

$$Q = G (h_3 - h_2) = 5000 \cdot (2760 - 3090) = -1650000 \text{ кДж/ч} = 458 \text{ кДж/с} .$$

76 В идеальном паросиловом цикле Ренкина пар перед турбиной имеет давление 50 бар и температуру  $400^\circ\text{C}$ . Определить работу 1 кг пара, расходы пара и тепла на киловатт-час и термический КПД, если вакуум в конденсаторе турбины 95%, а барометрическое давление 700 мм рт. ст.



Решение:

Абсолютное давление в конденсаторе

$$P_2 = \frac{P_{\text{бар}} (1 - 0,95)}{735,6} = \frac{700 \cdot (1 - 0,95)}{735,6} = 0,04665 \text{ бар} .$$

Для нахождения указанных в задаче величин достаточно на диаграмме (приложение Г) провести линию 1-2 адиабатного расширения пара в турбине. Характеристики точек:

$$h_1 = 3200 \text{ кДж/кг}; h_2 = 2020 \text{ кДж/кг}; t_2 = 32 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Работа 1 кг пара

$$l_u = h_1 - h_2 = 3200 - 2020 = 1180 \text{ кДж/кг} .$$

Удельный расход пара на киловатт-час

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{1180} = 3,05 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} .$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_2} = \frac{3200 - 2020}{3200 - 32} = 0,384 .$$

Удельный расход тепла на киловатт-час

$$q = \frac{3600}{\eta_t} = \frac{3600}{0,384} = 9375 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} .$$

### Задачи

224 Найти температуру насыщенного пара при давлении 85,4 ат.

Ответ:  $t'' = 298,34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

225 Температура насыщенного пара при некотором давлении равна  $305,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Каково давление этого пара?

Ответ:  $P = 92,9 \text{ бар}$ .

226 По данным испытаний турбины разрежение в ее конденсаторе составляет 94% при барометрическом давлении 730 мм рт. ст. и 0°C. Каково абсолютное давление в конденсаторе?

Ответ:  $P=0,0587$  бар.

227 Абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины 0,04 ат. Каково при этом значение вакуума в процентах, если барометрическое давление 720 мм рт. ст. при температуре 25°C?

Ответ: вакуум 96%.

228 Как велика ошибка при определении удельного объема влажного пара с давлением 20 ат и влажностью 20% по приближенной формуле (145)?

Ответ: ошибка 0,288%.

229 Какова будет ошибка при определении удельного объема пара предыдущей задачи, если влажность пара увеличится до 60%.

Ответ: ошибка 1,705%.

230 Пользуясь паровыми таблицами, найти удельный объем, энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию влажного пара при давлении 5 ат и влажности 15%.

Ответ:  $v_x = 0,324$  м<sup>3</sup>/кг;  $h_x=2430$  кДж/кг;  
 $u_x=2270$  кДж/кг;  $s_x=6,1$  кДж/(кг·К).

231 В сосуде шарообразной формы находится в верхней половине сухой насыщенный пар, в нижней - вода в состоянии насыщения. Во сколько раз вес воды больше веса пара, если внутренний диаметр сосуда 1 м и давление внутри него 20 ат?

Ответ: в 86,5 раз.

232 Пар в некотором состоянии имеет давление 30 ат и плотность 14,71 кг/м<sup>3</sup>. Определить состояние пара и его удельный объем, энтальпию и энтропию.

Ответ: пар сухой;  $v''=0,06798 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$h''=2800 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=6,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

233 Пар в некотором состоянии при температуре  $245^\circ\text{C}$  имеет энтальпию  $630 \text{ ккал/кг}$ . Определить состояние пара, его плотность и внутреннюю энергию.

Ответ: пар влажный;  $\rho_x=20,2 \text{ кг/м}^3$ ;

$u_x=2460 \text{ кДж/кг}$ .

234 Пар при давлении  $66 \text{ ат}$  имеет удельный объем  $0,04675 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Найти температуру, энтальпию и энтропию пара.

Ответ: пар влажный;  $h=3260 \text{ кДж/кг}$ ;

$s=6,64 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

235 Стальной цилиндрический резервуар диаметром  $600 \text{ мм}$  и длиной  $2500 \text{ мм}$  заполнен сухим насыщенным паром с  $P_1=20 \text{ ат}$ . К резервуару подводится некоторое количество тепла, в результате чего давление пара увеличивается до  $P_2=35 \text{ ат}$ . Определить конечную температуру пара и количество подведенного тепла.

Ответ:  $t_2 = 503,3^\circ\text{C}$ ;  $Q=3565 \text{ кДж}$ .

236 Найти тепло, идущее на перегрев сухого насыщенного пара давлением  $80 \text{ бар}$  до  $500^\circ\text{C}$ , с помощью паровых таблиц, а также используя данные о теплоемкостях пара. На сколько процентов энтальпия перегретого пара больше энтальпии сухого пара?

Ответ:  $q=614 \text{ кДж/кг}$ ; на  $23,3\%$ .

237 Определить тепло, идущее на перегрев пара в пароперегревателе котла, если до поступления в него пар имеет давление  $60 \text{ бар}$  и влажность  $0,5\%$ , а конечная температура пара  $500^\circ\text{C}$ . Найти также работу пара, связанную с увеличением его объема в процессе перегрева, протекающем при  $P=\text{const}$ .

Ответ:  $q=647,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $l=146000 \text{ кДж/кг}$ .

238 Определить часовое количество тепла, затрачиваемого на перегрев пара до  $480^{\circ}\text{C}$  в котлоагрегате, если давление пара 45 бар, а производительность агрегата 60 т/ч. На сколько процентов пойдет больше тепла на перегрев того же количества пара, если благодаря несовершенной системе сепарации в перегревателе будет поступать пар с 2%-ной влажностью?

Ответ:  $Q=35,85 \cdot 10^6$  кДж/ч; перерасход тепла на 5,63%.

239 В промежуточный перегреватель поступает сухой насыщенный пар из турбины с  $P_1=12$  бар в количестве 60 т/ч и перегревается до  $400^{\circ}\text{C}$ . Определить часовое количество тепла, затрачиваемое на перегрев пара.

Ответ:  $Q=28,7 \cdot 10^6$  кДж/ч.

240 На сколько градусов снизится перегрев пара, если при одном и том же подводе тепла  $21 \cdot 10^6$  кДж/ч и производительности перегревателя 30 т/ч в него будет вместо сухого насыщенного пара поступать влажный пар с 1,5%-ной влажностью? Давление пара  $P=60$  бар.

Ответ: на  $10,7^{\circ}\text{C}$ .

241 В цилиндре, закрытом поршнем, находится перегретый пар с начальным давлением  $P_1=23$  бар и температурой  $300^{\circ}\text{C}$ , причем поршень отстоит от дна цилиндра на 1000 мм. Под действием груза, лежащего на поршне, пар сжимается и поршень проходит путь, равный 400 мм. Определить работу, затраченную на сжатие, и количество отведенного тепла.

Ответ:  $L = 64000$  кДж;  $Q=4365$  кДж.

242 Начальное давление пара 12 бар, влажность 20%. Пар в результате подогрева превращается в перегретый с температурой  $250^{\circ}\text{C}$  первый раз при  $v = \text{const}$ , а второй раз при  $P=\text{const}$ . Какая теплота больше и во сколько раз? Каков должен быть по величине и зна-

ку теплообмен с внешней средой, чтобы из конечного состояния, полученного в процессе  $v=\text{const}$ , достигнуть конечное состояние в процессе  $P=\text{const}$  при условии  $t=\text{const}$ .

Ответ: при  $P=\text{const}$  больше в 1,18 раз, теплообмен положительный,  $q=104,6$  кДж/кг.

243 Сухой насыщенный пар с  $P_1=40$  бар расширяется при  $t=\text{const}$  до  $P_2=10$  бар. Какова совершенная паром работа?

Ответ:  $l=338$  кДж/кг.

244 1 кг влажного пара с давлением 30 бар и 10%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до  $P_2=2$  бар. Определить работу процесса.

Ответ:  $l=777$  кДж/кг.

245 Каково значение удельного объема в конце изотермического процесса расширения сухого насыщенного пара с  $P_1=25$  бар, если за время процесса к пару подводится 629 кДж/кг тепла? Как велика ошибка в определении конечного удельного объема, если пар принять за идеальный газ?

Ответ:  $v_2=0,96275$  м<sup>3</sup>/кг; ошибка 49,8%.

246 В начальном состоянии перегретый пар имеет давление 60 бар и температуру 400°C. Какова будет влажность этого пара в конце обратимого адиабатного расширения, если конечное давление 3 бар?

Ответ: влажность  $(1-x)=8,3\%$ .

247 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 10%-ной влажностью сжимается по адиабате до  $P_2=50$  бар. Каковы состояние и основные параметры пара в конце сжатия?

Ответ: пар перегрет;  $t_2=322,6^\circ\text{C}$ ;

$s_2=6,35$  кДж/(кг·К);  $v_2=0,04954$  м<sup>3</sup>/кг.

248 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 80%-ной влажностью сжимается адиабатно в идеальном паровом компрессоре до  $P_1=250$  бар. Каковы состояние пара на выходе из компрессора и работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг пара?

Ответ: в конце сжатия – некипящая вода с  $t_2=261,54^\circ\text{C}$ ;  $l=82150$  кДж/кг.

249 Идет обратимый адиабатный процесс в области перегретого пара от начального давления  $P_1=20$  бар при  $t_1=500^\circ\text{C}$  до конечного давления  $P_2_{\text{абс}}=3$  бар. Найти показатель адиабаты указанного процесса, считая его неизменным по всей длине процесса.

Ответ:  $k=1,29$ .

250 Процесс происходит при неизменной 20%-ной влажности от начального давления 1 бар до конечного 20 бар. Найти по величине и знаку тепло, изменение внутренней энергии и работу процесса.

Ответ:  $q = - 250,1$  кДж/кг;  $\Delta u = 173,5$  кДж/кг;

$l = - 424000$  кДж/кг.

251 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и  $x_1=0,85$  дросселируется до 5 бар, после чего направляется на производство. Найти состояние, удельный объем, степень сухости и температуру пара после дросселирования.

Ответ: пар влажный;  $v_2=0,344$  м<sup>3</sup>/кг;  $x_2=0,9$ ;  
 $t=151,11^\circ\text{C}$ .

252 Влажный пар с  $P_1=50$  бар и  $x=0,98$  дросселируется до давления 1 бар. Найти состояние пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-эффект положителен,  $\Delta t = - 118,1^\circ\text{C}$ .

253 Перегретый пар с  $P_1=100$  бар и  $t_1=350^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2=10$  бар. Найти конечную температуру и изменение внутренней энергии и энтропии пара в результате дросселирования.

Ответ:  $t_2=242,7^\circ\text{C}$ ;  $\Delta u = - 3.36$  кДж/кг;

$\Delta s=0,942$  кДж/(кг·К).

254 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и 5%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=1$  бар. Определить состояние пара после дросселирования, интегральный и средний дифференциальный дроссель-эффекты по величине и знаку и увеличение энтропии пара.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-

эффект положительный:  $\Delta t = - 114,86^\circ\text{C}$ ;

$\epsilon=3,95 > 0$ ;  $\Delta s=1,71$  кДж/(кг·К).

255 Идеальный одноступенчатый компрессор сжимает перегретый пар с  $P_1=2$  бар,  $t_1=150^\circ\text{C}$  до  $P_2=30$  бар. Определить работу, затраченную на компрессор, если сжатие производится по адиабате и сжимается 5 кг пара.

Ответ:  $L = 362000$  кДж.

256 Барабан котла имеет внутренний диаметр 1500 мм и длину 10 м. Какова аккумулирующая способность котла, если при неизменном давлении и прекращении питания уровень воды в нем может быть понижен на 200 мм (100 мм вверх и 100 мм вниз от центра барабана)? Давление в котле 60 бар, температура питательной воды  $150^\circ\text{C}$ . Каково увеличение часовой производительности котла, если указанное понижение уровня происходит в течение 1 мин?

Ответ:  $\Delta G=36300$  кг/ч.

257 Для влажного пара с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью найти удельный объем, температуру, энтропию, энтальпию и внутреннюю энергию.

Ответ:  $v=0,081 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t=213^\circ\text{C}$ ;  $h=2420 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $s=5,575 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $u=2265 \text{ кДж/кг}$ .

258 Сравнить значения энтропии и энтальпии сухого насыщенного пара давлением  $P=50$  бар по  $h$ - $s$ -диаграмме и по паровым таблицам.

Ответ: по диаграмме -  $h''=2800 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=5,97 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
по таблицам -  $h''=2795 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=5,980 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

259 Для перегретого пара давлением 50 бар и температурой перегрева  $400^\circ\text{C}$  найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию пара.

Ответ:  $v=0,059 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $u=2905 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $h=3190 \text{ кДж/кг}$ ;  $s=6,65 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

260 Пар имеет энтропию  $7,25 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Найти внутреннюю энергию пара, если его давление 10 бар. Каково состояние пара?

Ответ:  $u=2855 \text{ кДж/кг}$ ; пар перегрет.

261 При давлении 50 бар энтальпия пара равна  $3150 \text{ кДж/кг}$ . Определить температуру, энтропию и внутреннюю энергию пара.

Ответ:  $t=380^\circ\text{C}$ ;  $s=6,556 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
 $u=2865 \text{ кДж/кг}$ .

262 1 кг влажного пара с начальным давлением 10 бар и 80%-ным паросодержанием подсушивается до сухого насыщенного состояния при неизменном давлении и неизменном объеме. В каком из процессов затрачивается больше тепла на подсушку? Каково давление в конце процесса подсушки при неизменном объеме?

Ответ:  $q_p=402 \text{ кДж/кг}$ ;  $q_v=372,5 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $P_2=12,4$  бар.

263 Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе  $P=30 \text{ бар}=\text{const}$ , если в начале процесса пар имел



влажность 13%, а в конце стал перегретым и его температура повысилась до 400°C. Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный?

Ответ:  $q=660$  кДж/кг;  $l=117,6$  кДж/кг;  $\Delta u=541,5$  кДж/кг;  
для превращения пара в сухой насыщенный было  
затрачено 35,5% тепла.

264 Сколько надо затратить тепла, чтобы сухой насыщенный пар, занимающий объем 0,05 м<sup>3</sup>/кг, нагреть при постоянном объеме до 650°C. Во сколько раз при этом возрастет давление пара?

Ответ:  $q=753$  кДж/кг; в 2,07 раза.

265 Перегретый пар с начальным давлением 1 бар и температурой 250°C сжимается по изотерме и в конце процесса становится влажным с 15% влаги. Найти отводимое тепло, изменение внутренней энергии и работу, затрачиваемую на сжатие.

Ответ:  $q= - 1282$  кДж/кг;  $\Delta u= - 356$  кДж/кг;  
 $l = - 926$  кДж/кг.

266 Влажный пар с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до сухого насыщенного состояния. Найти теплообмен с окружающей средой и изменение внутренней энергии по величине и знаку.

Ответ:  $q=383$  кДж/кг;  $\Delta u=342$  кДж/кг.

267 Какова работа процесса, если происходит процесс адиабатного сжатия сухого насыщенного пара давлением 3 бар до конечного давления 50 бар? Определить конечную температуру пара.

Ответ:  $t_2=505^\circ\text{C}$ ;  $l= - 559$  кДж/кг.

268 Процесс протекает по верхней пограничной кривой от  $P_1=20$  бар до  $P_2=1,5$  бар. Определить значение средней теплоемкости

процесса по величине и знаку? Изменится ли знак теплоемкости, если процесс будет протекать в противоположном направлении?

Ответ:  $C_p = - 3,73 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; от перемены направления знак не меняется.

269 Перегретый пар с  $P_1=20$  бар и  $t_1=400^\circ\text{C}$  сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается до температуры  $115^\circ\text{C}$  при неизменном объеме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса.

Ответ:  $q = - 267 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $l=418,6 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

270 При изотермном сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего в начале  $P_1=3$  бар и  $t_1=300^\circ\text{C}$ , отводится 419 кДж тепла. Каково давление в конце сжатия и на сколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти также затраченную работу на сжатие пара.

Ответ:  $P_2 = 13,5$  бар;  $\Delta u = - 25,05 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  
 $l = - 396 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

271 Адиабатное расширение сухого (насыщенного) пара происходит от 10 до 0,5 бар. Найти средний показатель кривой процесса.

Ответ:  $k=1,135$ .

272 Влажный пар с давлением 30 бар и 15%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=3$  бар. Найти удельный объем пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ:  $v=0,56 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\Delta t=102^\circ\text{C}$ .

273 Котельная производит пар давлением 15 бар. Каков должен быть перегрев пара, если цех предприятия должен получить пар давлением  $P_2 = 2$  бар и температурой  $200^\circ\text{C}$ . Снижение давления с 15 до 2 бар происходит в редукционном клапане.

Ответ:  $t=227^\circ\text{C}$ .

274 Построить график изменения термического КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина) для начальных давлений пара  $P=20, 40, 60, 80$  и  $100$  бар и начальной температуры пара  $400^\circ\text{C}$ , если вакуум в конденсаторе во всех случаях равен  $96\%$  при барометрическом давлении  $735,6$  мм рт. ст. Найти влажность пара в конце расширения для всех указанных начальных давлений.

Ответ:  $P_i = 100; 80; 60; 40; 20$  бар;

$\eta_{t1} = 0,41; 0,407; 0,395; 0,381; 0,352;$

$(1-x)_i = 29; 26,2; 24; 21,3; 16,8\%$ .

275 Как сказывается на экономичности теоретической паросиловой установки повышение температуры перегрева до  $300, 400, 500$  и  $600^\circ\text{C}$  при неизменном начальном давлении  $30$  бар и вакууме в конденсаторе  $95\%$  при барометрическом давлении  $760$  мм рт. ст.

Ответ:  $\eta_{t1} = 0,347; 0,362; 0,374; 0,392$ .

276 Сравнить удельные расходы пара двух турбин одинаковых начальных параметров:  $P_1=130$  бар,  $t_1=565^\circ\text{C}$  при одинаковых давлениях в конденсаторе  $P_2=0,035$  бар, если одна из них имеет промежуточный перегрев при  $P_n=30$  бар до начальной температуры, считая процессы расширения адиабатными.

Ответ:  $G_1=2,36$  кг/(кВт·ч);  $G_2=1,955$  кг/(кВт·ч).

277 Параметры острого пара турбин  $P_1=29$  бар,  $t_1=230^\circ\text{C}$  (сухой насыщенный пар). Определить изменение термического КПД, если давление в конденсаторе изменилось от  $0,04$  до  $0,06$  бар. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина.

Ответ:  $\eta_t=34,8$  и  $33,7\%$ .

## 1.11 Влажный воздух

При давлениях, близких к атмосферному, парциальное давление водяного пара в воздухе обычно невелико, поэтому для влажного воздуха (как для смеси) можно применять формулы, справедливые для идеальных газов, а именно, уравнение состояния идеальных газов (15) – (17) а также уравнение закона Дальтона – уравнение (31).

Основные характеристики влажного воздуха: абсолютная и относительная влажность, влагосодержание.

**Абсолютная влажность** - количество водяного пара в  $1\text{ м}^3$  влажного воздуха, численно равное плотности пара ( $\rho_p$ ) при его парциальном давлении ( $P_p$ ). Согласно закону Дальтона общее давление влажного воздуха состоит из парциального давления водяного пара ( $P_p$ ) и парциального давления сухого воздуха ( $P_B$ ).

**Относительная влажность** ( $\varphi$ ) - отношение действительной абсолютной влажности  $\rho_p$  к максимально возможной абсолютной влажности  $\rho_{p \max}$  при той же температуре:

$$\varphi = \rho_p / \rho_{p \max}. \quad (171)$$

При определении  $\rho_{p \max}$  различают два случая:

1) Температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для влажного воздуха. В этом случае  $\rho_{\max} = \rho_n$ , т. е. плотности насыщенного пара при данной температуре и находится по таблицам насыщенного водяного пара.

2) Температура влажного воздуха, а следовательно, и находящегося в нем водяного пара, больше температуры насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для влажного воздуха,

тогда  $\rho_{п \max}$  равен плотности перегретого водяного пара и определяется по таблицам перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть определена по уравнению

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{н}}, \quad (172)$$

где  $P_{п}$  — парциальное давление водяного пара;

$P_{н}$  — давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха. Для данной температуры воздуха значение  $P_{н}$  берется из таблицы насыщенного пара (приложение Д).

**Влагосодержание** воздуха - отношение массы водяного пара ( $m_{п}$ ), содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха ( $m_{в}$ ):

$$d = \frac{G_{п}}{G_{в}} = \frac{\rho_{п}}{\rho_{в}}. \quad (173)$$

Единицы измерения влагосодержания – килограмм на килограмм или грамм на килограмм. Влагосодержание можно рассчитать: в кг/кг - по уравнению

$$d = \frac{0,622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (174)$$

в г/кг - по уравнению

$$d = \frac{622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (175)$$

где  $P_{п}$  - парциальное давление пара, Па;

$P$  - общее давление, Па.

Из уравнения (175) следует, что

$$P_{п} = P \frac{d}{622 + d}. \quad (176)$$

Если парциальное давление водяного пара  $P_{\text{п}}$  равно давлению насыщения  $P_{\text{н}}$  при данной температуре, то влагосодержание при насыщении

$$d_{\text{max}} = 0,622 \frac{P_{\text{н}}}{P - P_{\text{н}}}, \quad (177)$$

откуда

$$P_{\text{н}} = P \frac{d_{\text{max}}}{0,622 + d_{\text{max}}}, \quad (178)$$

где  $d_{\text{max}}$  — максимальное влагосодержание влажного воздуха, определяемое при данном давлении влажного воздуха.

Влагосодержание и относительная влажность связаны между собой следующим уравнением:

$$\varphi = \frac{d / (0,622 + d)}{P / P_{\text{max}}}, \quad (179)$$

где  $P_{\text{max}}$  - максимально возможное давление водяного пара при данной температуре.

**Степенью насыщения** называется отношение влагосодержания к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха при данной температуре и давлении:

$$\psi = \frac{d}{d_{\text{max}}}. \quad (180)$$

Между  $\psi$  и  $\varphi$  существуют следующие соотношения:

$$\psi = \varphi \frac{0,622 + d}{0,622 + d_{\text{max}}} \quad \text{и} \quad \psi = \varphi \frac{P - P_{\text{н}}}{P - P_{\text{п}}}. \quad (181)$$

Для невысоких температур, когда  $P_{\text{н}}$  довольно мало по сравнению с общим давлением  $P$ , можно полагать, что  $\psi = \varphi$ .

Температура ( $t_p$ ), до которой нужно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным (т.е.  $\Phi = 100\%$ ), называется **температурой точки росы**. При охлаждении ниже данной температуры происходит конденсация водяного пара.

Плотность влажного воздуха,  $\text{кг/м}^3$ , определяют по формуле

$$\rho = \frac{P}{287 T} - 0,0129 \frac{\Phi P_H}{T}, \quad (182)$$

где  $P$  и  $P_H$  – давление воздуха, Па;

$T$  – температура воздуха, К.

Энтальпия влажного воздуха равна сумме энтальпий 1 кг сухого воздуха и энтальпии  $d$  кг пара:

$$h = h_B + h_{II} d, \quad (183)$$

где  $d$  выражено в  $\text{кг/кг}$ , а  $h$ ,  $h_B$ ,  $h_{II}$  – в  $\text{кДж/кг}$ .

Энтальпия водяного пара  $h_B$ , содержащегося во влажном воздухе,  $\text{ккал/кг}$ , определяется по формуле

$$h_{II} = 597 + 0,46 t. \quad (184)$$

Тогда энтальпия влажного воздуха,  $\text{ккал/кг}$  сухого воздуха,

$$h = 0,24 t + d (597 + 0,46 t). \quad (185)$$

Энтальпию влажного воздуха обычно относят к 1 кг сухого воздуха, т.е. к  $(1+d)$  кг влажного воздуха.

Если смешиваются два потока воздуха ( $G_1$  и  $G_2$ ) и заданы их влагосодержания и энтальпии  $d_1$ ,  $h_1$  и  $d_2$ ,  $h_2$ , то после смешения

$$d_{\text{см}} = \frac{d_1 + a d_2}{1 + a}, \quad h_{\text{см}} = \frac{h_1 + a h_2}{1 + a}, \quad (186)$$

где  $a = G_2/G_1$ .

Для решения задач, связанных с изменением состояния влажного воздуха, применяют  $h$ - $d$ -диаграмму (приложение Ж).

В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание  $d$ , а по оси ординат - энтальпия влажного воздуха  $h$ . Для лучшего использования диаграммы координатные оси в ней проведены под углом  $135^\circ$ . Диаграмма построена для барометрического давления воздуха 745 мм рт. ст. В прилагаемой диаграмме наклонная ось не показана, вместо нее из начала координат проведена горизонтальная прямая, на которой даны значения влагосодержания  $d$ .

Линии  $h=\text{const}$  идут параллельно наклонной оси абсцисс. Линии  $d=\text{const}$  располагаются вертикально, параллельно оси ординат. Изотермы сухого воздуха располагаются наклонно к оси абсцисс. Кривая насыщения  $\varphi=100\%$  делит площадь  $h$ - $d$ -диаграммы на две области. Область диаграммы, лежащая над линией насыщения, соответствует состоянию ненасыщенного влажного воздуха при разных значениях  $\varphi$ . Область диаграммы, лежащая под линией насыщения, соответствует состоянию воздуха, насыщенного водяным паром.

В нижней части  $h$ - $d$ -диаграммы приводится кривая парциальных давлений водяного пара  $p_n = f(d)$ . Справа по оси ординат отложены значения  $P_n$  в миллиметрах ртутного столба.

Имея два любых параметра, по  $h$ - $d$ -диаграмме легко найти все параметры, характеризующие состояние влажного воздуха. Например, зная  $\varphi$  и  $t$ , быстро находят величины  $h$ ,  $d$  и  $P_n$ .

Точку росы также легко определить по  $h$ - $d$ -диаграмме. Для этого необходимо из точки, которая характеризует заданное состояние воздуха, провести вертикальную прямую до пересечения с линией насыщения. Тогда изотерма, проходящая через точку, лежащую на линии насыщения, даст температуру точки росы.



Основные процессы с влажным воздухом также удобно рассчитывать по  $hd$ -диаграмме. Так, процесс нагревания или охлаждения влажного воздуха изображается в  $hd$ -диаграмме как процесс, идущий при  $d=\text{const}$ . Процесс сушки изображается как процесс, протекающий при  $h=\text{const}$ .

### Примеры решения задач

77 Через воздухоохладитель пропускается  $100000 \text{ м}^3$  воздуха в 1 ч при абсолютном давлении  $P=740 \text{ мм рт. ст.}$ , температуре  $t=4^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi =80\%$ , при этом воздух охлаждается до  $0^\circ\text{C}$ . Определить количество отведенного тепла и количество влаги, выпадающей на поверхности охладителя.

Решение:

Для определения парциального давления водяного пара, находящегося в воздухе, по таблицам водяного насыщенного пара (приложение Д) находим давление насыщенного водяного пара при температуре смеси  $t = 4^\circ\text{C}$  –  $P_{\text{н.}}=6,1 \text{ мм рт. ст.}$  Тогда

$$P_{\text{в.}} = \varphi P_{\text{н.}} = 0,8 \cdot 6,1 = 4,88 \text{ мм рт. ст.,}$$

Влагосодержание влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (174)

$$d_1 = 0,622 \frac{4,88}{740 - 4,88} = \frac{0,622 \cdot 4,88}{735,12} = 0,00414 \text{ кг/кг.}$$

Энтальпию влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (185)

$$h_1 = 0,24 \cdot 4 + 0,00414 \cdot (597 + 0,46 \cdot 4) = 3,43 \text{ ккал/кг} = 14,35 \text{ кДж/кг.}$$

Определим парциальное давление водяного пара во влажном воздухе на выходе из охладителя при  $0^\circ\text{C}$ . Из таблицы (приложение

Д) находим, что при  $t = 0^\circ\text{C}$   $P_n = 4,6$  мм рт. ст. Тогда влагосодержание влажного воздуха на выходе из охладителя при  $t_2 = 0^\circ\text{C}$

$$d_1 = 0,622 \cdot \frac{3,68}{740 - 3,68} = 0,00311 \text{ кг/кг.}$$

Изменение влагосодержания 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 0,00414 - 0,00311 = 0,00103 \text{ кг/кг.}$$

Количество сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, определяем из уравнения (15):

$$G = \frac{P V}{R T} = \frac{(740 - 4,88) \cdot 133,3 \cdot 100000}{287 \cdot 277} = 123000 \text{ кг/ч} = 32,4 \text{ кг/с.}$$

Энтальпию влажного воздуха на выходе из охладителя при температуре  $0^\circ\text{C}$  определяем по уравнению (185):

$$h_2 = 0,24 \cdot 0 + 0,00311 \cdot (597 + 0,46 \cdot 0) = 1,86 \text{ ккал/кг} = 7,8 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 3,43 - 1,86 = 1,57 \text{ ккал/кг} = 6,55 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от всего воздуха, проходящего через охладитель в 1 ч,

$$Q = G (h_1 - h_2) = 32,4 \cdot 6,55 = 224 \text{ кДж/с.}$$

Количество влаги, выпавшей на поверхности охладителя,

$$G_w = \Delta d G = 0,00103 \cdot 123000 = 126 \text{ кг/ч.}$$

78 По техническим условиям производства в одном из цехов завода необходимо поддерживать следующие параметры воздуха: температуру  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  и относительную влажность  $\varphi_2 = 80\%$ . Для этой цели в цех непрерывно поступает свежий атмосферный воздух при

температуре  $t_1 = 18^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi_1 = 30\%$ . Барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 752$  мм рт. ст.

Определить: 1) количество добавляемой влаги на 1 кг поступающего воздуха ( $\Delta d$ ); 2) температуру  $t_3$ , до которой необходимо подогреть свежий воздух, если это увлажнение производить водой при температуре воды  $t_w = 12^\circ\text{C}$ ; 3) параметры водяного пара, если требуемое влагосодержание свежего воздуха поддерживать путем вдувания пара, не применяя в этом случае подогрева свежего воздуха.

Решение:

Влагосодержание поступающего свежего воздуха

$$d_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_{n1}}{P - \varphi_1 P_{n1}} = 0,622 \cdot \frac{0,3 \cdot 15,48}{752 - 0,3 \cdot 15,48} = 0,00386 \text{ кг/кг},$$

где  $P_{n1} = 15,48$  мм рт. ст., определяется при  $18^\circ\text{C}$  по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Влагосодержание при  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  и  $\varphi_2 = 80\%$

$$d_2 = 0,622 \frac{0,8 \cdot 19,83}{752 - 0,8 \cdot 19,83} = 0,01345 \text{ кг/кг},$$

где  $P_{n2} = 19,83$  мм рт. ст., определяется при  $22^\circ\text{C}$  по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Для определения температуры  $t_3$  найдем количество тепла, которое необходимо затратить при подогреве воздуха и воды, по уравнению

$$\begin{aligned} Q &= C_{pв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{pп} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = \\ &= 0,24 \cdot (22 - 18) + 0,00959 \cdot (597 - 12) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18) = \\ &= 6,65 \text{ ккал/кг} = 27,8 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Тогда

$$t_3 = t_1 + \frac{Q}{C_{pв} + d_1 C_{пн}} = 18 + \frac{6,65}{0,24 + 0,00368 \cdot 0,46} = 45,5^\circ \text{C}.$$

Тепло влажного воздуха

$$Q = C_{pв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = 0.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} h_d &= 597 + \frac{1}{\Delta d} [C_{pв} (t_2 - t_1) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1)] = \\ &= 597 + \frac{1}{0,00959} [0,24 \cdot (22 - 18) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18)] = \\ &= 708 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

Зная энтальпию пара  $h_n = 708$  ккал/кг, по паровым таблицам или по  $h_s$ -диаграмме определяем, что это перегретый пар; его абсолютное давление  $P_{2п} = 5$  бар и температура  $t_2 = 250^\circ \text{C}$ .

79 В камере смешения смешивается  $G_1 = 10000$  кг воздуха, параметры которого  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_1 = 60\%$ , и  $G_2 = 30000$  кг воздуха, параметры которого  $t_2 = 50^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_2 = 50\%$ . Определить параметры воздуха после смешения.

Решение:

По  $h_d$ -диаграмме находим:

при  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_1 = 60\%$  -  $h_1 = 42$  кДж/кг;  $d_1 = 9$  г/кг сухого воздуха;

при  $t_2 = 50^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_2 = 50\%$  -  $h_2 = 160$  кДж/кг;  $d_2 = 42$  г/кг сухого воздуха.

По условиям задачи

$$a = \frac{G_2}{G_1} = \frac{30000}{10000} = 3.$$

Влагосодержание смеси по формуле (186)

$$d_{\text{см}} = \frac{9 + 3 \cdot 42}{1 + 3} = 33,8 \text{ г/кг},$$

энтальпия смеси

$$h_{\text{см}} = \frac{10 + 3 \cdot 160}{1 + 3} = 130 \text{ кДж/кг}.$$

По полученным данным находим на  $h$ -диаграмме (приложение Ж) параметры:

$$t_{\text{см}} = 42,5^\circ \text{C}; \quad \varphi = 60 \%$$

80 Состояние влажного воздуха характеризуется следующими параметрами: температура  $30^\circ\text{C}$  и относительная влажность 40%. Определить энтальпию влажного и сухого воздуха, а также энтальпию влаги, содержащейся в воздухе. Задачу решить, применяя  $h$ -диаграмму.

Решение:

По  $h$ -диаграмме (приложение Ж) находим точку пересечения изотермы  $t=30^\circ\text{C}$  и линии  $\varphi=40\%$ . Эта точка даст нам энтальпию 1 кг влажного воздуха  $h=56,5$  кДж/кг.

Энтальпия сухого воздуха

$$h_{\text{в}} = 0,24 t = 0,24 \cdot 30 = 7,2 \text{ ккал/кг} = 30,2 \text{ кДж/кг}.$$

Отсюда

$$h_{\text{воды}} = 56,5 - 30,2 = 26,3 \text{ кДж/кг}.$$

### Задачи

278 Относительная влажность воздуха, определенная по психрометру, составляет 40%, температура воздуха  $t=25^\circ\text{C}$ , барометри-

ческое давление 750 мм рт. ст. Определить влагосодержание воздуха и температуру точки росы.

Ответ:  $d = 0,00797$  кг/кг;  $t_p = 10,5^\circ\text{C}$ .

279 Установка для кондиционирования воздуха имеет камеру смешения. В эту камеру поступает воздух из цеха завода в количестве  $V_{ц}=6000\text{м}^3/\text{ч}$  с температурой  $t_{ц} = 20^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi_{ц}=40\%$  и свежий наружный воздух в количестве  $V_{с}=14000\text{м}^3/\text{ч}$  с температурой  $t_{с} = 5^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi_{с}=70\%$ . Полагая процесс смешения воздуха в камере адиабатным, определить: 1) влагосодержание  $d$ , 2) энтальпию  $h$ , 3) температуру  $t$  и 4) относительную влажность  $\varphi$  воздуха на выходе камеры смешения. Барометрическое давление равно 750 мм. рт. ст.

Ответ:  $d=0,0044$  кг/кг;  $h =20,4$  кДж/кг;  
 $t=9,32^\circ\text{C}$ ;  $\varphi=60\%$ .

280 Состояние атмосферного воздуха определяется следующими параметрами: барометрическое давление 750 мм рт. ст., температура  $15^\circ\text{C}$ , парциальное давление водяного пара по психрометру 9,5 мм рт. ст. Определить: относительную влажность, абсолютную влажность, плотность сухого воздуха, плотность пара, плотность смеси пара и воздуха, точку росы, газовую постоянную влажного воздуха, влагосодержание воздуха, энтальпию воздуха.

Ответ:  $\varphi=0,746$ ;  $\rho_{п}=9,9$  г/м<sup>3</sup>;  $\rho_{в}=1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 9,9$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho =1,2099$  кг/м<sup>3</sup>;  $t_p=10,5^\circ\text{C}$ ;  $R=289,4$  Дж/(кг·К);  
 $d = 0,00798$  кг/кг;  $h=35,1$  кДж/кг.

281 Температура влажного воздуха  $t = 25^\circ\text{C}$ , а температура точки росы  $t_p = 20^\circ\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха, энтальпию, абсолютную влажность воздуха, влагосодержание, парци-

альное давление водяного пара. При решении задачи использовать  $h_d$ -диаграмму.

Ответ:  $\varphi = 75\%$ ;  $h = 62,8$  кДж/кг;

$\rho_n = 17,25$  г/м<sup>3</sup>;  $d=15$  г/кг;  $P_n = 18$  мм рт. ст.

282 Показания сухого и мокрого термометров:  $t_c=65^\circ\text{C}$  и  $t_m=50^\circ\text{C}$ . Определить состояние этого воздуха и его параметры. При решении использовать  $h_d$ -диаграмму.

Ответ:  $\varphi = 53\%$ ;  $d = 81$  г/кг;  $h = 277$  кДж/кг;

$P_n = 85$  мм рт. ст.;  $t_p = 47,5^\circ\text{C}$ .

283 Воздух при начальной температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi_1 = 80\%$  подвергается охлаждению до температуры  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, которое надо отвести от воздуха на 1 кг выпавшей влаги. При решении использовать  $h_d$ -диаграмму.

Ответ:  $q = 4550$  кДж/кг.

284 Состояние влажного воздуха задано следующими параметрами: температура  $25^\circ\text{C}$  и степень насыщения  $\psi = 0,7$ . При постоянном давлении  $755$  мм рт. ст. воздух подвергается охлаждению до конечной температуры  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Определить, сколько влаги выделится при охлаждении воздуха и сколько тепла необходимо отвести от 1 кг воздуха?

Ответ:  $6,5$  г/кг;  $q = - 31,4$  кДж/кг.

285 Определить количество силикагеля, служащего для поглощения паров воды из воздуха, которое необходимо загрузить в камеру сгорания, если объем камеры сгорания  $3$  м<sup>3</sup>. Консервация двигателя производилась при 60%-ной влажности и температуре окружающего воздуха  $30^\circ\text{C}$ .

Согласно техническим условиям двигатель должен храниться при 50%-ной влажности и температуре от - 20 до + 40° С. Поглощательная способность силикагеля 0,2 кг воды на 1 кг силикагеля.

Ответ:  $m = 0,263$  кг.

286 Газовый двигатель всасывает 500 м<sup>3</sup>/ч воздуха при температуре 25°С. Относительная влажность воздуха 0,4. Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

Ответ:  $G = 4,6$  кг/ч.

287 Наружный воздух, имеющий температуру 20°С и влагосодержание 6 г/кг, подогревается до температуры 45°С. Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ:  $\varphi_1 = 40\%$ ;  $\varphi_2 = 9,8\%$ .

288 Психрометр, установленный в сушильной камере, показывает температуру:  $t_c = 30^\circ\text{C}$  и  $t_m = 20^\circ\text{C}$ . Скорость движения воздуха 0,5 м/с. Определить состояние воздуха, если  $P_{\text{бар}} = 745$  мм рт. ст.

Ответ:  $\varphi = 40\%$ ;  $d = 11,5$  г/кг.



## 2 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Согласно 2-му закону термодинамики самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве возникает под действием разности температур и направлен в сторону уменьшения температуры. Закономерности переноса теплоты и количественные характеристики этого процесса являются предметом исследования теории теплообмена (теплопередачи). Теплопередача рассматривает процессы переноса теплоты в твердых, жидких и газообразных телах. Известно 3 способа переноса теплоты: теплопроводностью; конвекцией; излучением.

Часто перенос теплоты осуществляется одновременно различными способами – случай **сложного теплообмена**.

Сначала мы рассмотрим элементарные процессы теплообмена теплопроводностью, конвекцией и излучением, а затем - совместные процессы теплопередачи всеми видами теплообмена. Такое последовательное рассмотрение вопросов целесообразно и значительно упрощает изучение теории.

### 2.1 Теплопроводность

**Теплопроводность** – это процесс распространения теплоты между соприкасающимися телами или частями одного тела с различной температурой. Для осуществления теплопроводности необходимы два условия: контакт и разница температур.

Перенос теплоты теплопроводностью зависит от распределения температуры по объему тела. В общем виде температура зависит:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (187)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки;

$\tau$  – время.

Совокупность значений температуры во всех точках тела в данный момент времени называется **температурным полем**. Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется **изотермической**. Быстрее всего температура изменяется при движении в направлении, перпендикулярном изотермической поверхности. **Градиент температуры** – это векторная величина, направленная по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равная производной от температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} . \quad (188)$$

Количество теплоты ( $Q$ ), проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность ( $F$ ), называют **тепловым потоком**, обозначают  $Q^*$ , единицы измерения – ватт. Тепловой поток, приходящийся на  $1\text{ м}^2$  поверхности, называют удельным тепловым потоком (**плотностью теплового потока** или тепловой нагрузкой поверхности нагрева), обозначают  $q$ , единицы измерения – ватт на квадратный метр.

$$Q^* = \frac{Q}{\tau} \quad ; \quad q = \frac{Q}{\tau F} = \frac{Q^*}{\tau} . \quad (189)$$

Основной закон теплопроводности формулируется следующим образом: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры (закон Фурье):

$$q = - \lambda \text{ grad } t , \quad (190)$$

где  $\lambda$  - коэффициент пропорциональности, Вт/(м·К).

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называют **коэффициентом теплопроводности**. Он характеризует способность материала

проводить тепло. Значения коэффициентов приводятся в справочниках теплофизических свойств веществ (приложения К и Л). Величина коэффициента теплопроводности  $\lambda$  зависит от температуры, для большинства материалов эта зависимость линейная:

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + b t), \quad (191)$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_t$  – значение коэффициента теплопроводности соответственно при 0°С и при данной температуре  $t$ , Вт/(м·К);

$b$  – константа, определяемая экспериментально.

Зависимость изменения температуры тела от свойств тела и координат точки описывает **дифференциальное уравнение Фурье**:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (192)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\rho$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$c$ - теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Процесс теплоотдачи между поверхностью тела и окружающей средой описывается **уравнением Ньютона-Рихмана**:

$$q = \alpha (t_{cm} - t_j), \quad (193)$$

где  $q$  - плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{cm}$  – температура поверхности тела (стенки), К;

$t_j$  – температура окружающей среды (жидкости), К;

$\alpha$  - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Коэффициент теплоотдачи** характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он численно равен количеству теплоты, отдаваемой (или воспринимаемой) единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1 градус.

Различают **2 режима** распространения тепла в теле: установившийся (стационарный) режим – температурное поле тела не изменяется во времени и не установившийся (нестационарный) режим – температурное поле изменяется во времени.

Рассмотрим **частные случаи решения** дифференциального уравнения Фурье (192).

Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 1-го рода:

$$Q^* = \frac{\lambda}{\delta} F (t'_{ст} - t''_{ст}), \quad (194)$$

где  $\delta$  - толщина стенки, м;

$t'_{ст}$  и  $t''_{ст}$  – внутренняя и наружная температура поверхности стенки, град;

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Отношение  $\lambda/\delta$  называют тепловой проводимостью стенки, а обратную величину  $\delta/\lambda$  - тепловым или **внутренним термическим сопротивлением** стенки и обозначают  $R_{\lambda}$ .

Для любого числа слоев  $n$  формула (194) имеет вид

$$Q^* = \frac{F (t'_{ст} - t''_{ст})}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (195)$$

Величину  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  называют полным внутренним термическим сопротивлением многослойной стенки.

Теплопроводность через цилиндрическую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 1-го рода

$$Q^* = \frac{2\pi \lambda L (t_{ct}' - t_{ct}'')}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (196)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;

$L$  – длина трубы, м.

Для многослойной цилиндрической стенки уравнение для определения теплового потока будет иметь следующий вид:

$$Q^* = \frac{2\pi L (t_{ct}' - t_{ct}'')}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}. \quad (197)$$

Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 3-го рода

$$Q^* = \frac{F (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (198)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей, К.

**Коэффициент теплопередачи**  $k$  показывает количество теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю при разности температур между ними в 1 градус, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Уравнение для теплового потока (198) через произвольную плоскую стенку называют уравнением теплопередачи -

$$Q^* = F k (t_1 - t_2), \quad (199)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи произвольной плоской стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (200)$$

Теплопроводность через цилиндрическую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 3-го рода

$$Q^* = \frac{\pi L (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (201)$$

Коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки или **линейный коэффициент теплопередачи**, Вт/(м·К),

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}.$$

В общем случае для многослойной цилиндрической стенки, имеющей  $n$  слоев,

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (202)$$

Уравнение для теплового потока -

$$Q^* = k_u \pi L (t_1 - t_2). \quad (203)$$

Величину, обратную линейному коэффициенту теплопередачи, называют **общим тепловым сопротивлением** цилиндрической стенки:

$$R_u = \frac{1}{k_u} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}.$$

Критический диаметр изоляции можно определить из уравнения

$$d_{кр} = d_{из} = \frac{2 \lambda_{из}}{\alpha_2}, \quad (204)$$

где  $\lambda_{кр}$  - коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К);

$\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d_{из}$  - наружный диаметр слоя изоляции, м.

Более точное выражение уравнения теплопередачи (199) имеет вид

$$Q^* = F k \Delta t_{CP}, \quad (205)$$

где  $\Delta t_{CP}$  - средняя разность температур между двумя теплоносителями или средний температурный напор, К.

Средний температурный напор определяется следующим образом:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (206)$$

где  $\Delta t_B$  и  $\Delta t_M$  - большая и меньшая разности температур на концах поверхности теплообмена.

Если отношение большей разности температур к меньшей не превышает двух, то с достаточной точностью вместо уравнения (206) можно применять приближенное уравнение

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2}.$$

Формулы (206) и (207) применяются при условии, что в теплообменнике значение коэффициента теплопередачи и произведение

массового расхода на теплоемкость для каждого теплоносителя можно считать постоянной по всей поверхности теплообмена.

При расчете теплообменного оборудования наряду с уравнением теплопередачи (205) используется уравнение теплового баланса:

$$G_1 C_1 \Delta t_1 = G_2 C_2 \Delta t_2 , \quad (207)$$

где  $G_1, G_2$  – массовый расход теплоносителей, кг/с;

$C_1, C_2$  – теплоемкость теплоносителей, Дж/(кг·К);

$\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  - перепад температуры теплоносителей, К.

Расчет процесса теплопроводности при нестационарном режиме мы не рассматриваем. Методики расчета приведены в специальной литературе [2, 3].

### Примеры решения задач

81 Определить толщину тепловой изоляции, выполненной из шлаковой ваты. Удельные потери теплоты через изоляционный слой составляют  $523 \text{ Вт/м}^2$ , температуры его поверхностей  $700$  и  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности шлаковой ваты

$$\lambda = 0,058 + 0,000145 t .$$

Решение:

Определим средний коэффициент теплопроводности шлаковой ваты:

$$\lambda_{\text{CP}} = 0,058 + 0,000145 \cdot \frac{700 + 40}{2} = 0,1102 \quad \text{Вт/(м} \cdot \text{К)} .$$

Из уравнения (194) определяем толщину слоя изоляции

$$\delta = \frac{\lambda_{\text{CP}} \Delta t}{q} = \frac{0,1102 \cdot (700 - 40)}{523} = 0,139 \text{ м} .$$



82 Определить тепловой поток, проходящий через единицу длины стенки камеры сгорания диаметром 180 мм, если толщина стенки 2,5 мм, коэффициент теплопроводности материала стенки 34,9 Вт/(м·К). Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равными соответственно 1200 и 600°С.

Решение:

Из условия задачи следует, что протекает процесс теплопроводности через цилиндрическую стенку, поэтому используем уравнение (196)

$$q_l = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,9 \cdot 1 \cdot (1200 - 600)}{\ln \frac{0,18 + 2 \cdot 0,0025}{0,18}} = 4,815 \cdot 10^6 \text{ Вт/м.}$$

83 Определить температуры на поверхностях соприкосновения слоев стенки камеры сгорания и на внешней поверхности, если диаметр камеры 190 мм, толщина защитного покрытия 1 мм и его коэффициент теплопроводности 1,15 Вт/(м·К), а толщина основной стенки 2 мм и ее коэффициент теплопроводности 372 Вт/(м·К). Тепловой поток, приходящийся на единицу длины, составляет 40750 Вт/м, температура на поверхности покрытия со стороны камеры 1200°С.

Решение:

Запишем уравнение для теплового потока через каждый слой двухслойной цилиндрической стенки (197):

$$Q^* = \frac{2 \pi L \lambda_{II} (t'_{CT} - t_{CII})}{\ln \frac{d + 2 \delta_{II}}{d}}; \quad Q^* = \frac{2 \pi L \lambda_{CT} (t_{CII} - t''_{CT})}{\ln \frac{d + 2 \delta_{II} + 2 \delta_{CT}}{d + 2 \delta_{II}}}$$

Выразим из полученных уравнений температуры на поверхности соприкосновения слоев стенки камеры сгорания и на внешней поверхности

$$t_{\text{сн}} = t'_{\text{ст}} - \frac{q_l}{2 \pi \lambda_{\text{п}}} \ln \frac{d + 2 \delta_{\text{п}}}{d} = 1200 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,15} \ln \frac{0,19 + 2 \cdot 0,001}{0,19} = 609^\circ \text{C}.$$

$$\begin{aligned} t''_{\text{ст}} &= t_{\text{сн}} - \frac{q_l}{2 \pi \lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d + 2 \delta_{\text{п}} + 2 \delta_{\text{ст}}}{d + 2 \delta_{\text{п}}} = \\ &= 609 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 372} \ln \frac{0,192 + 2 \cdot 0,002}{0,192} = 608,6^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

84 По неизолированному трубопроводу диаметром 170/185 мм, проложенному на открытом воздухе, протекает вода со средней температурой 95°C, температура окружающего воздуха – 18°C. Определить потери теплоты с 1 м трубопровода и температуры внутренней и внешней поверхностей этого трубопровода, если коэффициент теплопроводности материала трубы равен 58,15 Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи воды стенке трубы - 1395 Вт/(м²·К) и трубы окружающему воздуху - 14 Вт/(м²·К).

Решение:

Тепловой поток рассчитаем по уравнению (201)

$$Q^* = \frac{3,14 \cdot 1 \cdot [95 - (-18)]}{\frac{1}{1395 \cdot 0,17} + \frac{1}{2 \cdot 58,15} \ln \frac{185}{170} + \frac{1}{14 \cdot 0,185}} = 907 \text{ Вт}.$$

Температуры внутренней и внешней поверхностей трубопровода определим из уравнений для теплового потока для каждой стадии теплопередачи:

$$t'_{\text{ст}} = t_1 - \frac{Q^*}{\pi L \alpha_1 d_1} = 95 - \frac{907}{3,14 \cdot 1 \cdot 1395 \cdot 0,17} = 93,8^\circ \text{C},$$

$$t''_{\text{ст}} = t_2 + \frac{Q^*}{\pi L \alpha_2 d_2} = -18 - \frac{907}{3,14 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 0,185} = 93,5^\circ \text{C}.$$

85 Алюминиевый провод диаметром 3 мм покрыт резиновой изоляцией толщиной 1,2 мм. Определить допустимую силу тока для этого провода при условии, что температура на внешней стороне изоляции 45°С, а максимальная температура на внутренней стороне изоляции не должна превышать 65°С. Коэффициент теплопроводности резины 0,175 Вт/(м·К); электрическое сопротивление алюминиевого провода составляет 0,00397 Ом/м.

Решение:

По формуле (197) определяем тепловой поток, проходящий через 1 м изоляции:

$$q_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (65 - 45)}{\frac{1}{0,175} \cdot \ln \frac{3 + 2 \cdot 1,2}{3}} = 37,3 \text{ Вт/м.}$$

Из формулы  $Q = I^2 R$  находим допустимую силу тока:

$$I = \sqrt{\frac{37,3}{0,00397}} = 96,95 \text{ А.}$$

86 Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду необходимо изолировать паропровод диаметром 44/50 мм. Целесообразно ли применять в качестве изоляции асбест, имеющий коэффициент теплопроводности 0,14 Вт/(м·К), если коэффициент теплоотдачи с внешней стороны изоляции в окружающую среду составляет 11,63 Вт/(м<sup>2</sup>·К)?

Решение:

По формуле (204) определим критический диаметр изоляции

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot 0,14}{11,63} = 0,024 \text{ м.}$$

Условие целесообразности применения изоляции при заданном диаметре трубы и заданном коэффициенте теплоотдачи

$$A_{\text{кр}} = \frac{d_{\text{кр}}}{d_2} \leq 1$$

в нашем случае выполняется, т.к.  $A_{\text{кр}}=0,48 < 1$ .

87 Выяснить ошибку в определении поверхности нагрева газо-водяного противоточного подогревателя от применения средней арифметической разности температур вместо более точной средней логарифмической. Газы в подогревателе охлаждаются от 500 до 200 °С, вода нагревается от 20 до 80 °С.

Решить ту же задачу для прямоточного подогревателя при тех же значениях температур газов и воды.

Решение:

Для противоточного подогревателя

$$\overset{\text{ГАЗЫ}}{500^\circ\text{C}} \rightarrow \overset{\text{ГАЗЫ}}{200^\circ\text{C}};$$

$$\overset{\text{ВОДА}}{80^\circ\text{C}} \leftarrow \overset{\text{ВОДА}}{20^\circ\text{C}}.$$

Определим разности температур на концах поверхности теплообмена:

$$\Delta t_{\text{Б}} = 420^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{\text{М}} = 180^\circ\text{C}.$$

Тогда среднеарифметический температурный напор

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{420 + 180}{2} = 300^\circ\text{C}.$$

Среднелогарифмический температурный напор (206):

$$\Delta t'_{\text{CP}} = \frac{420 - 180}{\ln \frac{420}{180}} = 283^\circ\text{C}.$$

При расчете по приближенной формуле поверхность подогревателя будет занижена на

$$1 - \frac{F}{F'} = 1 - \frac{\Delta t'_{CP}}{\Delta t_{CP}} = 1 - \frac{283}{300} = 0,056;$$

т. е. на 5,6%.

Для прямоточного подогревателя

$$500^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{ГАЗЫ}} 200^{\circ}\text{C};$$

$$20^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{ВОДА}} 80^{\circ}\text{C}.$$

Определим разности температур на концах поверхности теплообмена:

$$\Delta t_{\text{Б}} = 480^{\circ}\text{C}; \quad \Delta t_{\text{М}} = 120^{\circ}\text{C}.$$

Тогда среднеарифметический температурный напор:

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{480 + 120}{2} = 300^{\circ}\text{C}.$$

Среднелогарифмический температурный напор (206):

$$\Delta t'_{\text{CP}} = \frac{480 - 120}{\ln \frac{480}{120}} = 260^{\circ}\text{C}.$$

При расчете по приближенной формуле поверхность подогревателя будет занижена на

$$1 - \frac{F}{F'} = 1 - \frac{\Delta t'_{\text{CP}}}{\Delta t_{\text{CP}}} = 1 - \frac{260}{300} = 0,133;$$

т. е. на 13,3%.

### Задачи

289 Определить количество тепла, теряемое трубой за час, если внутри трубы протекает газ, а снаружи труба омывается воздухом. Средняя температура газа 800 °С, воздуха - 15 °С. Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубы 35 Вт/(м<sup>2</sup>·К), от стенки к воздуху -

5,8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Каковы температуры внутренней и наружной поверхности трубы, а также слоя, расположенного в 40 мм от оси трубы? Влиянием торцов трубы пренебречь. Труба стальная с коэффициентом теплопроводности 46,5 Вт/(м·К).

Ответ:  $Q = 2860$  Вт;

температуры: 591 °С, 590 °С, 585 °С.

290 Определить часовую потерю тепла паропроводом длиной 50 м. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 80 мм. По паропроводу протекает насыщенный пар, давление которого 30 ат. Внутренний диаметр паропровода 100 мм, наружный 108 мм. Температура окружающего воздуха 35 °С. Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке 465 Вт/(м<sup>2</sup>·К), от слоя изоляции к воздуху - 5,8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопроводности стали 52 Вт/(м·К), изоляции - 0,058 Вт/(м·К). Определить также температуру наружного слоя изоляции. Лучеиспусканием трубопровода пренебречь.

Ответ:  $Q = 3680$  Вт;  $t = 50$  °С.

291 Стальная труба диаметром 100/110 мм покрыта слоем асфальтовой изоляции. Найти критическую толщину слоя асфальта и соответствующую максимальную отдачу тепла с 3 погонных метров трубы, если по трубе протекает вода, температура 80 °С, коэффициент теплоотдачи 2093 Вт/(м<sup>2</sup>·К), снаружи труба омывается воздухом, температура 15 °С, коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к воздуху 10,5 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопроводности стали 46,5 Вт/(м·К), асфальта - 0,66 Вт/(м·К).

Ответ:  $d_{кр} = 0,1265$  м;  $q_{max} = 710$  Вт.

292 Гладкая стальная труба воздухоподогревателя с внутренней стороны омывается дымовыми газами со средней температурой

320 °С, а снаружи - воздухом, причем он нагревается от 25 до 250 °С. Коэффициент теплопроводности стали 58 Вт/(м·К).

Определить: коэффициент теплопередачи, отнесенный к одному погонному и одному квадратному метру наружной поверхности трубы, и количество тепла, передаваемое трубой за 1 ч, если: наружный диаметр трубы 51 мм; внутренний диаметр трубы 48 мм; длина трубы 4 м; налет сажи внутри трубы  $\delta = 1$  мм, коэффициент теплопроводности стали 0,23 Вт/(м·К).

Ответ:  $k_T=0,232$  Вт/(м·К);  $k=9,15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q=1069$  Вт.

293 Как велики будут ошибки в определении теплового потока, передаваемого трубой, и температуры наружного слоя трубы в задаче 292, если расчет проводить по формулам для плоской стенки, определяя ее поверхность по среднему диаметру?

Ответ: ошибки при определении: температуры - 1,93%, тепла - 1,74%.

294 Определить удельный тепловой поток, проходящий через стенку рабочей лопатки газовой турбины, если средние температуры поверхностей лопатки соответственно равны 650 и 630 °С, толщина стенки лопатки 2,5 мм, коэффициент теплопроводности 23,85 Вт/(м·К).

Ответ:  $q=19070$  Вт/м<sup>2</sup>.

295 Определить тепловые потери на 1 м трубопровода, а также температуру внутренней и внешней поверхностей при условии, что трубопровод, рассматриваемый в примере 84, покрыт слоем изоляции толщиной 70 мм с коэффициентом теплопроводности 0,116 Вт/(м·К), а коэффициент теплоотдачи поверхности изоляции окружающей среде 9,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Ответ:  $q_1=162,5$  Вт/м;

$$t'_{\text{ст}}=94,3^{\circ}\text{C}; t''_{\text{ст}}= - 0,9^{\circ}\text{C}.$$

296 В трубчатом подогревателе требуется нагреть за 1 ч 1000 кг раствора с теплоемкостью 3,3 кДж/(кг·К). Нагрев ведется от 20 до 80° С конденсатом, поступающим в подогреватель, при температуре 120° С. Коэффициент теплопередачи равен 558 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Сравнить необходимые поверхности нагрева и найти часовой расход конденсата при устройстве подогревателя по прямоточной и противоточной схемам, считая, что тепловые потери отсутствуют. Конечная разность температур в подогревателе в обоих случаях должна быть 20° С.

Ответ: прямоточная схема:  $F = 2,01 \text{ м}^2$ ,  $G = 2400 \text{ кг/ч}$ ;

противоточная схема:  $F = 3,46 \text{ м}^2$ ,  $G=600 \text{ кг/ч}$ .

297 Во сколько раз увеличится термическое сопротивление стенки стального змеевика, свернутого из трубы диаметром 38 мм, толщиной 2,5 мм, если покрыть ее слоем эмали? Считать стенку плоской. Коэффициент теплопроводности эмали 1,05 Вт/(м·К).

Ответ: в 10 раз.

298 Паропровод длиной 40 м, диаметром 51 мм, толщиной 2,5 мм покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°С, внутренней – 175°С. Определить количество тепла, теряемое паропроводом в час. Коэффициент теплопроводности изоляции 0,116 Вт/(м·К).

Ответ:  $Q^* = 48,6 \text{ кВт}$ .

299 Горячий раствор с температурой 106°С используется для подогрева холодного разбавленного раствора от 15 до 50°С. Концентрированный раствор охлаждается до 60°С. Определить температурный напор для: а) прямоточной и б) противоточной схем.

Ответ: а)  $\Delta t_{\text{CP}} = 50,5^{\circ}\text{C}$ ; б)  $\Delta t_{\text{CP}} = 36,8^{\circ}\text{C}$ .



300 Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорный кирпич -  $\delta=500$  мм,  $\lambda=1,16$  Вт/(м·К) и строительный кирпич -  $\delta=250$  мм,  $\lambda=0,58$  Вт/(м·К). Температура внутри печи  $1300^{\circ}\text{C}$ , температура окружающего пространства  $25^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от печных газов к стенке  $34,8$  Вт/( $\text{м}^2\cdot\text{K}$ ), коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху  $16,2$  Вт/( $\text{м}^2\cdot\text{K}$ ). Определить потери тепла с  $1$   $\text{м}^2$  поверхности стенки и температуру на грани между огнеупорным и строительным кирпичом.

Ответ:  $q=1340$  Вт/ $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{сл}}=684^{\circ}\text{C}$ .

301 Определить толщину тепловой изоляции, выполненной из: 1) альфоля и 2) шлаковой ваты. Удельные потери теплоты через изоляционный слой  $523$  Вт/ $\text{м}^2$ , температуры его поверхностей  $700$  и  $40^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности альфоля при толщине воздушных слоев  $10$  мм

$$\lambda = 0,0302 + 0,000085 t$$

и коэффициент теплопроводности шлаковой ваты

$$\lambda = 0,058 + 0,000145 t .$$

Ответ:  $\delta = 0,139$  м.

302 Определить тепловой поток через стенки картера авиадвигателя, если толщина стенок  $5,5$  мм, поверхность  $0,6$   $\text{м}^2$ , температура на внутренней поверхности картера  $75^{\circ}\text{C}$ , на наружной –  $68^{\circ}\text{C}$ , а средний коэффициент теплопроводности стенок  $175$  Вт/(м·К).

Ответ:  $Q^* = 133300$  Вт.

## 2.2 Конвективный теплообмен

Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется **конвективным теплообменом**. Естественная конвекция вызывается разностью удельных весов неравномерно нагретой среды, осуществляется за счет действия сил тяжести. Вынужденная конвекция осуществляется за счет перемещения жидкости или газа механическими устройствами.

Количество перенесенного тепла рассчитывается по формуле

$$Q = \alpha F \Delta t \tau = \alpha F (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) \tau, \quad (208)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  - температурный напор, К;

$t_{\text{ж}}$  – средняя температура жидкости или газа, °С;

$t_{\text{ст}}$  - средняя температура стенки, °С;

$\tau$  - время, с.

Одной из основных задач конвективного теплообмена является определение в конкретных условиях коэффициента теплоотдачи. Аналитическое определение коэффициента теплоотдачи, как правило, невозможно, т.к. его величина зависит от многих переменных: параметров процесса, физических констант, геометрических размеров и граничных условий. Коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам, которые составляются в критериальной форме по правилам теории подобия. Два процесса конвективного теплообмена считаются подобными, если подобны все параметры, характеризующие конвективный теплообмен.

Для упрощения процесса установления подобия используют безразмерные комплексы физических параметров - числа или **крите-**

**рии подобия.** Чисел подобия много. Для конвективного теплообмена используют следующие пять чисел подобия.

**Число Рейнольдса** характеризует режим течения жидкости или газа и выражает отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкостного трения:

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{w} \mathbf{l}}{\mathbf{\nu}}, \quad (209)$$

где  $w$  - средняя скорость жидкости или газа, м/с;

$l$  - характерный размер, м;

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

При числах Рейнольдса, меньших 2000, режим считается ламинарным, при значениях числа, больших 10000, – режим движения турбулентный; при значениях числа от 2000 до 10000 – режим переходный.

**Число Прандтля** устанавливает соотношение между толщиной динамического и теплового пограничных слоёв:

$$\mathbf{Pr} = \frac{\mathbf{\nu}}{\mathbf{a}}, \quad (210)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

**Число Нуссельта** характеризует интенсивность конвективного теплообмена между жидкостью (газом) и поверхностью твёрдого тела:

$$\mathbf{Nu} = \frac{\mathbf{\alpha} \mathbf{l}}{\mathbf{\lambda}}, \quad (211)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$l$  – характерный размер, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа или жидкости, Вт/(м·К).

**Число Грасгофа** характеризует интенсивность свободного конвективного теплообмена:

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (212)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  - коэффициент объемного расширения: для жидкостей  $\beta$  приведены в справочниках (приложение Л), для газов -  $\beta = 1/T, 1/ \text{К}$ ;

$l$  – характерный размер, м;

$\Delta t$  – разница температур частиц жидкости (газа);

$\nu$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

**Число Эйлера** характеризует отношение перепада давления к скоростному напору:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}, \quad (213)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на участке канала, Па;

$\rho$  - плотность жидкости (газа),  $\text{кг/м}^3$ ;

$w$  - скорость жидкости (газа), м/с.

При проектировании теплообменных аппаратов необходимо определить два параметра: коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и перепад давления  $\Delta P$ . Они входят в числа Нуссельта и Эйлера, т.е. это определяемые числа подобия. Числа Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля являются определяющими. **Уравнения подобия** – зависимость между определяемым числом подобия и определяющими числами подобия. Таким образом, при моделировании основной целью является нахождение уравнений:

$$Nu = f_1(Re, Pr, Gr); \quad Eu = f_2(Re, Pr, Gr). \quad (214)$$

Общее **уравнение подобия** для конвективного теплообмена имеет вид

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{Pr}^m \text{Gr}^d \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (215)$$

где  $c$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $d$  – коэффициенты, которые определяются экспериментальными исследованиями.

В критериальных уравнениях множитель  $\left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}$  учитывает направление теплового потока отношением, при этом  $\text{Pr}$  – число Прандтля для жидкости (газа) при её температуре;  $\text{Pr}_{\text{CT}}$  – число Прандтля для жидкости (газа) при температуре стенки.

Физические параметры, входящие в формулы (209) – (213), должны быть взяты при определяющей температуре, которая указывается для каждого случая теплообмена, причем применяют следующие определяющие температуры:

$t_{\text{CT}}$  - средняя температура стенки;

$t_{\text{ж}}$  – средняя температура жидкости или газа;

$t_{\text{пл}}$  - средняя температура пограничного слоя (пленки), определяется, как среднее арифметическое между  $t_{\text{ж}}$  и  $t_{\text{CT}}$ .

Средняя температура жидкости (газа) приближенно может быть определена как среднее арифметическое между начальной и конечной температурой жидкости.

#### Теплообмен при течении теплоносителя в прямых трубах

При развитом **турбулентном режиме** ( $\text{Re} > 10000$ ) используют следующее уравнение:

$$\text{Nu} = 0,021 \varepsilon_1 \cdot \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (216)$$

где  $\varepsilon_1$  - поправочный коэффициент, учитывающий влияние отношения длины трубы  $L$  к ее диаметру  $d$  (табл. 2).

Таблица 2 - Поправочный коэффициент, учитывающий влияние отношения длины трубы L к ее диаметру d, при турбулентном режиме

Re	Отношение L/d				
	10	20	30	40	50 и более
10000	1,23	1,13	1,07	1,03	1
20000	1,18	1,10	1,05	1,02	1
50000	1,13	1,08	1,04	1,02	1
100000	1,10	1,06	1,03	1,02	1
100000	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Определяющей температурой является средняя температура жидкости или газа. Характерным размером l является: для круглой трубы – внутренний диаметр трубы d; для трубы произвольной формы – эквивалентный диаметр  $d_{\text{экв}}$ ,

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 F}{\Pi}; \quad (217)$$

F – площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – полный периметр сечения, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене, м.

Для газов формула (216) упрощается, т.к. в этом случае критерий Pr является практически постоянной величиной, не зависящей от температуры,  $Pr = 0,67 \dots 1,0$  (определяется количеством атомов в молекуле):

$$Nu = 0,018 \epsilon_1 Re^{0,8}. \quad (218)$$

При теплообмене в **изогнутых трубах** (змеевиках) вследствие центробежного эффекта в поперечном сечении трубы возникает вторичная циркуляция, наличие которой приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. Поэтому коэффициент теплоотдачи, полученный

по уравнениям (216) или (218), следует умножить на поправочный коэффициент  $\epsilon_{3M}$  :

$$\epsilon_{3M} = 1 + 3,54 \frac{d}{D}, \quad (219)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;

$D$  – диаметр спирали змеевика, м.

При **ламинарном режиме течения** теплоносителя ( $Re < 2000$ ) в прямых трубах используют следующее уравнение:

$$Nu = 0,15 \epsilon_1 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (220)$$

Поправочный коэффициент  $\epsilon_1$ , учитывающий влияние отношения длины трубы  $L$  к ее диаметру  $d$ , определяют по табл. 3.

Таблица 3 - Поправочный коэффициент для расчета теплообмена в трубах длиной менее 50 диаметров

L/d	1	4	5	10	15	20	30	40	50
$\epsilon_1$	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02	1

При расчете критерия  $Gr$  по формуле (220) величина  $\Delta t$  характеризует разность температур жидкости (газа) и стенки.

Если теплоносителем является газ, формула (220) упрощается:

$$Nu = 0,13 \epsilon_1 Re^{0,33} Gr^{0,1}. \quad (221)$$

При вертикальном расположении трубы вводится поправка 0,85 при совпадении свободного и вынужденного движений и поправка 1,15 - при противоположном направлении.

Если теплоносителем является жидкость с большим коэффициентом вязкости, то свободная конвекция не оказывает влияния на теплообмен. Уравнение подобия для вязкостного режима –

$$\text{Nu} = 0,15 \epsilon_1 \text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}. \quad (222)$$

Формула справедлива при отношении  $L/d > 50$ . Для труб, имеющих длину  $L < 50d$ , значение коэффициента теплоотдачи, полученное из данной формулы, следует умножить на поправочный коэффициент  $\epsilon_1$  (табл. 3).

Теплоотдача при **переходном режиме движения** ( $2000 < \text{Re} < 10000$ ) зависит от большого количества величин, трудно поддающихся учёту, и поэтому не может быть надёжно описана одним уравнением подобия. В этом случае используют комплекс  $K_o$ :

$$K_o = \text{Nu} \text{Pr}^{-0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{-0,25}. \quad (223)$$

Расчет рекомендуется производить по графику (рис. 16).

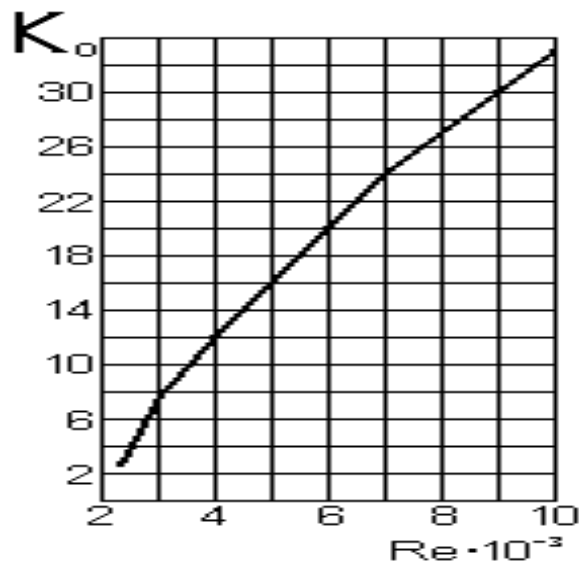


Рисунок 16 – Зависимость величины комплекса  $K_o$  от критерия Рейнольдса при переходном режиме



Теплоотдача при поперечном обтекании потоком одиночной гладкой трубы описывается следующими уравнениями:

при  $Re = 5 \dots 1000$  –

$$Nu = 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (224)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$Nu = 0,43 Re^{0,5}, \quad (225)$$

при  $Re = 1000 \dots 200000$  -

$$Nu = 0,25 Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (226)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$Nu = 0,216 Re^{0,6}, \quad (227)$$

В формулах (224) – (227) характерным размером является наружный диаметр трубы, определяющей температурой – средняя температура жидкости (газа).

Теплоотдача при поперечном обтекании потоком коридорного пучка труб для третьего и последующих рядов описывается следующим уравнением:

$$Nu = 0,23 \epsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (228)$$

При поперечном обтекании потоком шахматного пучка труб для третьего и последующих рядов уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,41 \epsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (229)$$

Значение коэффициента  $\epsilon_{\varphi}$ , учитывающего влияние угла атаки  $\varphi$ , (угол между направлением основного потока и радиусом, который соединяет точку на поверхности трубы с центром трубы) приведено в табл. 4.

Таблица 4 - Поправочный коэффициент  $\epsilon_{\varphi}$  для расчета теплообмена при поперечном обтекании пучка труб

$\varphi$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\epsilon_{\varphi}$	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Формулы (228) – (229) справедливы для любых жидкостей и газов при значениях  $Re = 200...200000$ .

Значение коэффициента теплоотдачи для труб первого ряда пучка находится путем умножения коэффициента теплоотдачи, полученного по уравнениям (228) – (229), на коэффициент  $k=0,6$ . Для труб второго ряда пучка при коридорном их расположении  $k=0,9$ ; а при шахматном расположении -  $k=0,7$ . Средняя величина коэффициента теплоотдачи определяется с учетом вклада каждого ряда труб, т.е. с учетом поверхности теплообмена. При достаточно большом числе рядов коэффициент теплоотдачи пучка труб равен коэффициенту теплоотдачи для третьего и последующих рядов - (228), (229).

При **вынужденном движении потока вдоль плоской стенки** коэффициент теплоотдачи определяют по следующим уравнениям:

при  $Re > 100000$  –

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (230)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$\text{Nu} = 0,032 \text{Re}^{0,8}, \quad (231)$$

при  $\text{Re} < 100000$  -

$$\text{Nu} = 0,76 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (232)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$\text{Nu} = 0,66 \text{Re}^{0,5}. \quad (233)$$

В формулах (230) – (233) характерным размером является размер теплоотдающей стенки по направлению движения потока, определяющей температурой – начальная температура потока. Если направление потока - под углом к поверхности стенки, вводится коэффициент  $\epsilon_{\phi}$ , учитывающий влияние угла атаки  $\Phi$  (табл. 4).

**Теплообмен при свободном движении** в неограниченном объеме может быть рассчитан двумя способами.

**1-й способ** не учитывает направление теплового потока. Уравнение подобия имеет следующий вид:

$$\text{Nu} = C (\text{Gr Pr})^n, \quad (234)$$

где  $C$ ,  $n$  – коэффициенты, зависящие от величины комплекса  $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$  (табл. 5).

Таблица 5 -Значения коэффициентов в уравнении (234)

Gr·Pr	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	$> 2 \cdot 10^7$
C	1,18	0,54	0,135
n	0,125	0,25	0,33

Физические константы, входящие в состав чисел подобия, определяют по средней температуре пленки  $t = 0,5 (t_{\text{ж}} + t_{\text{CT}})$ . В качестве

определяющего размера приняты: для горизонтальных труб и шаров - их диаметр, для плит, пластин, вертикальных труб – высота, для горизонтальных плит – размер меньшей стороны.

При значении  $(Gr \cdot Pr) < 1$  критерий Нуссельта практически остается неизменным и равным 0,5.

Для расчета теплообмена от горизонтальной плиты, обращенной греющей стороной вверх, значение коэффициента теплоотдачи увеличивают на 30%, если греющая сторона обращена вниз, то уменьшают на 30%.

Теплоотдача наклонных плит рассчитывается по той же формуле (234) с введением поправки  $(\cos \varphi)^{\pm 0,25}$ . За определяющий принимается размер стороны плиты, ориентированный под углом  $\varphi$  к нормали.

**2-й способ** учитывает направление теплового потока. Уравнение подобия имеет следующий вид:

$$Nu = C' (Gr Pr)^{n'} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (235)$$

где  $c'$ ,  $n'$  – коэффициенты, зависящие от величины комплекса  $Gr \cdot Pr$  и типа теплоотдающей поверхности.

Определяющей температурой является средняя температура окружающей среды.

При ламинарном движении около горизонтальных труб (при  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$ ) рекомендуется формула

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (236)$$

Характерным размером является диаметр трубы.

Для вертикальных поверхностей высотой  $h$  (трубы, пластины) формула (235) имеет вид:

при ламинарном режиме –  $10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$ ,

$$Nu = 0,76 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (236a)$$

при турбулентном режиме –  $(Gr \cdot Pr) > 10^9$ ,

$$Nu = 0,15 (Gr \cdot Pr)^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (236b)$$

Характерным размером в данном случае является высота.

Естественный теплообмен может происходить и в ограниченном объеме. В этом случае среднюю плотность теплового потока  $q$  между поверхностями, разделенными прослойкой газа или жидкости толщиной  $\delta$ , можно рассчитать, как в случае переноса тепла теплопроводностью через плоскую стенку [см. формулу (194)]:

$$q = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (237)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий конвективный перенос;

$t_1$  и  $t_2$  – большая и меньшая температуры ограждающих поверхностей.

При  $(Gr \cdot Pr) < 10^3$  естественную конвекцию можно не учитывать, считая  $\lambda_{\text{э}} = \lambda$ . При  $(Gr \cdot Pr) > 10^3$  эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле  $\lambda_{\text{э}} = \epsilon_K \lambda$ . Величину поправки на конвекцию  $\epsilon_K$  определяют в зависимости от величины  $(Gr \cdot Pr)$ :

$$\text{при } 10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^6 - \quad \epsilon_K = 0,105 (Gr \cdot Pr)^{0,3}; \quad (238)$$

$$\text{при } 10^6 < (Gr \cdot Pr) < 10^{10} - \quad \epsilon_K = 0,40 (Gr \cdot Pr)^{0,2}. \quad (239)$$

Приближенно вместо формул (238), (239) можно пользоваться зависимостью

$$\epsilon_K = 0,18 (Gr Pr)^{0,25}. \quad (240)$$

Определяющий размер при расчете числа Gr – толщина прослойки  $\delta$ , определяющая температура – средняя температура поверхностей.

Расчет процесса теплоотдачи с изменением агрегатного состояния более сложен, рекомендуемые методы расчета приведены в специальной литературе [1-3].

### Примеры решения задач

88 В вертикальной трубе квадратного сечения ( $a=50$  мм), высотой 6 м движется снизу вверх воздух. Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубы, если средняя скорость воздуха 1,0 м/с, температура воздуха на входе 190 °С, на выходе - 50 °С, средняя температура стенки 40 °С.

Решение:

Режим движения определяем по величине числа Рейнольдса – уравнение (209). Коэффициент кинематической вязкости воздуха находим при определяющей температуре, равной средней температуре воздуха (приложение К). Эквивалентный диаметр определяем по уравнению (217):

$$t_B = \frac{190 + 50}{2} = 120^\circ \text{C}; \quad \nu = 25,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 a^2}{4 a} = a = 0,05 \text{ м};$$

$$Re = \frac{1,0 \cdot 0,05}{25,45 \cdot 10^{-6}} = 1965.$$

Режим движения воздуха ламинарный. Для расчета выбираем формулу (221) - процесс теплообмена при ламинарном движении воздуха в трубе. При этом необходимо учесть поправку на относительную длину трубы и на вертикальное расположение трубы. Первая поправка (берется по табл. 3 при  $L/d=6/0,05=120$ ) равна 1. Вторая поправка равна 1,15, так как воздух движется снизу вверх и при этом охлаждается.

Критерий Грасгофа рассчитываем по уравнению (212):

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{120 + 273} \cdot 0,05^3 \cdot (120 - 40)}{(25,45 \cdot 10^{-6})^2} = 3,8 \cdot 10^5.$$

По формуле (221) для горизонтальной трубы рассчитаем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,13 \cdot 1 \cdot 1965^{0,33} \cdot (3,8 \cdot 10^5)^{0,1} = 5,74.$$

Коэффициент теплопроводности воздуха находим при определяющей температуре (приложение К). Тогда коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_3} = \frac{5,74 \cdot 3,338 \cdot 10^{-2}}{0,05} = 3,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для вертикальной трубы с учетом поправки

$$\alpha = 1,15 \cdot 3,87 = 4,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

89 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при течении воды в трубе диаметром 40 мм, длиной 3 м со скоростью 1 м/с, если средняя температура воды 80°C, а температура стенки 65°C.

Решение:

Определим режим течения воды в трубе.

Физические параметры воды при определяющей температуре, равной 80°C (приложение Л):

$$\lambda = 67,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \text{Pr} = 2,21.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки 65°C -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 2,74$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209)

$$\text{Re} = \frac{1 \cdot 0,04}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1,095 \cdot 10^5 > 10^4.$$

Режим движения турбулентный, поэтому выбираем критериальное уравнение (216):

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot (1,095 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 2,21^{0,43} \cdot \left(\frac{2,21}{2,74}\right)^{0,25} = 616.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d} = \frac{616 \cdot 67,5 \cdot 10^{-2}}{0,04} = 10400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Так как отношение  $L/d=3/0,04=75$ , то поправка по табл. 2 равна 1.

Тепловой поток определяем по уравнению (208):

$$Q^* = 10400 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3 \cdot (80 - 65) = 58800 \text{ Вт}.$$

90 Как изменятся значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока, если труба изогнута в виде змеевика диаметром 1000 мм, а остальные условия, как в задаче 89.

Решение:

Для изогнутых труб коэффициент теплоотдачи, полученный для прямых труб, умножают на поправочный коэффициент – уравнение (219):

$$\alpha_{\text{ЗМ}} = \alpha \varepsilon_{\text{ЗМ}} = 10400 \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{0,04}{1}\right) = 11880 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$



Тепловой поток соответственно равен

$$Q^* = 11880 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3 \cdot (80 - 65) = 67200 \text{ Вт.}$$

91 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на единицу длины в поперечном потоке воздуха для трубы диаметром 30 мм, если температура ее поверхности  $80^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $20^\circ\text{C}$  и скорость 5 м/с.

Решение:

Физические параметры воздуха при определяющей температуре, равной  $20^\circ\text{C}$  (приложение К):

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \text{Pr} = 0,703.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки  $80^\circ\text{C}$  -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 0,692$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209):

$$\text{Re} = \frac{5 \cdot 0,03}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 9,96 \cdot 10^3.$$

Для расчета выбираем формулу (227) - процесс теплообмена при поперечном обтекании одиночной трубы при  $\text{Re} > 10^3$ :

$$\text{Nu} = 0,216 \cdot (9,96 \cdot 10^3)^{0,6} = 55,2.$$

Коэффициент теплоотдачи соответственно равен:

$$\alpha = \frac{55,2 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{0,03} = 47,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловой поток на единицу длины трубы

$$q_1 = 47,7 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot (80 - 20) = 270 \text{ Вт/м.}$$

92 Определить средний коэффициент теплоотдачи для десятирядного коридорного пучка, обтекаемого поперечным потоком воды,

если внешний диаметр труб в пучке 25 мм, средняя скорость в узком сечении 0,7 м/с; средняя температура воды 50°C и средняя температура поверхности труб 85°C.

Решение:

При коридорной схеме расположения труб используем уравнение (228). Физические параметры воды при определяющей температуре, равной 50°C (приложение Л):

$$\lambda = 64,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 3,54.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки 85°C -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 2,13$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209)

$$\text{Re} = \frac{0,7 \cdot 0,025}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 31475.$$

Коэффициент, учитывающий влияние угла атаки в соответствии с табл. 4, равен 1. Тогда критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,23 \cdot 31475^{0,65} \cdot 3,54^{0,33} \cdot \left(\frac{3,54}{2,13}\right)^{0,25} = 332.$$

Коэффициент теплоотдачи для третьего и последующих рядов труб

$$\alpha_3 = \frac{332 \cdot 64,8 \cdot 10^{-2}}{0,025} = 8605 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Средний коэффициент теплоотдачи для всего пучка труб

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot (0,6 \alpha_3 + 0,9 \alpha_3 + (n - 2) \alpha_3) = 8175 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

93 Гладкая плита длиной 1,5 м и шириной 1 м обдувается продольным потоком воздуха со скоростью 5 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отданный плитой воздуху, если

температура поверхности плиты 110°C, а температура обдувающего потока воздуха 20°C.

Решение:

Физические параметры воздуха при температуре 20°C (приложение К):

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,703.$$

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209):

$$\text{Re} = \frac{5 \cdot 1,5}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 4,98 \cdot 10^5.$$

Так как  $\text{Re} > 10^5$  выбираем уравнение (231):

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot (4,98 \cdot 10^5)^{0,8} = 1155.$$

Коэффициент теплоотдачи и тепловой поток соответственно равны:

$$\alpha = \frac{1155 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad Q^* = 20 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot (110 - 20) = 2700 \text{ Вт}.$$

94 Определить коэффициент теплоотдачи вертикальной стенки высотой 2 м воздуху, если средняя температура стенки 120°C, а температура воздуха вдали от стенки 20°C.

Решение:

Теплоотдача при свободном движении рассчитывается по формуле (234). Определяющая температура равна

$$t = \frac{120 + 20}{2} = 70^\circ \text{C}.$$

Физические параметры воздуха при определяющей температуре 70°C (приложение К):

$$\lambda = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 20,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,694; \quad \beta = \frac{1}{70 + 273} = \frac{1}{343}.$$

Определим значение произведения критерия Грасгофа и Прандтля

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{9,81 \cdot 2^3 \cdot (120 - 20)}{343 \cdot (20,02 \cdot 10^{-6})^2} 0,694 = 39,55 \cdot 10^9.$$

При таком значении комплекса коэффициенты в уравнении (234) равны – табл. 5:  $C=0,135$ ;  $n=0,33$ .

Таким образом,

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (39,55 \cdot 10^9)^{0,33} = 460; \quad \alpha = \frac{460 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2}}{2} = 6,82 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

### Задачи

303 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при движении воздуха в трубе диаметром 56 мм длиной 2 м со скоростью 5 м/с, если средняя температура воздуха  $120^\circ\text{C}$ , а средняя температура стенки трубы  $100^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 19,14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 135 \text{ Вт}$ .

304 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при движении воды в трубе диаметром 8 мм длиной 360 мм, если расход воды составляет 108 л/ч, средняя температура воды  $50^\circ\text{C}$ , а средняя температура стенки трубы  $30^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 3660 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 663 \text{ Вт}$ .

305 Как изменится значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном и ламинарном течениях жидкости в трубе, если диаметр трубы увеличить соответственно в 2, 3 и 4 раза, сохраняя температуры и скорости движения постоянными?

Ответ: при турбулентном режиме  $\alpha$  уменьшится соответственно в 1,15; 1,25 и 1,32 раза; при ламинарном режиме – в 1,595; 2,08 и 2,56 раза.

306 Как изменится значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном и ламинарном течениях жидкости в трубе, если скорости движения увеличить соответственно в 2, 3 и 4 раза, сохраняя диаметры и температуры постоянными?

Ответ: при турбулентном режиме  $\alpha$  увеличится соответственно в 1,74; 2,41 и 3,03 раза; при ламинарном режиме – в 1,257; 1,437 и 1,58 раза.

307 По щелевому каналу 3 x 90 мм длиной 3 м протекает вода со скоростью 2 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки канала к воде, если средняя температура воды по длине канала 50°C, а средняя температура стенки по длине канала 110°C.

Ответ:  $\alpha = 14000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 4,68 \cdot 10^5 \text{ Вт}$ .

308 По индукционной катушке радиоэлектронного устройства, выполненного в виде змеевика из трубки с внутренним диаметром трубки 10 мм, протекает охлаждающая вода со скоростью 0,8 м/с. Определить температуру воды на выходе из трубки змеевика, если температуру воды на входе в змеевик 16°C, средняя температура стенки змеевика 70°C, число витков 45, диаметр витков 250 мм. Потери теплоты в окружающую среду не учитывать.

Ответ:  $t = 81^\circ\text{C}$ .

309 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенок канала атомного реактора, охлаждаемого водой, если диаметр канала 9 мм, его длина 1,6 м, средняя скорость воды 4 м/с, тем-

пература воды на входе в канал  $155^{\circ}\text{C}$ , на выходе -  $265^{\circ}\text{C}$ , а средняя температура стенки трубы  $270^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 31100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 8450 \text{ Вт}$ .

310 Плоская тонкая пластина длиной  $l = 2,5 \text{ м}$  омывается потоком воздуха (вдоль длины) со скоростью  $3 \text{ м/с}$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Определить характер пограничного слоя и его толщину на расстоянии от передней кромки пластины  $x=0,2 l$ ;  $x=0,5l$ ;  $x=l$ .

Ответ:

311 Плоская стенка длиной  $1,5 \text{ м}$  и шириной  $1 \text{ м}$  омывается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока соответственно равны  $4 \text{ м/с}$  и  $20^{\circ}\text{C}$ ; температура поверхности пластины  $50^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный пластиной воздуху.

Ответ:  $\alpha = 6,47 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 291 \text{ Вт}$ .

312 Тонкая пластина длиной  $2 \text{ м}$  и шириной  $0,5 \text{ м}$  с обеих сторон омывается продольным потоком воды со скоростью  $5 \text{ м/с}$ , температура набегающего потока  $10^{\circ}\text{C}$ ; средняя температура поверхности пластины  $50^{\circ}\text{C}$ . Определить средний по длине коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный пластиной воде.

Ответ:  $\alpha = 1840 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 147200 \text{ Вт}$ .

313 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в условиях примера 91, если скорость воздуха увеличить в 3 и 5 раз?

Ответ: увеличится в 1,93 и 2,637 раз.

314 Железный электропровод диаметром  $10 \text{ мм}$  охлаждается поперечным потоком воздуха, скорость и средняя температура которого соответственно равны  $2 \text{ м/с}$  и  $15^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи поверхности провода воздуху и допустимую силу тока в электропроводе при условии, что температура провода не должна

превышать 95°C. Удельное электрическое сопротивление провода  $\rho = 0,098 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Ответ:  $\alpha = 42,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 294 \text{ А}$ .

315 Решить задачу 314 при условии, что скорость воздуха уменьшится в 2 раза, а другие величины останутся без изменения.

Ответ:  $\alpha = 28,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 238,5 \text{ А}$ .

316 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и допустимая сила тока в условиях задачи 314, если воздух омывает электропровод под углом атаки 50°, а все другие параметры останутся без изменения.

Ответ:  $\alpha = 37,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 276 \text{ А}$ .

317 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на 1 м трубы, омываемой поперечным потоком воды, если наружный диаметр трубы 20 мм, температура ее поверхности 60°C, температура воды 20°C и ее скорость 0,8 м/с.

Ответ:  $\alpha = 6500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q = 16350 \text{ Вт}/\text{м}$ .

318 Определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в воздухонагревателе, состоящем из 11 рядов с числом труб 83, расположенных в шахматном порядке. Поток воздуха омывает этот пучок под углом атаки 70° со скоростью в наиболее узком месте 8 м/с. Диаметр и длина труб соответственно равны 33 мм и 3 м; средняя температура поверхности труб 430°C, средняя температура воздуха 350°C.

Ответ:  $\alpha = 75,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Вт}$ .

319 Как изменится коэффициент теплоотдачи для условий примера 92, если трубы в пучке расположены в шахматном порядке?

Ответ:  $\alpha = 1005 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

320 Определить коэффициент теплоотдачи от горизонтальной плиты шириной 1 м длиной 3 м, если теплоотдающая поверхность обращена вниз и температура ее  $125^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха вдали от плиты  $15^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 4,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

321 Определить коэффициент теплоотдачи для условий задачи 320, если теплоотдающая поверхность плиты обращена вверх.

Ответ:  $\alpha = 9,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

322 Витковый электронагреватель из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм имеет температуру  $500^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи на поверхности проволоки и силу тока, проходящую через электронагреватель, если температура окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ , а удельное сопротивление проволоки  $\rho = 1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Ответ:  $\alpha = 63,46 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 2,92 \text{ А}$ .

323 Определить коэффициенты теплоотдачи и удельные потери теплоты с двух горизонтально расположенных паропроводов диаметрами 200 и 100 мм, если температуры их стенок одинаковы и равны  $310^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха вдали от паропровода  $26^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha_1 = 8,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q_1 = 2340 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $\alpha_2 = 9,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q_2 = 2610 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

324 Определить тепловые потери от стенки размером 1 х 2 м, установленной по большему размеру под углом  $60^{\circ}$  к вертикали, если температура теплоотдающей поверхности, обращенной вверх,  $80^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха  $10^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha_{\varphi} = 7,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 1075 \text{ Вт}$ .

325 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и тепловые потери, если для условий задачи 324 теплоотдающая поверхность об-



ращена вниз под тем же углом к вертикали, а все другие параметры остаются без изменения?

Ответ:  $\alpha_{\phi} = 5,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 758 \text{ Вт}$ .

326 Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и тепловой поток на единицу длины цилиндрической воздушной прослойки толщиной 20 мм, если температура горячей и холодной поверхностей соответственно равны 80 и 20°C, а средний диаметр прослойки 100 мм.

Ответ:  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = 9,64 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $q_l = 90,7 \text{ Вт}/\text{м}$ .

327 Определить, при какой толщине водяной прослойки в ограниченном пространстве влиянием конвекции можно пренебречь, т.е. передача теплоты от горячей стенки к холодной будет обуславливаться только теплопроводностью жидкости. Температура горячей поверхности 14°C, температура холодной поверхности 6°C.

Ответ:  $\delta = 0,15 \text{ мм}$ .

328 Для условий задачи 327 определить толщину воздушной прослойки.

Ответ:  $\delta = 10,1 \text{ мм}$ .

329 Для обогрева используют горизонтальную трубу, в которой протекает горячая вода. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если диаметр трубы 0,1 м, длина 10 м, температура поверхности трубы 85°C, температура воздуха 20°C.

Ответ:  $\alpha = 6,93 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 1414 \text{ Вт}$ .

## 2.3 Лучистый теплообмен

Теплообмен **излучением** (лучистый теплообмен) свойственен всем телам, температура которых не равна абсолютному нулю.

Энергия, излучаемая всем телом по всем направлениям и длинам волн в единицу времени, называется **интегральным излучением**, обозначается  $Q^*$  и измеряется в ваттах.

Интегральное излучение, приходящееся **на единицу поверхности**, называется **плотностью** интегрального излучения, обозначается  $E$  и измеряется в ваттах на квадратный метр.

**Интенсивность интегрального излучения** – это отношение плотности интегрального излучения к длине волны, Вт/м<sup>3</sup>:

$$I = \frac{Q}{F \lambda} = \frac{E}{\lambda}. \quad (241)$$

Все тела не только излучают энергию, но и поглощают, отражают и пропускают через себя падающие лучи от другого тела:

$$A + R + D = 1, \quad (242)$$

где  $A$  - поглотительная способность тела, это отношение энергии, поглощенной телом, ко всей падающей энергии, величину  $A$  называют коэффициентом поглощения;

$R$  - отражательная способность тела, это отношение энергии, отраженной телом, ко всей падающей энергии, величину  $R$  называют коэффициентом отражения;

$D$  - коэффициент пропускания, характеризует способность тела пропускать энергию излучения.

**Закон Планка:** интенсивность излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависит от температуры и длины волны:

$$I_{s\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (243)$$

где  $I_{s\lambda}$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>3</sup>;

$C_1, C_2$  – постоянные Планка;

$\lambda$  – длина волны, м;

$T$  – абсолютная температура, К;

$e$  – основание натурального логарифма.

Длина волны  $\lambda$  в микрометрах, отвечающая максимальному значению интенсивности излучения, определяется **законом смещения Вина**:

$$\lambda_{\max} = 2,9 / T, \quad (244)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К.

**Закон Стефана – Больцмана**: плотность интенсивности излучения абсолютно черного тела ( $E_s$ ) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_s = \sigma T^4, \quad (245)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана обычно записывают в виде

$$E_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (246)$$

где  $C_s = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана – Больцмана для реальных тел имеет следующий вид:

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 = C_s \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (247)$$

где  $C$  – коэффициент излучения реального тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\epsilon$  - степень черноты реального тела (приложение Н).

**Закон Кирхгофа:** отношение энергии излучения к коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и равно энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

**Закон Ламберта:** максимальное излучение  $E_n$  имеет место в направлении нормали к поверхности; количество энергии, излучаемой под углом  $\varphi$  к нормали,  $E_\varphi$  пропорционально косинусу угла  $\varphi$ :

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi. \quad (248)$$

При расчете лучистого теплообмена обычно рассматривается 2 случая: теплообмен между двумя параллельными поверхностями и теплообмен между телами, когда одно из них находится внутри другого.

Плотность лучистого потока между параллельными поверхностями, Вт/м<sup>2</sup>,

$$q = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \epsilon_{\text{пр}} C_s \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (249)$$

где  $C_{\text{пр}}$  - приведенный коэффициент излучения системы тел;

$\epsilon_{\text{пр}}$  - приведенный коэффициент черноты системы тел.

Приведенный коэффициент излучения рассчитывают по формуле

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 - 1/C_s}, \quad (250)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_s$ - коэффициенты излучения 1-го, 2-го и абсолютно черного тела.

Приведенный коэффициент черноты системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (251)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - коэффициенты черноты 1-го, 2-го тел.

Тепловой поток между телами, когда одно из них (площадь поверхности  $F_1$ ) находится внутри другого (площадь поверхности  $F_2$ ), определяют по формуле

$$Q^{\bullet} = \frac{F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1/C_1 + F_1 (1/C_2 - 1/C_s)/F_2} = \frac{C_s F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1/\varepsilon_1 + F_1 (1/\varepsilon_1 - 1)/F_2}. \quad (252)$$

В этом случае приведенная степень черноты системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + F_1 (1/\varepsilon_2 - 1)/F_2} \quad (253)$$

или приведенный коэффициент излучения системы тел

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{1/C_1 + F_1 (1/C_2 - 1/C_s)/F_2}. \quad (254)$$

Если 1-я поверхность мала по сравнению со 2-й поверхностью, то выражение  $F_1/F_2$  приближается к нулю, а уравнение теплообмена принимает вид:

$$Q = C_1 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (255)$$

Теплообмен между двумя произвольно расположенными телами может быть рассчитан по формуле

$$Q = \varphi \varepsilon_{\text{пр}} C_s F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (256)$$

где  $\varphi$  - коэффициент облученности тела, учитывающий долю излучения первого тела, которая воспринимается вторым; приводится в

справочниках или рассчитывается, например для круглых пластин (диаметром  $d$ , расположенных на расстоянии  $h$ ), по формуле

$$\varphi = \left[ \frac{h}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right]^2. \quad (257)$$

В приближенных расчетах величину приведенного коэффициента степени черноты ( $\epsilon_{пр}$ ) допустимо рассчитывать по формуле

$$\epsilon_{пр} = \epsilon_1 \epsilon_2. \quad (258)$$

Для уменьшения передачи теплоты излучением используют установку **экранов**. Защитное действие экрана, установленного между двумя параллельными поверхностями (при условии, что площади и коэффициенты излучения поверхностей и экрана одинаковы), состоит в уменьшении передачи теплоты излучением в 2 раза. Температуру экрана можно определить из выражения

$$\left(\frac{T_{ЭК}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]. \quad (259)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{изл} = \frac{q_{изл}}{T_{г} - T_{ст}}, \quad (260)$$

где  $T_{г}$  и  $T_{ст}$  – абсолютная температура газа и стенки, К.

При расчете сложного теплообмена, когда теплота передается двумя или даже всеми тремя способами одновременно, рассчитывают суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{изл}. \quad (261)$$

## Примеры решения задач

95 Определить собственную излучательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения  $4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , если температура поверхности стенки  $1027^\circ\text{C}$ . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.

Решение:

Излучательную способность стенки летательного аппарата определяем по формуле (247):

$$E = 4,53 \cdot \left( \frac{1300}{100} \right)^4 = 1,256 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Степень черноты определяем из равенства  $\varepsilon C_s = C$ ,

Откуда 
$$\varepsilon = \frac{C}{C_s} = \frac{4,53}{5,77} = 0,785 \approx 0,8.$$

Длину волны, отвечающую максимуму интенсивности излучения, определяем из закона Вина (244):

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9}{T} = \frac{2,9}{1300} = 0,00223 \text{ мм} = 2,23 \text{ мкм}.$$

96 Определить лучистый теплообмен между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки температура  $t_1 = -183^\circ\text{C}$ , а на внутренней поверхности наружной стенки  $t_2 = 17^\circ\text{C}$ . Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого равна  $0,02$ ; площади поверхностей стенок  $F_1 \approx F_2 \approx 0,1 \text{ м}^2$ .

Решение:

Количество лучистой энергии между параллельными поверхностями можно определить по формуле (259).

Вначале вычислим приведенную степень черноты данной системы тел (251):

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/0,02 + 1/0,02 - 1} = \frac{1}{99}.$$

Тогда количество лучистой энергии

$$Q^{\bullet} = 0,1 \cdot \frac{1}{99} \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{17 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{-183 + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,396 \text{ Вт}.$$

97 Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 300 и 100°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 300 мм, расстояние между ними  $h=500$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 0,24$ .

Решение:

Определим коэффициент облученности (257):

$$\Phi_{1-2} = \left[ \frac{0,5}{0,3} - \sqrt{1 + \left( \frac{0,5}{0,3} \right)^2} \right]^2 = 0,077.$$

Площадь поверхности пластины составляет:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2.$$

Определим приведенную степень черноты (251):

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/0,24 + 1/0,24 - 1} = 0,136.$$



Тепловой поток между пластинами определяем по формуле (256):

$$Q = \varphi \epsilon_{\text{пр}} C_s \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,077 \cdot 0,136 \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{573}{100} \right)^4 - \left( \frac{373}{100} \right)^4 \right] = 53,4 \text{ Вт.}$$

98 Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром 200 мм, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны 467°С и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°С.

Решение:

Паропровод охлаждается за счет излучения и свободной конвекции, следовательно, тепловой поток с единицы площади паропровода определяется уравнением

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{СТ}} - t),$$

где  $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$  - коэффициент лучисто-конвективного теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем исходя из формул (249) и (260):

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{0,79 \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{740}{100} \right)^4 - \left( \frac{300}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{СТ}} - t} = 30,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (234). Находим по таблице приложения К параметры теплоносителя при определяющей температуре:

$$t = 0,5 (t_{\text{В}} + t_{\text{СТ}}) = 0,5 \cdot (467 + 27) = 245^\circ \text{С};$$

$$\lambda = 4,23 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 40,04 \text{ м}_2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,667; \quad \beta = \frac{1}{518}; \quad \Delta t = 440^\circ \text{С}.$$

Рассчитываем комплекс (Pr·Gr):

$$(\text{Pr} \cdot \text{Gr}) = 0,667 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,2^3 \cdot 440}{518 \cdot (40,04 \cdot 10^{-6})^2} = 2,78 \cdot 10^7.$$

При таком значении комплекса  $C=0,135$  и  $n=0,33$ . Определяем критерий Нуссельта:

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (2,78 \cdot 10^7)^{1/3} = 40,9.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (211):

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{40,9 \cdot 4,23 \cdot 10^{-2}}{0,2} = 8,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент лучисто-конвективного теплообмена

$$\alpha = 30,7 + 8,67 = 39,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определяем потери теплоты с 1 м длины паропровода:

$$q_1 = \alpha \pi d l \Delta t = 39,37 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 440 = 10880 \text{ кВт}/\text{м}.$$

99 Для измерения температуры горячего газа, движущегося по каналу, установлена термопара, показания которой  $400^\circ\text{C}$ , степень черноты горячего спая термопары и стенок канала одинаковы:  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,78$ , а температура стенки канала при стационарном режиме  $300^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи потока газа поверхности спая  $65,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить ошибку в показании термопары, которая возникает вследствие лучистого теплообмена между спаем и стенками, и истинную температуру газа.

Решение:

Составим уравнение теплового баланса для стационарного теплового состояния горячего спая:

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{л}} \quad \text{или} \quad \alpha (t_{\text{г}} - t_1) F = \epsilon_{\text{сп}} C_s F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где  $F$  – площадь поверхности горячего спая.

Из этой формулы ошибка в показаниях термопары составляет:

$$t_f - t_1 = \frac{\epsilon_{\text{нп}} C_s}{\alpha} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{0,78 \cdot 5,77}{65,1} \cdot \left[ \left( \frac{673}{100} \right)^4 - \left( \frac{573}{100} \right)^4 \right] = 66^\circ \text{C}.$$

Истинная температура газа

$$t_f = 400 + 66 = 466^\circ \text{C}.$$

100 Определить допустимую силу тока для горизонтально расположенной нихромовой проволоки диаметром 1,5 мм при условии непревышения ее температуры  $400^\circ\text{C}$ . Температура воздуха  $30^\circ\text{C}$ , удельное электрическое сопротивление провода  $1,2 \text{ (Ом}\cdot\text{мм}^2\text{)/м}$ , степень черноты  $\epsilon_{\text{нп}} = 0,96$ ; провод охлаждается вследствие излучения и свободной конвекции.

Решение:

Отводимая от проволоки теплота определяется уравнением

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}}.$$

Потери за счет излучения

$$q_{\text{л}} = \epsilon_{\text{нп}} C_s \pi d \left( \frac{T}{100} \right)^4 = 0,96 \cdot 5,77 \cdot 3,14 \cdot 0,0015 \left( \frac{673}{100} \right)^4 = 52,8 \text{ Вт/м}.$$

Определим потери за счет свободной конвекции. Находим по таблице приложения К параметры теплоносителя при определяющей температуре:

$$t = 0,5 (t_{\text{в}} + t_{\text{ст}}) = 0,5 \cdot (400 + 30) = 215^\circ \text{C};$$

$$\lambda = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad \nu = 36,58 \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,68; \quad \beta = \frac{1}{488}; \quad \Delta t = 370^\circ \text{C}.$$

Рассчитываем комплекс  $(\text{Pr}\cdot\text{Gr})$ :

$$(\text{Pr}\cdot\text{Gr}) = 0,68 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,0015^3 \cdot 370}{488 \cdot (36,58 \cdot 10^{-6})^2} = 12,8.$$

При таком значении комплекса  $C=1,18$  и  $n=0,125$ . Определяем критерий Нуссельта:

$$Nu = 1,18 \cdot (12,8)^{1/8} = 1,625 .$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (211):

$$\alpha_K = \frac{1,625 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2}}{0,0015} = 43,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) .$$

Потери тепла за счет конвекции

$$q_K = \alpha \pi d \Delta t = 43,3 \cdot 3,14 \cdot 0,0015 \cdot 370 = 75,6 \text{ Вт}/\text{м} .$$

Общие потери теплоты с 1 м длины провода составляют:

$$q_l = q_{л} + q_K = 128,4 \text{ Вт}/\text{м} .$$

Допустимую силу тока для нихромовой проволоки определяем из уравнения

$$q_l = I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{\pi d^2 / 4} = I^2 \cdot \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 4}{3,14 \cdot 1,5^2} = 0,679 \cdot I^2 ,$$

откуда

$$I = \sqrt{\frac{q_l}{0,679}} = \sqrt{\frac{128,4}{0,679}} = 13,42 \text{ А} .$$

### Задачи

330 Стальная заготовка с начальной температурой  $27^\circ\text{C}$  поставлена в муфельную печь, температура стенок которой  $927^\circ\text{C}$ . Определить, какой тепловой поток воспринимается заготовкой (в начальный период) за счет лучистой энергии, если отношение поверхностей заготовки и муфельной печи  $F_1/F_2=1/30$ , а степень черноты заготовки и стенок печи соответственно равны 0,7 и 0,85.

Ответ:  $q=81750 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

331 Каким будет тепловой поток излучением и какова погрешность расчета, если в условии задачи 325 принять отношение поверхностей заготовки и муфельной печи  $F_1/F_2=0$ ?

Ответ:  $q=82600$  Вт/м<sup>2</sup>, погрешность составляет +1,14%.

332 Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 300 и 100°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 300 мм, расстояние между ними  $h=250$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 0,24$ . Как изменятся эти величины при уменьшении расстояния между дисками в 5 раз?

Ответ: а)  $\varphi_{1-2} = 0,204$ ;  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,436$ ;  $Q = 31,6$  Вт.

б)  $\varphi_{1-2} = 0,52$ ;  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,234$ ;  $Q = 43,5$  Вт.

333 Определить лучистый тепловой поток между двумя равными круглыми стальными параллельно расположенными пластинами с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 400 и 1000°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 750 мм, расстояние между ними  $h=2000$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 = 0,55$ ;  $\epsilon_2 = 0,15$ .

Ответ:  $Q= 165$  Вт.

334 Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром 200 мм, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны 467°C и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°C. Паропровод помещен в кирпичный канал диаметром 1 м с температурой стенки канала 27°C, . степень черноты его поверхности равна 0,81.

Ответ:  $\alpha = 29,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $q_1 = 9350 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

335 Как изменится ошибка в показаниях термопары газового потока, если в условии примера 99 температуру стенки трубы повысить до  $360^\circ\text{C}$ , улучшив теплоизоляцию газопровода?

Ответ:  $\delta t = 30,6$ ;  $t_f = 430,6^\circ\text{C}$ .

336 Между двумя параллельными кругами с центрами на общей нормали к их плоскостям происходит лучистый теплообмен. Среда между кругами прозрачна. Определить величину результирующего теплового потока, если известно:

$$\begin{aligned}d_1 &= 0,5 \text{ м}, & t_1 &= 727^\circ\text{C}, & h &= 2,0 \text{ м}; \\d_2 &= 1,0 \text{ м}, & t_2 &= 227^\circ\text{C};\end{aligned}$$

а) верхний круг выполнен из листовой шлифованной стали ( $\epsilon_1 = 0,61$ ), нижний — из шамотного кирпича ( $\epsilon_2 = 0,75$ );

б) верхний круг выполнен из вольфрама ( $\epsilon_1 = 0,16$ ), нижний — из шамотного кирпича ( $\epsilon_2 = 0,75$ ).

Ответ: а)  $Q_{1-2} = 280 \text{ Вт}$ ; б)  $Q_{1-2} = 72,5 \text{ Вт}$ .

337 Определить часовое количество тепла, теряемого за счет лучеиспускания паропроводом без тепловой изоляции, проложенным внутри большого цехового помещения. Наружный диаметр паропровода 150 мм, длина 200 м. По паропроводу течет насыщенный пар давлением 10 ат, температура наружной поверхности труб паропровода на  $20^\circ\text{C}$  ниже температуры насыщения, температура воздуха в помещении  $25^\circ\text{C}$ . Коэффициент поглощения материала труб  $A = 0,45$ .

Ответ:  $Q = 66 \text{ кВт}$ .

338 На сколько процентов изменится тепловая потеря паропровода в задаче 337, если учесть излучение паропровода? Степень черноты материала труб 0,82.

Ответ: на 321%.

339 Найти потери тепла на излучение 1 погонного метра паропровода диаметром  $d = 300$  мм, наружная температура которого равна  $t_{\text{тр}} = 567^\circ\text{C}$ , степень черноты  $\epsilon_{\text{тр}} = 0,93$  для случаев:

а) обратным излучением среды на паропровод можно пренебречь;

б) паропровод находится в канале прямоугольного сечения размером  $600 \times 700$  мм, стенки канала выложены сильно излучающим огнеупорным кирпичом ( $\epsilon_{\text{ст}} = 0,8$ );  $t_{\text{ст}} = 117^\circ\text{C}$ .

Ответ: а)  $Q = 24,8$  кВт/м; б)  $Q = 21,8$  кВт/м.

340 По условиям эксплуатации температура горизонтального нихромового неизолированного провода,  $d = 1$  мм, не должна превышать  $600^\circ\text{C}$ . Определить максимально допустимую силу тока, если температура воздуха  $30^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1,2$  Ом·мм<sup>2</sup>/м,  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,95$ .

Ответ:  $I = 11,5$  А.

341 Определить потери тепла излучением поверхностью стального аппарата цилиндрической формы, находящегося в помещении, стены которого выкрашены масляной краской. Размеры аппарата: высота – 2 м, диаметр – 1 м. Размеры помещения: высота – 4 м, длина – 10 м, ширина – 6 м. Температура стенки аппарата  $70^\circ\text{C}$ , температура воздуха в помещении  $20^\circ\text{C}$ . Определить общую потерю тепла аппаратом путем излучения и конвекции.

Ответ:  $Q^* = 5200$  Вт.

342 В помещении установлен цилиндрический подогреватель (длина 4 м, диаметр 1 м). Температура поверхности подогревателя  $280^\circ\text{C}$ , коэффициент излучения  $4,9$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Размеры помещения: длина 8 м, ширина 4 м, высота 3 м, температура в помещении  $22^\circ\text{C}$ , коэффициент излучения стен  $3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Определить тепловой поток между подогревателем и стенами.

Ответ:  $Q^*=51740$  Вт.

343 Между двумя параллельными поверхностями установлен экран. Температура поверхностей  $367$  и  $32^\circ\text{C}$ . Степень черноты поверхностей и экрана одинаковы и равны  $0,83$ . Определить плотность теплового потока между поверхностями до и после установки экрана, а также температуру экрана.

Ответ:  $q_0=6510$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{эк}}=3255$  Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\text{эк}}=545$  К.

344 Определить тепловой поток излучением от стальной окисленной трубы (диаметр  $0,1$  м; длина  $10$  м),используемой для отопления гаража. Температура поверхности трубы  $85^\circ\text{C}$ , температура стен  $15^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $Q^*=1360$  Вт.



## Приложение А

### Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Относительная молекулярная масса, кг/кмоль	Газовая постоянная, Дж/кг	Плотность газа при н.у., кг/м <sup>3</sup>
Кислород	O <sub>2</sub>	32	259,8	1,429
Водород	H <sub>2</sub>	2	4124,3	0,090
Азот	N <sub>2</sub>	28	296,8	1,250
Оксид углерода	CO	28	296,8	1,250
Воздух	—	28,96	287	1,293
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44	189	1,977
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18	481,6	0,804
Гелий	He	4	2077,2	0,178
Аргон	Ar	40	208,2	1,784
Аммиак	N H <sub>3</sub>	17	488,2	0,771
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	320	1,171
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,1	106	-
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1	143	2,673
Оксид азота	NO <sub>2</sub>	46	181	-
Оксид серы	SO <sub>2</sub>	64,1	130	2,93
Метан	CH <sub>4</sub>	16	519	0,72
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1	189	2,02
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,1	198	1,91
Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,1	244	1,54
Хлор	Cl <sub>2</sub>	70,9	117	3,22
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,1	297	1,26
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,1	277	1,36

## Приложение Б

Средняя теплоемкость газов в интервале температур от 0 до t

Таблица Б.1 - Средняя молярная теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(кмоль·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	29,274	29,019	29,123	35,86	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,4	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,5	29,789	43,25	35,09	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,63	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,15	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,07	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,74	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	-	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	-	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	-	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,8	42,056	-	32,967
1700	34,67	32,93	33,27	53,50	42,20	-	33,17
1800	34,834	33,10	33,44	53,91	42,67	-	33,35
1900	35,02	33,26	33,69	54,29	43,12	-	33,51
2000	35,17	33,42	33,75	54,64	43,56	-	33,66
2200	35,50	33,70	34,02	55,27	44,37	-	33,95
2400	35,80	33,95	34,26	55,85	45,13	-	34,21
2600	36,09	34,18	34,48	56,35	45,81	-	34,45
2800	36,36	34,39	34,68	56,82	-	-	34,67
3000	36,61	34,58	34,86	57,23	-	-	34,87

Таблица Б.2 - Средняя молярная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кмоль·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,8	20,988	31,744	25,803	34	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,44	26,26	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,935	26,775	36,89	21,474
500	23,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,78
600	23,446	21,729	22,11	37,438	27,88	39,02	22,09
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,9	22,408
800	24,187	22,32	22,755	39,448	29,077	40,61	22,713
900	24,51	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,35	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,14	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,51	42,75	23,794
1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	-	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	-	24,25
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,21	-	24,459
1600	26,159	24,25	24,736	44,485	33,741	-	24,652
1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	-	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	-	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	-	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,68	-	25,326

Таблица Б.3 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(кг·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9282	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,95	1,04	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,071
900	1,0258	1,0982	1,12	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,035	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,117	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,153	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,058	1,1342	1,1577	1,166	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,138
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,363	-	1,1443
1800	1,0886	1,169	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,094	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,156
2000	1,099	1,191	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,161
2100	1,104	1,197	1,208	1,240	2,466	-	1,166
2200	1,109	1,201	1,213	1,247	2,490	-	1,171
2300	1,114	1,206	1,218	1,253	2,512	-	1,176
2400	1,118	1,210	1,222	1,259	2,533	-	1,180
2500	1,123	1,214	1,226	1,264	2,554	-	1,185
2600	1,127	1,216	1,231	1,271	2,574	-	1,189
2700	1,131	1,222	1,235	1,275	2,594	-	1,103
2800	1,135	1,226	1,238	1,284	2,612	-	1,197
2900	1,139	1,231	1,242	1,288	2,630	-	1,201
3000	1,143	1,235	1,245	1,292	-	-	1,206

Таблица Б.4 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кг·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,398	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,677	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,69	0,7448	0,757	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,824	1,516	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,614	0,632	0,7842
900	0,7658	0,803	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,775	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,839	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,847	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,883	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,857
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,834	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,839	0,884	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742
2100	0,844	0,900	0,912	1,052	2,005	-	0,879
2200	0,849	0,905	0,916	1,058	2,028	-	0,884
2300	0,854	0,909	0,921	1,064	2,050	-	0,889
2400	0,858	0,914	0,925	1,070	2,072	-	0,893
2500	0,863	0,918	0,929	1,075	2,093	-	0,897
2600	0,868	0,920	0,931	1,080	2,113	-	0,900
2700	0,872	0,923	0,934	1,084	2,132	-	0,903
2800	0,875	0,926	0,936	1,089	2,151	-	0,906
2900	0,878	0,929	0,939	1,093	2,168	-	0,908
3000	0,881	0,931	0,941	1,097	-	-	0,911

Таблица Б.5 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,398	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,372	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,367	1,3862	2,1311	1,668	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,828	-	1,4528
1500	1,5294	1,444	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,462
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,501

Таблица Б.6 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,44	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,027	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,7	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,996	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,864	1,3791	1,888	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	-	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,457	-	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	-	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	-	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	-	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	-	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	-	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	-	1,1296

Приложение В

Средняя теплоемкость газов (линейная зависимость)

Таблица В.1 — Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
В пределах от 0 до 1000°С		
O <sub>2</sub>	$C_p = 0,9127 + 0,00012724 t$	$C'_p = 1,3046 + 0,00018183 t$
	$C_v = 0,6527 + 0,00012724 t$	$C'_v = 0,9337 + 0,00018183 t$
N <sub>2</sub>	$C_p = 1,0258 + 0,00008382 t$	$C'_p = 1,2833 + 0,00010492 t$
	$C_v = 0,7289 + 0,00008382 t$	$C'_v = 0,9123 + 0,00010492 t$
CO	$C_p = 1,0304 + 0,00009575 t$	$C'_p = 1,2883 + 0,00011966 t$
	$C_v = 0,7335 + 0,00009575 t$	$C'_v = 0,9173 + 0,00011966 t$
Воздух	$C_p = 0,9952 + 0,00009349 t$	$C'_p = 1,2870 + 0,00012091 t$
	$C_v = 0,7084 + 0,00009349 t$	$C'_v = 0,9161 + 0,00012091 t$
H <sub>2</sub> O	$C_p = 1,8401 + 0,00029278 t$	$C'_p = 1,4800 + 0,00023551 t$
	$C_v = 1,3783 + 0,00029278 t$	$C'_v = 1,1091 + 0,00023551 t$
SO <sub>2</sub>	$C_p = 0,6314 + 0,00015541 t$	$C'_p = 1,8472 + 0,00004547 t$
	$C_v = 0,5016 + 0,00015541 t$	$C'_v = 1,4763 + 0,00004547 t$
В пределах от 0 до 1500°С		
H <sub>2</sub>	$C_p = 14,2494 + 0,00059574 t$	$C'_p = 1,2803 + 0,00005355 t$
	$C_v = 10,1241 + 0,00059574 t$	$C'_v = 0,9094 + 0,00005355 t$
CO <sub>2</sub>	$C_p = 0,8725 + 0,00024053 t$	$C'_p = 1,7250 + 0,00004756 t$
	$C_v = 0,6837 + 0,00024053 t$	$C'_v = 1,3540 + 0,00004756 t$

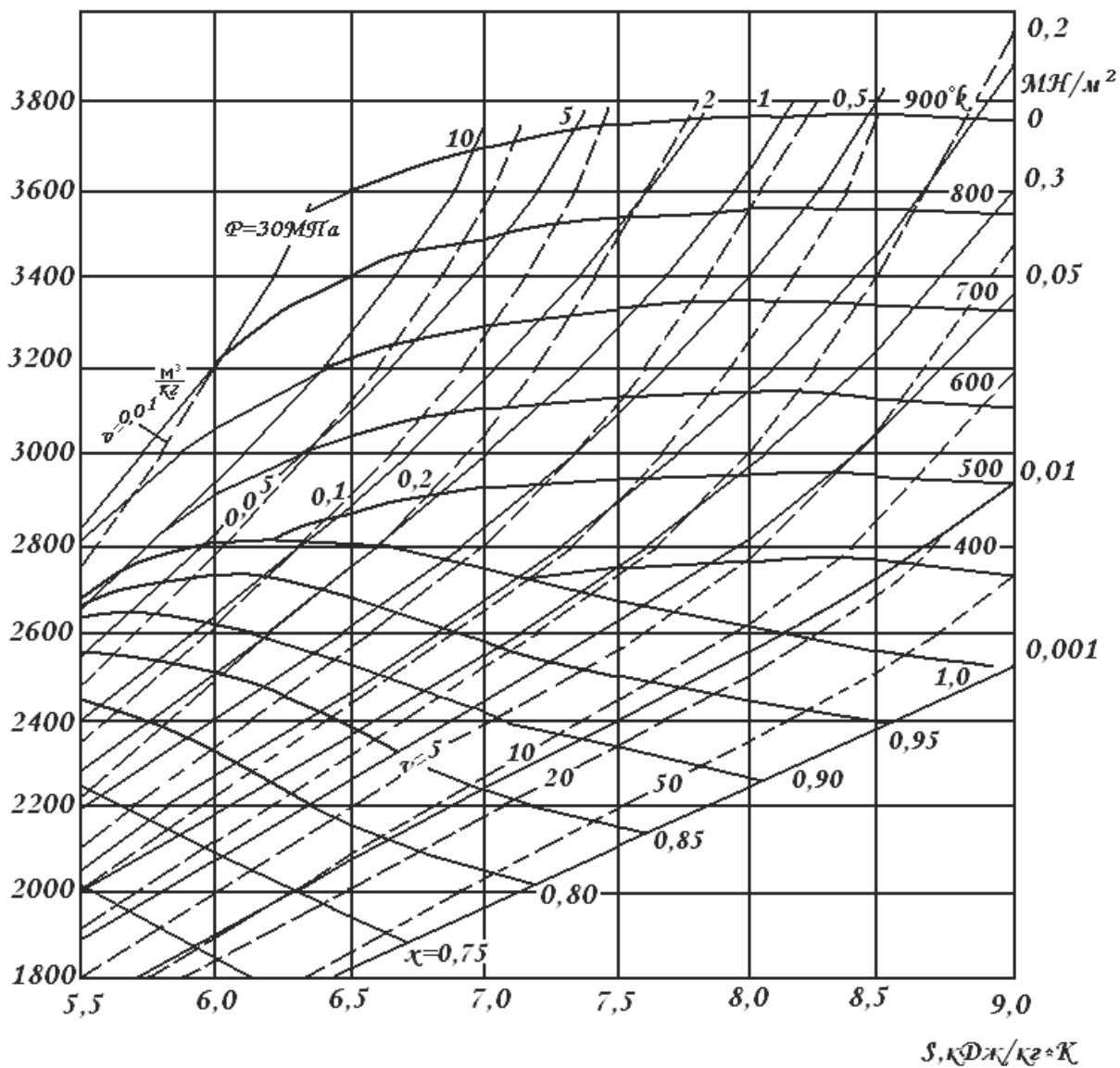


Таблица В.2 — Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов

Газ	Истинная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)	Средняя теплоемкость, кДж/(кмоль·К)
В пределах от 0 до 1000°С		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5802 + 0,0069706 t$	$C_{\mu p} = 29,2080 + 0,0040717 t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5372 + 0,0053905 t$	$C_{\mu p} = 28,7340 + 0,0023488 t$
CO	$C_{\mu p} = 28,7395 + 0,0058862 t$	$C_{\mu p} = 28,8563 + 0,0026808 t$
Воздух	$C_{\mu p} = 28,7558 + 0,0057208 t$	$C_{\mu p} = 28,8270 + 0,0027080 t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 32,8367 + 0,0116611 t$	$C_{\mu p} = 33,1494 + 0,0052749 t$
SO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 42,8728 + 0,0132043 t$	$C_{\mu p} = 40,4386 + 0,0099562 t$
В пределах от 0 до 1500°С		
H <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 28,3446 + 0,0031518 t$	$C_{\mu p} = 28,7210 + 0,0012008 t$
CO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 41,3597 + 0,0144985 t$	$C_{\mu p} = 38,3955 + 0,0105838 t$
В пределах от 1000 до 2700°С		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 33,8603 + 0,021951 t$	$C_{\mu p} = 31,5731 + 0,0017572 t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 32,7466 + 0,0016517 t$	$C_{\mu p} = 29,7815 + 0,0016835 t$
CO	$C_{\mu p} = 33,6991 + 0,0013406 t$	$C_{\mu p} = 30,4242 + 0,0015579 t$
Воздух	$C_{\mu p} = 32,9564 + 0,0017800 t$	$C_{\mu p} = 30,1533 + 0,0016973 t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 40,2393 + 0,0059854 t$	$C_{\mu p} = 34,5118 + 0,0045979 t$

hs-диаграмма водяного пара

$h$ , кДж/кг



## Приложение Д

### Физические свойства воды и водяного пара

Таблица Д.1 - Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (в зависимости от температуры)

t, °C	P <sub>n</sub> , МПа	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2500,8	2500,8	0	9,1644
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,9	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,256
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358	0,8311	7,9084
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,955	7,7544
80	0,4736	0,001029	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734	2144,9	1,7392	6,9304

Продолжение таблицы Д.1

t, °C	P <sub>n</sub> , МПа	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
160	0,618	0,0011021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
200	1,555	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793	1940,6	2,3308	6,4318
220	2,3202	0,00119	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
240	3,348	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
320	11,28	0,001499	0,01545	64,74	1462	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,008805	113,6	1671,4	2564,6	893	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,006943	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,053
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
474	22,087	0,0028	0,00347	288	2031,9	2147	114,7	4,3258	4,5029

Таблица Д.2 - Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (в зависимости от давления)

Р, МПа	tн, °С	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
0,002	17,486	0,001	67,24	0,0149	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,004	29,95	0,001	34,93	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,006	36,17	0,001	23,77	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,008	41,53	0,001	18,13	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,010	45,82	0,001	14,7	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,001	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,03	69,12	0,001	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,001	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,05	81,33	0,001	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,001	2,734	0,3658	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,08	93,5	0,001	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,001	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,8	0,001	1,43	0,6992	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
0,16	113,31	0,0011	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
0,2	120,23	0,0011	0,886	1,129	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0011	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,4	143,62	0,0011	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,5	151,84	0,0011	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609

Продолжение таблицы Д.2

Р, МПа	th, °С	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
1	179,88	0,0011	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
2	212,36	0,0012	0,0996	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
3	233,83	0,0012	0,0666	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
4	250,33	0,0013	0,0498	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5	263,91	0,0013	0,0394	25,39	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
6	275,56	0,0013	0,0324	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7	285,8	0,0014	0,0274	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8	294,98	0,0014	0,0235	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9	303,31	0,0014	0,0205	48,8	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10	310,96	0,0015	0,018	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11	318,04	0,0015	0,016	62,62	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
12	324,64	0,0015	0,0143	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
13	330,81	0,0016	0,0128	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14	330,63	0,0016	0,0115	87,04	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
16	347,32	0,0017	0,0093	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18	356,96	0,0018	0,0075	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20	365,71	0,002	0,0059	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
22	373,7	0,0027	0,0037	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

## Приложение Е

### Термодинамические свойства воды и перегретого пара

(числа над ступенчатой линией относятся к воде)

P, кПа	5			10			20		
	$t_H=32,55\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2562,2; v''=28,73;$ $s''=8,407$			$t_H=45,45\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2585,6; v''=14,95;$ $s''=8,162$			$t_H=59,67\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2610; v''=7,789;$ $s''=7,919$		
t, °C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0
50	30,36	2595	8,51	15,15	2594	8,19	0,001	209,5	0,70
100	35,09	2689	8,78	17,53	2688	8,46	8,75	2687	8,14
200	44,52	2881	9,24	22,25	2881	8,92	11,12	2881	8,60
300	53,93	3078	9,62	26,96	3078	9,30	13,48	3078	8,97
400	63,34	3282	9,94	31,67	3282	9,62	15,83	3282	9,30
500	72,76	3492	10,23	36,38	3492	9,91	18,19	3492	9,60
600	82,17	3709	10,50	41,08	3709	10,18	20,54	3709	9,86

P, кПа	50			100			200		
	$t_H=80,86\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2646; v''=3,299;$ $s''=7,606$			$t_H=99,09\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2676; v''=1,725;$ $s''=7,371$			$t_H=119,62\text{ }^\circ\text{C};$ $h''=2708; v''=0,902;$ $s''=7,139$		
t, °C	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0
50	0,001	209,5	0,70	0,001	209,5	0,70	0,001	209,5	0,70
100	3,485	2684	7,71	1,729	2677	7,37	0,001	419,8	1,31
200	4,441	2879	8,17	2,215	2877	7,85	1,102	2872	7,52
300	5,388	3077	8,55	2,690	3076	8,23	1,342	3074	7,91
400	6,331	3282	8,88	3,163	3280	8,56	1,579	3279	8,24
500	7,273	3491	9,17	3,635	3491	8,85	1,816	3490	8,53
600	8,215	3709	9,43	4,106	3708	9,11	2,052	3708	8,79

P, кПа	500			1000			2000		
t, °C	t <sub>H</sub> =151,11 °C; h''=2750; v''=0,3818; s''=6,83			t <sub>H</sub> =179,04 °C; h''=2779; v''=0,198; s''=6,599			t <sub>H</sub> =211,38 °C; h''=2801; v''=0,1016; s''=6,352		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0,4	0	0,001	0,8	0	0,001	2,1	0
50	0,001	209,5	0,70	0,001	210,3	0,70	0,001	211,2	0,70
100	0,001	419,8	1,31	0,001	420,3	1,31	0,001	421,1	1,31
200	0,437	2858	7,07	0,210	2831	6,71	0,001	853,1	2,33
300	0,533	3067	7,47	0,263	3054	7,14	0,128	3027	6,78
400	0,629	3274	7,81	0,312	3266	7,48	0,154	3251	7,14
500	0,725	3487	8,10	0,361	3482	7,78	0,179	3471	7,45
600	0,820	3705	8,37	0,409	3702	8,04	0,203	3694	7,72

P, кПа	5000			10000			20000		
t, °C	t <sub>H</sub> =262,7 °C; h''=2797; v''=0,0403; s''=5,987			t <sub>H</sub> =309,53 °C; h''=2731; v''=0,01846; s''=5,63			t <sub>H</sub> =363,4 °C; h''=2435; v''=0,00618; s''=4,97		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	5,03	0	0,001	10,06	0	0,001	19,69	0
50	0,001	213,7	0,70	0,001	217,9	0,70	0,001	226,3	0,69
100	0,001	423,2	1,30	0,001	427,0	1,30	0,001	434,5	1,29
200	0,001	854,3	2,33	0,001	855,6	2,32	0,001	860,6	2,30
300	0,046	2932	6,23	0,001	1345	3,25	0,001	1335	3,21
400	0,059	3200	6,66	0,027	3103	6,23	0,010	2830	5,58
500	0,070	3439	6,99	0,033	3382	6,62	0,015	3255	6,17
600	0,080	3672	7,28	0,039	3635	6,93	0,018	3555	6,54

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения:

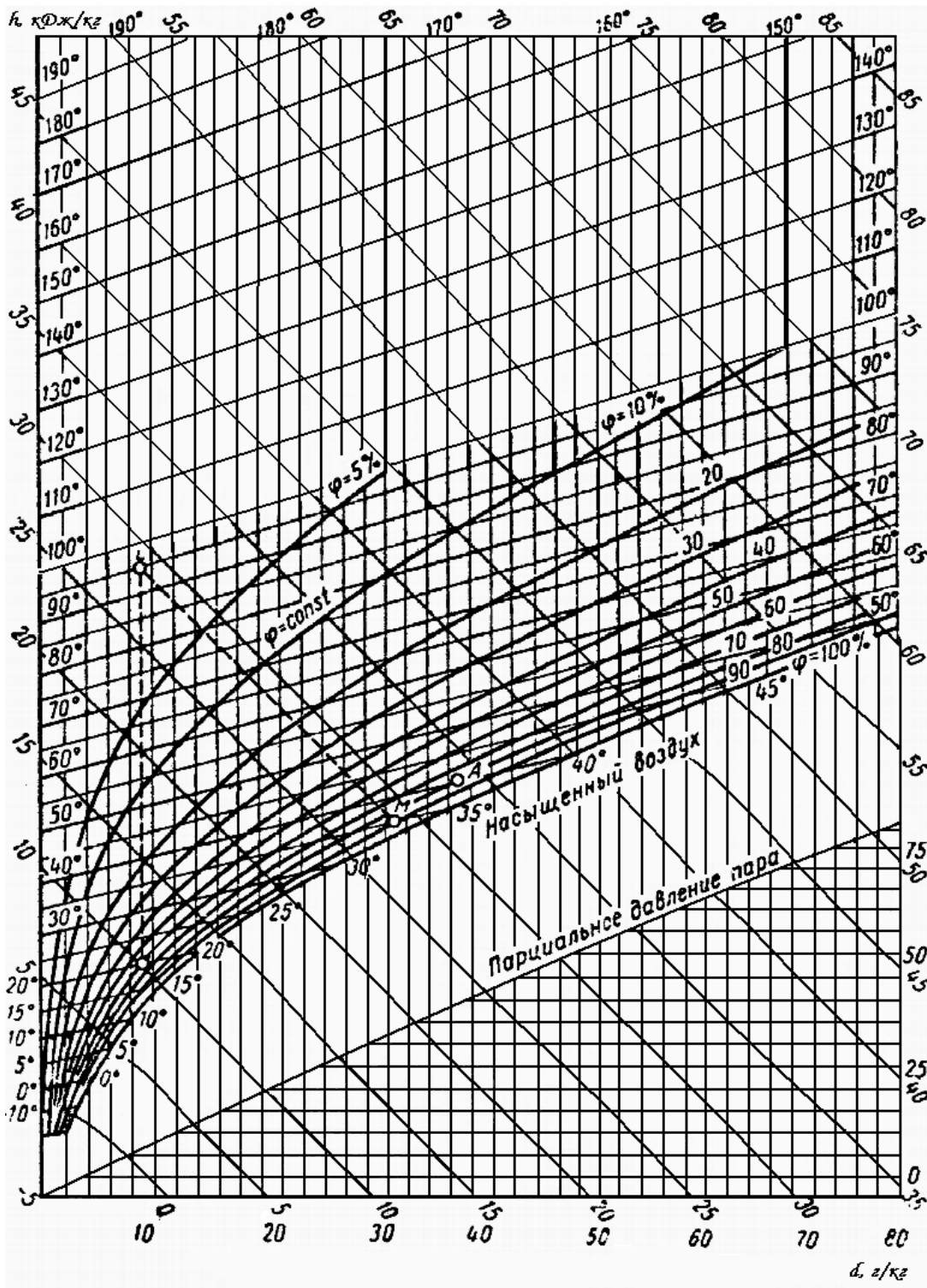
v'', v – удельный объем сухого насыщенного и перегретого пара, м<sup>3</sup>/кг;

h'', h – энтальпия сухого насыщенного и перегретого пара, кДж/кг;

s'', s – энтропия сухого насыщенного и перегретого пара, кДж/(кг·К).



Приложение Ж  
 h-d-диаграмма атмосферного воздуха



## Приложение К

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
223	1,584	1,013	2,04	9,23	0,728
233	1,515	1,013	2,12	10,04	0,728
243	1,453	1,013	2,20	10,80	0,723
253	1,395	1,009	2,28	12,79	0,716
263	1,342	1,009	2,36	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701
313	1,128	1,005	2,76	16,96	0,699
323	1,093	1,005	2,83	17,95	0,698
333	1,060	1,005	2,90	18,97	0,696
343	1,029	1,009	2,97	20,02	0,694
353	1,000	1,009	2,05	21,09	0,692
363	0,972	1,009	3,13	22,10	0,690
373	0,946	1,009	3,21	23,13	0,688
393	0,898	1,009	3,34	25,45	0,686
413	0,854	1,013	3,49	27,80	0,684
433	0,815	1,017	3,64	30,09	0,682
453	0,779	1,021	3,78	32,49	0,681
473	0,746	1,026	3,93	34,85	0,680
523	0,674	1,038	4,27	40,61	0,677
573	0,615	1,047	4,61	48,33	0,674

Продолжение приложения К

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda \cdot 10^2</math>, Вт/(м<sup>2</sup>·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
623	0,566	1,059	4,91	55,46	0,676
673	0,524	1,068	5,21	63,09	0,678
773	0,456	1,093	5,74	79,38	0,687
873	0,404	1,114	6,22	96,89	0,699
973	0,362	1,135	6,71	115,4	0,706
1073	0,329	1,156	7,18	134,8	0,713
1173	0,301	1,172	7,63	155,1	0,717
1273	0,277	1,185	8,07	177,1	0,719
1373	0,257	1,198	8,50	199,3	0,722
1473	0,239	1,210	9,15	223,7	0,724

## Приложение Л

### Физические параметры воды на линии насыщения

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>	<b><math>\beta \cdot 10^4</math>, К<sup>-1</sup></b>
273	999,9	4,212	0,551	1,789	13,67	- 0,63
283	999,7	4,191	0,575	1,306	9,52	+ 0,70
293	998,2	4,183	0,599	1,006	7,02	1,82
303	995,7	4,174	0,618	0,805	5,42	3,21
313	992,2	4,174	0,634	0,659	4,31	3,87
323	988,1	4,174	0,648	0,556	3,54	4,49
333	983,2	4,178	0,659	0,478	2,98	5,11
343	977,8	4,187	0,668	0,415	2,55	5,70
353	971,8	4,195	0,675	0,365	2,21	6,32
363	965,3	4,208	0,680	0,326	1,95	6,95
373	958,4	4,220	0,683	0,295	1,75	7,52
383	951,0	4,233	0,685	0,272	1,60	8,08
393	943,1	4,250	0,686	0,252	1,47	8,64
403	934,8	4,266	0,686	0,233	1,36	9,19
413	926,1	4,287	0,685	0,217	1,26	9,72
423	917,0	4,313	0,684	0,203	1,17	10,3
433	907,4	4,346	0,683	0,191	1,10	10,7
443	897,3	4,380	0,679	0,181	1,05	11,3
453	886,9	4,417	0,675	0,173	1,00	11,9
463	876,0	4,459	0,670	0,165	0,96	12,6
473	863,0	4,505	0,663	0,158	0,93	13,3
483	852,8	4,556	0,655	0,153	0,91	14,1
493	840,3	4,614	0,645	0,148	0,89	14,8

Продолжение приложения Л

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>	<b><math>\beta \cdot 10^4</math>, К<sup>-1</sup></b>
503	827,3	4,681	0,637	0,145	0,88	15,9
513	813,6	4,756	0,628	0,141	0,87	16,8
523	799,0	4,844	0,618	0,0,137	0,86	18,1
533	784,0	4,949	0,605	0,135	0,87	19,6
543	767,9	5,070	0,590	0,133	0,88	21,6
553	750,7	5,229	0,575	0,131	0,90	23,7
563	732,3	5,485	0,558	0,129	0,93	26,2
573	712,5	5,736	0,540	0,128	0,97	29,2
583	691,1	6,071	0,523	0,128	1,03	32,9
593	667,1	6,473	0,506	0,128	1,11	38,2
603	640,2	7,244	0,484	0,127	1,22	43,3
613	610,1	8,163	0,457	0,127	1,39	53,4
623	574,4	9,50	0,430	0,127	1,60	66,8
633	528,0	13,984	0,395	0,126	2,35	109
643	450,5	40,32	0,337	0,126	6,79	264

## Приложение М

### Теплофизические свойства некоторых металлов и материалов

Материал	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Алюминий 98,5%	0	2,70	0,879	201,2
	100	2,69	0,942	204,7
	300	2,65	1,038	230,3
	400	2,62	1,059	318,7
	500	2,58	1,101	374,5
А12 Al+12%Si	20	2,70	0,879	176,0
	100	2,69	0,942	196,5
	200	-	-	210,5
	300	2,65	1,038	245,4
	400	2,62	1,059	289,6
Сталь 08	100	-	-	80,2
	300	-	-	60,7
	600	-	-	37,9
Сталь 10	100	7,86	0,465	69,2
	400	-	0,511	51,6
	600	-	0,565	45,7
Сталь 15	100	7,86	-	65,8
	400	-	-	48,5
1X18H9T	100	7,9	0,502	16,0
	400	-	-	20,8
	800	-	-	27,6
Медь	20	8,93	0,381	395
	900	8,62	0,482	321
Асбест	0	0,1	0,837	0,060
Стекловата	30	0,14	0,670	0,049
Минеральная вата	30	0,14	0,837	0,054

## Приложение Н

### Степень черноты для различных материалов

Наименование материала	t°С	Степень черноты
Алюминий полированный	50 — 500	0,04 – 0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20 — 50	0,06 – 0,07
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая шероховатая	50 — 150	0,55
Вольфрам	1500 — 2200	0,24 – 0,31
Железо оцинкованное листовое блестящее	30	0,23
Жесть белая старая	20	0,28
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Медь полированная	50 — 100	0,02
Медь окисленная	500	0,88
Молибден	1500 — 2200	0,19 – 0,26
Никелевая проволока	200 — 1000	0,1 - 0,2
Нихромовая проволока чистая	50	0,65
Платиновая проволока	50 - 200	0,06 – 0,07
Платиновая проволока	1400	0,18
Серебро чистое полированное	200 - 600	0,02 – 0,03
Сталь листовая шлифованная	950 - 1100	0,55 – 0,61
Стальное литье полированное	750 - 1050	0,52 – 0,56
Сталь с шероховатой поверхностью	50	0,56
Хром полированный	500 - 1000	0,28 – 0,38
Цинк листовой	50	0,2
Чугун жидкий	1300	0,28

Продолжение приложения Н

Наименование материала	t°С	Степень черноты
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовый картон	20	0,96
Асбошифер	20	0,96
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Смоченная металлическая поверхность	20	0,98
Кирпич огнеупорный	500 - 1000	0,8 – 0,9
Кирпич шамотный	1000	0,75
Кирпич шамотный	1200	0,59
Кирпич огнеупорный динасовый	1000	0,66
Кирпич огнеупорный корундовый	1000	0,46
Кирпич красный шероховатый	20	0,88 – 0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Лак черный матовый	40 - 100	0,96 – 0,98
Лак белый	40 - 100	0,8 – 0,95
Мрамор сероватый полированный	20	0,93
Резина мягкая серая шероховатая	20	0,86
Сажа ламповая	20 - 400	0,95
Сажа с жидким стеклом	20 - 200	0,96
Стекло	250 - 1000	0,87 – 0,72
Стекло	1100 - 1500	0,7 – 0,67
Снег	-	0,96
Толь	20	0,91 – 0,93
Шлаки котельные	200 - 500	0,89 – 0,78
Эмаль белая	20	0,9



## Литература

1 Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под ред. Б.Н. Юдаева. – М.: Высш. школа, 1964. – 372 с.

2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 376 с.

3 Кириллин В.А., Шейндмин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Задачник по технической термодинамике. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 256 с.

4 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1970. – 624 с.

5 Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идиатуллин Н.С., Толкачев Д.Ф. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче. – М.: Высш. школа, 1972.- 304 с.

## Содержание

1	Техническая термодинамика . . . . .	3
1.1	Параметры состояния рабочего тела . . . . .	3
1.2	Основные газовые законы . . . . .	12
1.3	Смеси идеальных газов . . . . .	24
1.4	Теплоемкость газов . . . . .	31
1.5	Первый закон термодинамики . . . . .	43
1.6	Основные термодинамические процессы . . . . .	55
1.7	Второй закон термодинамики . . . . .	86
1.8	Круговые процессы . . . . .	96
1.9	Истечение газов и паров. Дросселирование . . . . .	118
1.10	Пары. Водяной пар . . . . .	133
1.11	Влажный воздух . . . . .	164
2	Теплопередача . . . . .	177
2.1	Теплопроводность . . . . .	177
2.2	Конвективный теплообмен . . . . .	194
2.3	Лучистый теплообмен . . . . .	218
	Приложение А. Физические постоянные некоторых газов . . . . .	233
	Приложение Б. Средняя теплоемкость газов в интервале температур от 0 до $t$ . . . . .	234
	Приложение В. Средняя теплоемкость газов (линейная зависимость) . . . . .	240
	Приложение Г. $h_s$ -диаграмма водяного пара . . . . .	242
	Приложение Д. Физические свойства воды и водяного пара . . . . .	243

Приложение Е. Термодинамические свойства воды и перегретого пара . . . . .	247
Приложение Ж. $h$ -диаграмма атмосферного воздуха . . . . .	249
Приложение К . Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па . . . . .	250
Приложение Л. Физические параметры воды на линии насыщения . . . . .	252
Приложение М. Теплофизические свойства некоторых металлов и материалов . . . . .	254
Приложение Н. Степень черноты для различных материалов . . . . .	255
Литература . . . . .	257

**Учебное издание**

**Л.В. ДЕМЕНТИЙ, А.А. КУЗНЕЦОВ, Ю.В. МЕНАФОВА**

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ  
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

Редактор Хахина Нелли Александровна

138 / 2002

Подп. в печ.

Формат 60x90 1 / 16.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 16,25

Уч.-изд. л. 11,82

Тираж 100 экз. Заказ №

---

ДГМА. 84313, Краматорск, ул. Шкадинова, 72

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**Л.В. ДЕМЕНТИЙ, А.А. КУЗНЕЦОВ, Ю.В. МЕНАФОВА**

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ  
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений  
машиностроительных специальностей

Краматорск 2002

УДК 621.1.016  
ББК 31.31

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений  
машиностроительных специальностей  
(письмо заместителя министра от 29.03.2001 № 2/427)

Рецензенты:

В.Г. Бойко – кандидат технических наук, доцент кафедры  
прикладной математики и вычислительной техники (Краматорский  
экономико-гуманитарный институт);

А.П. Авдеенко – кандидат химических наук, профессор  
кафедры химии и охраны труда (Донбасская государственная  
машиностроительная академия)

Дементий Л.В., Кузнецов А.А., Менафова Ю.В. Сборник задач  
по технической термодинамике и теплопередаче. – Краматорск: ДГМА,  
2002. - 260 с.

ISBN 5-7763-2069-0

Сборник задач содержит краткий теоретический материал и  
примеры решения основных типов задач по разделам «Основы  
технической термодинамики» и «Теплопередача». В пособии  
приведены более 300 задач с ответами.

Сборник может быть использован при изучении курса  
«Теоретические основы теплотехники» студентами дневного и  
заочного отделений машиностроительных специальностей.

ISBN 5-7763-2069-0



Л.В. Дементий, А.А. Кузнецов,  
Ю.В. Менафова, 2002 г.

# 1 ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

## 1.1 Параметры состояния рабочего тела

**Удельный объем** ( $v$ ) тела представляет собой объем единицы его массы,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где  $V$  - объем, занимаемый телом,  $\text{м}^3$ ;

$m$  – масса тела,  $\text{кг}$ .

**Плотность** ( $\rho$ ) - величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

**Давление** ( $P$ ) - сила, приходящаяся на единицу площади поверхности, единицы измерения – ньютон на квадратный метр, паскаль. Эта единица очень мала. Для практических целей удобнее использовать более крупные величины:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}; 1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}; 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

На практике часто используют внесистемные единицы:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10\,000 \text{ мм вод. ст.} = 98,0665 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 10\,332 \text{ мм вод. ст.} = 101,325 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

Термодинамическим параметром является абсолютное давление  $P_{\text{абс}}$ , которое определяется из соотношений:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{атм}}$  — атмосферное или барометрическое давление, измеряемое барометром;

$P_{\text{изб}}$  — избыточное давление, измеряемое манометром;

$P_{\text{вак}}$  — вакуумметрическое давление (разряжение), измеряемое вакуумметром.

При измерении давления высотой ртутного столба следует иметь в виду, что показание прибора зависит от температуры. Это учитывается приведением высоты столба ртути к  $0^\circ\text{C}$  по следующему соотношению:

$$P_0 = P_t(1 - 0,000172 t), \quad (5)$$

где  $P_0$  - показание прибора, приведенное к  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$P_t$  - действительная высота ртутного столба при температуре воздуха  $t^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

0,000172 - коэффициент объемного расширения ртути.

При удалении от поверхности земли атмосферное давление понижается. В пределах тропосферы (до высоты 11000 м) закон падения давления выражается формулой

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{h}{44300} \right)^{5,256}, \quad (6)$$

где  $P$  - барометрическое давление в верхних слоях атмосферы при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$P_0$  - барометрическое давление на уровне моря при температуре ртути  $0^\circ\text{C}$ , мм рт. ст.;

$h$  - высота над уровнем моря, м.

**Температура** характеризует степень нагретости тела и является количественной мерой интенсивности теплового движения молекул. Ее измеряют либо по термодинамической температурной шкале, либо по международной практической температурной шкале. В



качестве точки отсчета взята тройная точка воды (температура, при которой все три фазы воды - твердая, жидкая и газообразная - находятся в равновесии), которой присвоены значения 273,16 К и 0,01 °С. Нижним пределом шкалы является абсолютный нуль (температура, при которой прекращается тепловое движение молекул).

Температуру по международной практической температурной шкале, отсчитываемую от 0 °С, обозначают через  $t$  (единица измерения – градус Цельсия), а температуру по абсолютной шкале, отсчитываемую от температуры абсолютного нуля, обозначают через  $T$  и называют абсолютной температурой (единица измерения - кельвин).

Зависимость между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия следующая:

$$T = t + 273,15. \quad (7)$$

Для измерения температуры применяют также шкалу Фаренгейта (°F), Реомюра (°R), Ренкина (°Ra). Соотношения между ними:

$$t \text{ } ^\circ\text{F} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 32; \quad t \text{ } ^\circ\text{R} = 0,8 t \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t \text{ } ^\circ\text{Ra} = 1,8 t \text{ } ^\circ\text{C} + 273. \quad (8)$$

Под нормальными физическими условиями понимается состояние рабочего вещества при давлении  $P_{\text{абс}} = 760$  мм рт. ст. и температуре 0 °С. Если объем газа приведен к нормальным условиям, то его принято обозначать  $V_n$ .

### Примеры решения задач

1 Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм при 0 °С. Выразить это давление в барах и паскалях.

Решение:

1 мм рт. ст. = 133,3 Па; 770 мм рт. ст. = 102700 Па = 1,027 бар.

2 Определить абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает  $P=1,3$  бар, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 680 мм при  $t = 25^\circ\text{C}$ .

Решение:

Показание барометра получено при температуре  $t = 25^\circ\text{C}$ . Это показание необходимо привести к  $0^\circ\text{C}$  по уравнению (5):

$$P_0 = P_t (1 - 0,000172 t) = 680 \cdot 0,9957 = 677,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление пара в котле по формуле (3)

$$P_{\text{абс}} = 130000 + 677,1 \cdot 133,3 = 0,22 \text{ МПа.}$$

3 Давление в паровом котле  $P = 0,4$  бар при барометрическом давлении 725 мм рт. ст. Чему будет равно избыточное давление в котле, если показание барометра повысится до 785 мм рт. ст., а состояние пара в котле останется прежним? Барометрическое давление приведено к  $0^\circ\text{C}$ .

Решение:

Абсолютное давление в котле

$$P_{\text{абс}} = 400000 + 725 \cdot 133,3 = 136642 \text{ Па.}$$

Избыточное давление при показании барометра 785 мм рт. ст.

$$P_{\text{изб}} = 136642 - 785 \cdot 133,3 = 32000 \text{ Па.}$$

4 Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разрежение 420 мм при температуре ртути в вакуумметре  $t = 20^\circ\text{C}$ . Давление атмосферы по ртутному барометру 768 мм при температуре  $t = 18^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.

Решение:

Приводим показания вакуумметра и барометра к температуре ртути 0 °С по уравнению (5):

$$P_{\text{вак}} = 420 (1 - 0,000172 \cdot 20) = 418,5 \text{ мм рт. ст.}$$

$$P_{\text{атм}} = 768 (1 - 0,000172 \cdot 18) = 765,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление в сосуде по формуле (4)

$$P_{\text{абс}} = 765,6 - 418,5 = 347,1 \text{ мм рт. ст.} = 46,3 \text{ кПа.}$$

5 Водяной пар перегрет на 45°С. Чему соответствует этот перегрев по термометру Фаренгейта?

Решение:

При переводе разности температур, выраженной градусами шкалы Цельсия, в градусы Фаренгейта и наоборот надо исходить только из цены деления того и другого термометров. Поэтому формула (8) принимает следующий вид:

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot \Delta t^{\circ}\text{C} + 32.$$

Следовательно, для нашего случая

$$\Delta t^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot 45 + 32 = 113^{\circ}\text{F}.$$

### Задачи

1 Масса 1 м<sup>3</sup> метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

$$\text{Ответ: } \rho = 0,7 \text{ кг/м}^3; v = 1,429 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2 Плотность воздуха при определенных условиях равна 1,293 кг/м<sup>3</sup>. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

$$\text{Ответ: } v = 0,773 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3 В сосуде объемом  $0,9 \text{ м}^3$  находится  $1,5 \text{ кг}$  окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Ответ:  $v = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho = 1,67 \text{ кг/м}^3$ .

4 Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, равно  $765 \text{ мм}$  при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Выразить давление в барах.

Ответ:  $P = 1,02 \text{ бар}$ .

5 Определить абсолютное давление газа в сосуде, если показание ртутного манометра равно  $500 \text{ мм рт. ст.}$ , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $750 \text{ мм}$ . Температура воздуха в месте установки приборов равна  $0^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P_{\text{абс}} = 1,667 \text{ бар} = 0,1667 \text{ МПа}$ .

6 Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает  $2,45 \text{ бар}$ , а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $700 \text{ мм}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,38 \text{ бар}$ .

7 Какой высоте водяного столба соответствует  $1 \text{ мм рт. ст.}$ ?

Ответ:  $h = 13,6 \text{ мм вод. ст.}$

8 Какой высоте водяного столба соответствует давление равное  $1 \text{ кгс/м}^2$ ?

Ответ:  $h = 1 \text{ мм вод. ст.}$

9 Определить абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно  $705 \text{ мм рт. ст.}$ , а показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ\text{C}$ ,  $747 \text{ мм}$ . Температура воздуха в месте установки приборов  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 5900 \text{ Па}$ .

10 Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Длина столба воды, отсчитанная по шкале, 160 мм. Определить абсолютное давление газов, если показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ\text{C}$  составляет, 740 мм.

Ответ:  $P = 734,1$  мм рт. ст.

11 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 580 мм при температуре ртути  $25^\circ\text{C}$ , а высота столба воды над ртутью - 150 мм. Атмосферное давление по ртутному барометру равно 770 мм при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 1,81$  бар.

12 В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет 570 мм при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Над ртутью находится столбик воды высотой 37 мм. Барометрическое давление воздуха составляет 728 мм рт. ст. при  $15^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.

Ответ:  $P = 155,4$  мм рт. ст.

13 Для измерения расхода жидкостей и газов используют дроссельные диафрагмы. Вследствие дросселирования жидкости при прохождении через диафрагму давление ее за диафрагмой всегда меньше, чем перед ней. По разности давлений перед и за диафрагмой, измеряемой дифференциальным U-образным манометром, можно определить массовый расход жидкости (килограмм в секунду) по формуле

$$G = a f \sqrt{2(P_1 - P_2) \rho},$$

где  $a$  - коэффициент расхода, определяемый экспериментально: при ламинарном режиме -  $a = 0,5$ ; при турбулентном –  $a = 0,5 - 0,82$ ;

$f$  - площадь входного отверстия диафрагмы,  $m^2$ ;

$P_1 - P_2$  - перепад давления на диафрагме, Па;

$\rho$  - плотность жидкости, протекающей по трубе,  $kg/m^3$ .

Определить массовый расход воды, измеренный при помощи дроссельного устройства, если  $a = 0,8$ ; показание дифференциального манометра 84 мм рт. ст.;  $\rho = 1000 kg/m^3$ , а диаметр входного отверстия диафрагмы 10 мм.

Ответ:  $G = 1,89 kg/c$ .

14 Присоединенный к газоходу парового котла тягомер показывает разрежение, равное 80 мм вод. ст. Определить абсолютное давление дымовых газов, если показание барометра при температуре  $0^\circ C$  равно 770 мм рт. ст.

Ответ:  $P = 764,1$  мм рт. ст.

15 Тягомер показывает разрежение в газоходе, равное 42 мм вод. ст. Атмосферное давление по ртутному барометру 757 мм рт. ст. при  $t = 15^\circ C$ . Определить абсолютное давление дымовых газов.

Ответ:  $P = 751,95$  мм рт. ст.

16 Определить абсолютное давление в газоходе котельного агрегата при помощи тягомера с наклонной трубкой. Жидкость, используемая в тягомере, спирт с плотностью  $\rho = 800 kg/m^3$ . Отсчет по наклонной шкале 200 мм. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Барометрическое давление 745 мм рт. ст. (приведено к  $0^\circ C$ ).

Ответ:  $P = 739$  мм рт. ст.

17 Температура пара, выходящего из перегревателя парового котла, равна  $950^\circ F$ . Перевести эту температуру в  $^\circ C$ .

Ответ:  $t = 510^\circ C$ .

18 Какая температура в градусах Фаренгейта соответствует абсолютному нулю?

Ответ:  $t = - 459^{\circ}\text{F}$ .

19 Определить барометрическое давление на высоте 9500 м, если известно, что давление на уровне моря составляет 740 мм рт. ст. при  $15^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $P = 0,276 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

20 Барометр, находящийся при  $0^{\circ}\text{C}$ , показывает, что на уровне моря давление составляет 757 мм рт. ст. Барометр, установленный на борту самолета, показывает давление в 3,7 раза меньше давления на уровне моря. Оценить высоту полета самолета.

Ответ:  $h = 9750 \text{ м}$ .

21 Манометр показывает, что давление в баллоне, заполненном кислородом, составляет 40 ат. Определить избыточное давление кислорода в баллоне при подъеме его на высоту 6000 м, если барометрическое давление на уровне моря 770 мм рт. ст. при температуре окружающей среды  $30^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,97 \text{ МПа}$ .

22 Определить давление на нижнее днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если указанное днище находится на глубине 15,5 м, а давление атмосферы, измеренное ртутным барометром при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , составляет 755 мм рт. ст.

Ответ:  $P = 0,253 \text{ МПа}$ .

23 В помещении, где установлена барокамера, давление по водяному манометру 50 мм вод. ст. Барометр, установленный вне помещения, показывает 750 мм рт. ст. при  $30^{\circ}\text{C}$ . В барокамере создан вакуум 180 мм рт. ст. Найти абсолютное давление в барокамере.

Ответ:  $P = 76 \text{ кПа}$ .

## 1.2 Основные газовые законы

**Закон Бойля-Мариотта:** если температура газа не изменяется ( $T = \text{const}$ ), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью:

$$P v = \text{const} . \quad (9)$$

**Закон Гей-Люссака:** если давление газа остается постоянным ( $P = \text{const}$ ), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой представляет:

$$\frac{v}{T} = \text{const} \quad (10)$$

или

$$\rho T = \text{const} . \quad (11)$$

Для газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, имеет место следующая зависимость, полученная на основе **закона Авогадро:**

$$\frac{\mu}{\rho} = \text{const} , \quad (12)$$

где  $\mu$  — молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Для нормальных условий объем 1 кмоль всех идеальных газов равен  $22,4136 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  (округленно  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ).

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} . \quad (13)$$

Пользуясь этой формулой, можно определить удельный объем любого газа при нормальных условиях:



$$v_H = \frac{22,4}{\mu}. \quad (14)$$

Характеристическое **уравнение идеального газа** или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния — давление, объем и температуру — и может быть представлено следующими уравнениями:

$$P V = m R T; \quad (15)$$

$$P v = R T; \quad (16)$$

$$P V_\mu = \mu R T; \quad (17)$$

В уравнениях (15) — (17) приняты следующие обозначения:

$P$  — абсолютное давление газа, Па;

$V$  — объем газа, м<sup>3</sup>;

$m$  — масса газа, кг;

$v$  — удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;

$V_\mu$  — объем 1 кмолья газа, м<sup>3</sup>/кмоль;

$R$  — газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$R_\mu$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К),

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным количествам газа: первое - к произвольной массе  $m$  кг; второе - к 1 кг, третье – к 1 кмолью газа.

Численное значение универсальной газовой постоянной легко получить из уравнения (17) при подстановке значений входящих в него величин при нормальных условиях:

$$\mu R = \frac{P V_\mu}{T} = \frac{101\,325 \cdot 22,4136}{273,15} = 8314 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Газовая постоянная определяется из уравнения

$$R = \frac{8314}{\mu}, \quad (18)$$

где  $\mu$  - масса 1 кмольа газа в килограммах (численно равная молекулярной массе газа), кг/кмоль.

В приложении А приведены молекулярные массы, плотности и газовые постоянные важнейших для техники газов.

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний какого либо газа, можно получить выражение для определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2}; \quad (19)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}. \quad (20)$$

Уравнение (20) часто применяют для «приведения объема к нормальным условиям», т. е. для определения объема, занимаемого газом, при  $t = 0^\circ\text{C}$  и  $P = 760$  мм рт. ст., если объем его при каких-либо значениях  $P$  и  $t$  известен. Для этого случая уравнение (20) обычно представляют в следующем виде:

$$\frac{P V}{T} = \frac{P_H V_H}{T_H}. \quad (21)$$

В правой части уравнения все величины взяты при нормальных условиях, в левой — при произвольных значениях давления и температуры.

Уравнение (19) можно написать и следующим образом:

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}. \quad (22)$$

Уравнение (22) позволяет определить плотность газа при любых условиях, если значение его для определенных условий известно.

## Примеры решения задач

6 Какой объем занимает 1 кг азота при температуре 70 °С и давлении 0,2 МПа.

Решение:

Из характеристического уравнения для 1 кг газа (16) имеем:

$$v = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{296,8 \cdot (273 + 70)}{0,2 \cdot 10^6} = 0,509 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

7 Во сколько раз объем определенной массы газа при -20 °С меньше, чем при +20 °С, если давление в обоих случаях одинаковое?

Решение:

При постоянном давлении объем газа изменяется по уравнению (10):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ следовательно, } \frac{V_2}{V_1} = \frac{273 + 20}{273 - 20} = 1,16.$$

8 Определить массу 5 м<sup>3</sup> водорода, 5 м<sup>3</sup> кислорода и 5 м<sup>3</sup> углекислоты при давлении 6 бар и температуре 100 °С.

Решение:

Характеристическое уравнение для произвольного количества газа (15) -

$$P V = m R T.$$

Значение газовой постоянной берем из таблицы (приложение А).

Получаем:

$$R_{H_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); R_{O_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$R_{CO_2} = 188,9 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Следовательно,

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 5}{R \cdot 373} = \frac{8042,8}{R}.$$

Отсюда:

$$m_{H_2} = \frac{8042,8}{4124} = 1,95 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = \frac{8042,8}{259,8} = 30,9 \text{ кг};$$

$$m_{CO_2} = \frac{8042,8}{189} = 42,6 \text{ кг}.$$

9 Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при 15°C. После расходования части кислорода давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10°C. Определить массу израсходованного кислорода.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$m = P \cdot V / (R \cdot T).$$

Следовательно, начальная и конечная масса кислорода соответственно равны:

$$m_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг}; \quad m_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг}.$$

Таким образом, расход кислорода

$$\Delta m = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг}.$$

10 Сосуд емкостью 10 м<sup>3</sup> заполнен 25 кг углекислого газа. Определить абсолютное давление в сосуде, если температура в нем 27°C.

Решение:

Из характеристического уравнения (15) имеем:

$$P = \frac{m R T}{V} = \frac{25 \cdot 189 \cdot 300}{10} = 141700 \text{ Па}.$$

11 Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если объем его равен  $1 \text{ м}^3$  при давлении 750 мм рт. ст. и температуре  $15^\circ\text{C}$ .

Решение:

На поверхности земли подъемная сила воздушного шара, наполненного водородом, равна разности сил тяжести (весов) воздуха и водорода в объеме шара:

$$N = N_{\text{возд}} - N_{\text{H}_2} = m_{\text{возд}} g - m_{\text{H}_2} g = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}),$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение силы тяжести на уровне земли.

Значения плотностей воздуха и водорода могут быть определены из уравнения состояния (16) :

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{P}{R T}.$$

Значения газовых постоянных могут быть легко вычислены или взяты из таблицы (приложение А):

$$R_{\text{возд}} = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}; R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Так как давление водорода и воздуха равно 750 мм рт. ст., то

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{287 \cdot 288} = 1,210 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{H}_2} = \frac{1 \cdot 750 \cdot 133,3}{4124 \cdot 288} = 0,084 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, подъемная сила шара

$$\Delta G = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}) = 9,81 \cdot 1 \cdot (1,210 - 0,084) = 11,1 \text{ Н}.$$

12 Какова будет плотность окиси углерода при  $20^\circ\text{C}$  и давлении 710 мм рт. ст., если при  $0^\circ\text{C}$  и 760 мм рт. ст. она равна  $1,251 \text{ кг/м}^3$ ?

Решение:

Согласно уравнению (22) 
$$\rho_2 = \rho_1 \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно, 
$$\rho_2 = 1,251 \frac{710}{760} \frac{273}{273 + 20} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

## Задачи

24 Определить плотность окиси углерода при давлении 1 бар и температуре 15°C.

Ответ:  $\rho = 1,169 \text{ кг/м}^3$ .

25 Определить плотность и удельный объем двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) при нормальных условиях.

Ответ:  $\rho_n = 1,964 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_n = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

26 Определить удельный объем кислорода при температуре 280°C и давлении 23 бар.

Ответ:  $v = 0,0625 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

27 Чему равна плотность воздуха при давлении 15 бар и температуре 20°C, если плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,293 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ:  $\rho = 17,82 \text{ кг/м}^3$ .

28 Определить массу углекислого газа, содержащегося в сосуде объемом 4 м<sup>3</sup> при  $t = 80^\circ\text{C}$ . Давление газа по манометру равно 0,4 бар. Барометрическое давление 780 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 8,6 \text{ кг}$ .

29 В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 5 бар. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 8 бар температура воздуха не изменилась?

Ответ:  $V = 0,5 \text{ м}^3$ .

30 Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с 1200 до 250°C. Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаково?

Ответ: в 2,82 раза.

31 При какой температуре плотность азота (давлении 1,5 МПа) будет равна  $3 \text{ кг/м}^3$  ?

Ответ:  $t = 1422^\circ\text{C}$ .

32 Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра от  $P_1 = 18$  бар уменьшится до  $P_2 = 3$  бар? Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ:  $P_2 = 1/6 P_1$ .

33 В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором  $130\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $30^\circ\text{C}$ .

Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если нагрев его производится до  $400^\circ\text{C}$  при постоянном давлении.

Ответ:  $V = 288700 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

34 Определить газовую постоянную для кислорода, водорода и метана ( $\text{CH}_4$ ).

Ответ:  $R_{\text{O}_2} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
 $R_{\text{CH}_4} = 518,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

35 Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60 л, если давление кислорода по манометру равно 10,8 бар, а показание ртутного барометра — 745 мм рт. ст. при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $m = 0,91 \text{ кг}$ .

36 В сосуде находится воздух под разрежением 75 мм рт. ст. при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Ртутный барометр показывает 748 мм при температуре ртути  $20^\circ\text{C}$ . Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

Ответ:  $v = 0,876 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

37 Какой объем будут занимать 11 кг воздуха при давлении 0,44 МПа и температуре 18°C?

Ответ:  $V = 2,088 \text{ м}^3$ .

38 В цилиндре диаметром 60 см содержится 0,41 м<sup>3</sup> воздуха при  $P = 2,5$  бар и  $t_1 = 35$  °С. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 40 см?

Ответ:  $t_2 = 117,6$  °С.

39 В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр 0,6 м и высоту 2,4 м, находится воздух при температуре 18°C. Давление воздуха составляет 7,65 бар. Барометрическое давление (приведенное к нулю) равно 764 мм рт. ст. Определить массу воздуха в сосуде.

Ответ:  $m = 7,04$  кг.

40 В сосуде объемом 0,5 м<sup>3</sup> находится воздух при давлении 0,2 МПа и температуре 20°C. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило 420 мм рт. ст. при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно 768 мм при температуре ртути в нем, равной 18°C; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути 20°C.

Ответ:  $m = 1,527$  кг.

41 Резервуар объемом 4 м<sup>3</sup> заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа 0,4 бар, температура его 80°C, а барометрическое давление воздуха 780 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 8,64$  кг;  $N = 84,8$  Н.



42 Определить плотность и удельный объем водяного пара при нормальных условиях, принимая условно, что в этом состоянии пар будет являться идеальным газом.

Ответ:  $\rho_n = 0,804 \text{ кг/м}^3$ ;  $v = 1,243 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

43 Какой объем занимают 10 кмоль азота при нормальных условиях?

Ответ:  $V = 224 \text{ м}^3$ .

44 Какой объем занимает 1 кмоль газа при давлении 2 МПа и температуре 200 °С?

Ответ:  $v = 1,97 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .

45 При какой температуре 1 кмоль газа занимает объем 4 м<sup>3</sup>, если давление газа  $P = 1 \text{ кПа}$ ?

Ответ:  $t = 198 \text{ °С}$ .

46 Какова будет плотность кислорода при температуре 0 °С и давлении 600 мм рт. ст., если при 760 мм рт. ст. и 15 °С она равна 1,310 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ:  $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$ .

47 Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает резервуар при 10 °С, чем при 50 °С, если давление остается неизменным?

Ответ: в 1,14 раза.

48 Баллон емкостью 0,9 м<sup>3</sup> заполнен воздухом при температуре 17 °С. Присоединенный к нему вакуумметр показывает разрежение 600 мм рт. ст. Определить массу воздуха в баллоне, если показание барометра равно 740 мм рт. ст.

Ответ:  $m = 0,2018 \text{ кг}$ .

49 Масса пустого баллона для кислорода емкостью 50 л равно 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  до давления 100 бар.

Ответ:  $m = 86,57$  кг.

50 Для автогенной сварки привезен баллон кислорода вместимостью 100 л. Определить массу кислорода, если его давление 12 МПа и температура  $16^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $m = 16$  кг.

51 Определить необходимый объем аэростата, наполненного водородом, если подъемная сила, которую он должен иметь на максимальной высоте  $H = 7000$  м, равна 39 240 Н. Параметры воздуха на указанной высоте принять равными:  $P = 0,41$  бар,  $t = -30^\circ\text{C}$ .

Насколько уменьшится подъемная сила аэростата при заполнении его гелием? Чему равен объем аэростата  $V_2$  на поверхности земли при давлении 0,981 бар и температуре  $30^\circ\text{C}$ ?

Ответ:  $V_1 = 7311$  м<sup>3</sup>;  $\Delta H = -177$  Н;  $V_2 = 3738$  м<sup>3</sup>.

52 Сжатый воздух в баллоне имеет температуру  $15^\circ\text{C}$ . Во время пожара температура воздуха в баллоне поднялась до  $450^\circ\text{C}$ .

Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа? Начальное давление 4,8 МПа.

Ответ: да.

53 Сосуд емкостью 4,2 м<sup>3</sup> наполнен 15 кг окиси углерода. Определить давление в сосуде, если температура газа в нем  $t = 27^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $P = 3,18$  бар.

54 Воздух, заключенный в баллон емкостью 0,9 м<sup>3</sup>, выпускают в атмосферу. Температура его в начале равна  $27^\circ\text{C}$ . Определить массу выпущенного воздуха, если начальное давление в баллоне

составляло 93,2 бар, после выпуска — 42,2 бар, а температура воздуха снизилась до 17°C.

Ответ:  $m = 51,8$  кг.

55 По трубопроводу протекает 10 м<sup>3</sup>/с кислорода при температуре 127°C и давлении 4 бар. Определить массовый расход газа в секунду.

Ответ:  $G = 33,5$  кг/с.

56 Поршневой компрессор всасывает в минуту 3 м<sup>3</sup> воздуха при температуре 17°C и барометрическом давлении 750 мм рт. ст., нагнетает его в резервуар, объем которого равен 8,5 м<sup>3</sup>. За сколько минут компрессор поднимает давление в резервуаре до 7 бар, если температура в нем будет оставаться постоянной? Начальное давление воздуха составляло 750 мм рт. ст. при температуре 17°C.

Ответ: за 17 мин.

57 Дутьевой вентилятор подает в топку парового котла воздух в количестве 102000 м<sup>3</sup>/ч при 300°C и давлении 155 мм вод. ст. Барометрическое давление воздуха в помещении 755 мм рт. ст. Определить часовую производительность вентилятора в кубических метрах (при нормальных условиях).

Ответ:  $V = 48\,940$  м<sup>3</sup>/ч.

58 Компрессор подает воздух в резервуар. За время работы компрессора давление в резервуаре повышается от атмосферного до 7 бар, а температура — от 20 до 25°C. Объем резервуара - 56 м<sup>3</sup>. Барометрическое давление, приведенное к 0°C, равно 750 мм рт. ст. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар.

Ответ:  $m = 391,7$  кг.

### 1.3 Смеси идеальных газов

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан **массовыми** ( $g_i$ ) или **объемными** ( $r_i$ ) долями:

$$g_i = \frac{m_i}{m}; \quad r_i = \frac{v_i}{v}, \quad (23)$$

где  $m_i$  — массы отдельных газов;

$m$  — масса всей смеси;

$v_i$  — приведенные объемы (объем каждого компонента отнесен к давлению и температуре смеси) компонентов газов, входящих в смесь;

$v$  — общий объем газовой смеси.

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

Для перевода массовых долей в объемные пользуются формулой

$$r_i = \frac{g_i R_i}{R_{см}}, \quad (24)$$

где  $R_{см}$  - газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К);

$R_i$  - газовая постоянная отдельных компонентов, входящих в смесь, Дж/(кг·К).

Перевод объемных долей в массовые производится по формуле

$$g_i = \frac{r_i R_{см}}{R_i}. \quad (25)$$

**Плотность смеси**  $\rho_{см}$  определяется из выражения

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i \quad (26)$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}, \quad (27)$$

где  $\rho_i$  - плотность отдельных компонентов, входящих в смесь, кг/м<sup>3</sup>.

**Молекулярная** (мольная) **масса** газовой смеси  $\mu_{см}$  определяется по формуле

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n (r_i \mu_i), \quad (28)$$

где  $\mu_i$  - мольная масса компонентов, входящих в смесь, кг/кмоль.

**Газовую постоянную** смеси газов  $R_{см}$  можно выразить либо через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, либо через молекулярную массу смеси

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n (g_i R_i), \quad \text{или} \quad (29)$$

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n (r_i \mu_i)}. \quad (30)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью (закон Дальтона):

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (31)$$

где  $P$  — общее давление газовой смеси;

$P_i$  — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

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

$$P_i = P r_i, \quad (32)$$

где  $P_i$  — парциальное давление любого газа, входящего в смесь.

### Примеры решения задач

13 Массовые доли кислорода и азота в атмосферном воздухе соответственно равны 0,232 и 0,768. Определить объемные доли кислорода и азота, газовую постоянную и молекулярную массу воздуха, парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру 760 мм рт. ст.

Решение:

Пересчет массовых долей в объемные осуществляется по уравнению (24). Газовая постоянная воздуха определяется по уравнению (29):

$$R_{\text{см}} = g_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Газовые постоянные кислорода и азота взяты из приложения А.

Теперь можно рассчитать объемные доли компонентов смеси:

$$r_{\text{O}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,232 \cdot 259,8}{287} = 0,21,$$

$$r_{\text{N}_2} = \frac{g_i R_i}{R_{\text{см}}} = \frac{0,768 \cdot 296,8}{287} = 0,79.$$

Молекулярная масса смеси определяется из уравнения (28):

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9 \text{ кг/кмоль}$$

или из уравнения (30):

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

Парциальные давления определяем из уравнения (32):

$$P_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} P = 0,21 \cdot 760 = 159,6 \text{ мм рт. ст.};$$

$$P_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} P = 0,79 \cdot 760 = 600,4 \text{ мм рт. ст.}$$

14 Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода 6,67%. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Решение:

Газовую постоянную смеси находим по уравнению (29), газовые постоянные компонентов смеси приведены в приложении А:

$$R_{\text{см}} = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,0667 \cdot 4124 + 0,9333 \cdot 296,8 = 552 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Удельный объем газовой смеси найдем из характеристического уравнения (16):

$$v_{\text{H}} = \frac{R T_{\text{H}}}{P_{\text{H}}} = \frac{552 \cdot 273}{101325} = 1,49 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

### Задачи

59 В 1 м<sup>3</sup> сухого воздуха содержится примерно 0,21 м<sup>3</sup> кислорода и 0,79 м<sup>3</sup> азота. Определить массовый состав воздуха, его газовую постоянную и парциальные давления кислорода и азота.

Ответ:  $g_{\text{O}_2} = 0,232$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,768$ ;  $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;

$$P_{\text{N}_2} = 0,79 P_{\text{см}}; \quad P_{\text{O}_2} = 0,21 P_{\text{см}}.$$

60 Определить газовую постоянную смеси газов, состоящей из 1 м<sup>3</sup> генераторного газа и 1,5 м<sup>3</sup> воздуха, взятых при нормальных условиях, и найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа принять равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

$$\text{Ответ: } R_{\text{см}} = 295 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); P_{\text{г.г}} = 0,4 P_{\text{см}}; P_{\text{возд}} = 0,6 P_{\text{см}}.$$

61 Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: CO<sub>2</sub>=12,3%; O<sub>2</sub>=7,2%; N<sub>2</sub>=80,5%. Найти молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем продуктов сгорания при давлении 750 мм. рт. ст. и температуре 800°C.

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}}=30,3 \text{ кг/кмоль}; R_{\text{см}}=274 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг/м}^3.$$

62 Генераторный газ имеет следующий объемный состав: H<sub>2</sub>=7%; CH<sub>4</sub>=2%; CO=27,6%; CO<sub>2</sub>=4,85%; N<sub>2</sub>=58,6%. Определить массовые доли, молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при 15°C и 0,1 МПа.

$$\text{Ответ: } g_{\text{H}_2}=0,005; g_{\text{CH}_4}=0,012; g_{\text{CO}}=0,289; g_{\text{CO}_2}=0,079;$$

$$g_{\text{N}_2}=0,615; \mu_{\text{см}}=26,72 \text{ кг/кмоль}; R_{\text{см}}=310,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\rho_{\text{см}}=1,095 \text{ кг/м}^3; P_{\text{H}_2}=0,07 \text{ бар}.$$

63 Газ коксовых печей имеет следующий объемный состав: H<sub>2</sub>=57%; CH<sub>4</sub>=23%; CO=6%; CO<sub>2</sub>=2%; N<sub>2</sub>=12%. Определить молекулярную массу, массовые доли, газовую постоянную и плотность при температуре 15°C и давлении 1 бар.

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}}=10,77 \text{ кг/кмоль}; g_{\text{H}_2}=0,107; g_{\text{CO}_2}=0,082;$$

$$R_{\text{см}}=772 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \rho_{\text{см}}=0,45 \text{ кг/м}^3.$$



64 Генераторный газ состоит из следующих объемных частей:  $H_2=18\%$ ;  $CO=24\%$ ;  $CO_2=6\%$ ;  $N_2=52\%$ . Определить газовую постоянную генераторного газа и массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ:  $R_{см} = 342 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $g_{CO_2} = 10,86\%$ ;

$g_{N_2} = 60,03\%$ ;  $g_{H_2} = 1,48\%$ ;  $g_{CO} = 27,63\%$ .

65 Анализ продуктов сгорания топлива показал следующий их состав:  $CO_2=12,2\%$ ;  $O_2=7,1\%$ ;  $CO=0,4\%$ ;  $N_2= 80,3\%$ . Определить массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ:  $g_{CO_2} = 17,7\%$ ;  $g_{O_2} = 7,5\%$ ;  $g_{CO} = 0,37\%$ ;

$g_{N_2} = 74,43\%$ .

66 Определить газовую постоянную, плотность при нормальных условиях и объемный состав смеси, если ее массовый состав следующий:  $H_2=8,4\%$ ;  $CH_4=48,7\%$ ;  $C_2H_4=6,9\%$ ;  $CO=17\%$ ;  $CO_2=7,6\%$ ;  $O_2=4,7\%$ ;  $N_2=6,7\%$ .

Ответ:  $R_{см} = 717 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $r_{O_2} = 0,017$ ;  $r_{N_2} = 0,028$ ;

$r_{H_2} = 0,484$ ;  $r_{CO_2} = 0,02$ ;  $\rho_H = 0,518 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

67 Определить газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если объемный состав смеси следующий:  $CO_2=12\%$ ;  $CO=1\%$ ;  $H_2O=6\%$ ;  $O_2=7\%$ ;  $N_2=74\%$ , а общее давление ее составляет 750 мм рт. ст.

Ответ:  $R_{см} = 281 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $v = 0,76 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$P_{CO_2} = 90 \text{ мм рт. ст.}$

68 В резервуаре емкостью  $125 \text{ м}^3$  находится газ при давлении 5 бар и температуре  $18^\circ\text{C}$ . Объемный состав газа следующий:  $H_2=0,46$ ;  $CH_4=0,32$ ;  $CO=0,15$ ;  $N_2=0,07$ . После расходования некоторого

количества газа давление его понизилось до 3 бар, а температура упала до 12°C. Определить массу израсходованного коксового газа.

Ответ:  $m = 2167$  кг.

69 Массовый состав смеси следующий:  $\text{CO}_2=18\%$ ;  $\text{O}_2=12\%$  и  $\text{N}_2=70\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при температуре 180°C 8 кг ее занимали объем, равный 4 м<sup>3</sup>.

Ответ:  $P = 0,24$  МПа.

70 Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа 1,2 бар, а давление смеси 3 бар.

Ответ:  $g_{\text{CO}_2} = 0,512$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,488$ .

71 Газовая смесь имеет следующий массовый состав:  $\text{CO}_2=12\%$ ;  $\text{O}_2=8\%$  и  $\text{N}_2=80\%$ . До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы плотность ее составляла 1,6 кг/м<sup>3</sup>?

Ответ: до 0,213 МПа.

72 Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называют гремучим газом. Определить газовую постоянную смеси.

Ответ:  $R = 693$  Дж/(кг·К).

73 Определить массовые доли кислорода и азота, содержащиеся в воздухе, если известно, что в 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится 0,21 м<sup>3</sup>  $\text{O}_2$  и 0,79 м<sup>3</sup>  $\text{N}_2$ . Определить плотность воздуха и парциальные давления компонентов при 30°C и 745 мм рт. ст.

Ответ:  $g_{\text{O}_2} = 0,233$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,767$ ;  $\rho = 1,14$  кг/м<sup>3</sup>;

$P_{\text{O}_2} = 20,85$  кПа;  $P_{\text{N}_2} = 78,45$  кПа.

## 1.4 Теплоемкость газов

**Теплоемкостью** называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо его количественной единицы на 1°С. В зависимости от выбранной количественной единицы различают **молярную** теплоемкость [ $C_\mu$  - Дж/(кмоль·К)], **массовую** теплоемкость [ $C$  - Дж/(кг·К)] и **объемную** теплоемкость [ $C'$  - Дж/(м<sup>3</sup>·К)]. Принято относить 1 м<sup>3</sup> газа к нормальным условиям, поэтому в дальнейшем изложении объемная теплоемкость будет относиться к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> его, при нормальных условиях.

Пересчет джоулей в калории и обратно производится по соотношениям:

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}; 1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал.}$$

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Пересчет производится по следующим формулам:

$$C = \frac{C_\mu}{\mu}, \quad (33)$$

$$C' = \frac{C_\mu}{22,4}, \quad (34)$$

$$C' = C \rho_n, \quad (35)$$

где  $\mu$  - молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$\rho_n$  - плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкость:

$$\bar{C} = \frac{q}{t_2 - t_1}, \quad (36)$$

$$C = \frac{dq}{dt}, \quad (37)$$

где  $\bar{C}$  - средняя теплоемкость в пределах  $t_1 - t_2$ ;

$C$  – истинная теплоемкость;

$q$  — количество тепла, сообщаемого единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$ .

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления. Таким образом, различают **истинную и среднюю теплоемкости**:

а) мольную — при постоянном объеме ( $C_{\mu v}$  и  $\bar{C}_{\mu v}$ ) и постоянном давлении ( $C_{\mu p}$  и  $\bar{C}_{\mu p}$ );

б) массовую — при постоянном объеме ( $C_v$  и  $\bar{C}_v$ ) и постоянном давлении ( $C_p$  и  $\bar{C}_p$ );

в) объемную — при постоянном объеме ( $C'_v$  и  $\bar{C}'_v$ ) и постоянном давлении ( $C'_p$  и  $\bar{C}'_p$ ).

Между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существуют следующие зависимости:

$$C_p = C_v + R; \quad \frac{C_p}{C_v} = k, \quad (38)$$

где  $k$  – **показатель адиабаты**, зависит от атомности молекул, для одноатомных газов  $k = 1,67$  для двухатомных газов  $k = 1,4$ ; для трех- и многоатомных газов  $k = 1,33$ .

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет криволинейный характер. В приложении Б приведены величины теплоемкостей для наиболее часто встречающихся в теплотехнических расчетах в интервале температур от 0°С до  $t$ . Расчеты средней теплоемкости в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  производят по следующей формуле:

$$\bar{C}_{t_1}^{t_2} = \frac{C_0^{t_2} \cdot t_2 - C_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad (39)$$

где  $C_0^t$  - теплоемкость газа в интервале от 0°С до  $t$ , значения берутся из таблиц Б.1-Б.6, в необходимых случаях производится интерполирование.

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания  $m$  кг или  $V_H$  м<sup>3</sup> газа в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ , при постоянном объеме  $Q_V$  или постоянном давлении  $Q_P$  пользуются формулами:

$$Q_V = m (\bar{C}_{v_0}^{t_2} t_2 - \bar{C}_{v_0}^{t_1} t_1) = V_H (\bar{C}_{v_0}'^{t_2} t_2 - \bar{C}_{v_0}'^{t_1} t_1), \quad (40)$$

$$Q_P = m (\bar{C}_{p_0}^{t_2} t_2 - \bar{C}_{p_0}^{t_1} t_1) = V_H (\bar{C}_{p_0}'^{t_2} t_2 - \bar{C}_{p_0}'^{t_1} t_1). \quad (41)$$

Часто в теплотехнических расчетах нелинейную зависимость теплоемкости от температуры заменяют близкой к ней линейной зависимостью. В этом случае истинная теплоемкость определяется из уравнения

$$C = a + b t, \quad (42)$$

а для определения средней теплоемкости при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$  пользуются уравнением

$$\bar{C} = a + b \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (43)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для данного газа (приложение В).

Для средней теплоемкости в пределах от 0°С до t эта формула принимает вид

$$\bar{C} = a + \frac{b}{2} t. \quad (44)$$

Для приближенных расчетов можно пользоваться следующими формулами:

$$C_v = \frac{R}{k-1}; \quad C_p = \frac{R k}{k-1}. \quad (45)$$

**Теплоемкость газовой смеси** определяется на основании следующих формул:

массовая теплоемкость смеси -

$$C_{см} = \sum_{i=1}^n (g_i C_i); \quad (46)$$

объемная теплоемкость смеси -

$$C'_{см} = \sum_{i=1}^n (r_i C'_i); \quad (47)$$

мольная теплоемкость смеси -

$$C_{\mu см} = \sum_{i=1}^n (r_i C_{\mu i}). \quad (48)$$

### Примеры решения задач

15 Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $C = \text{const}$ .

Решение:

Массовую теплоемкость можно рассчитать по уравнению (45).

Показатель адиабаты для двухатомных газов равен 1,4. Газовая постоянная для кислорода приведена в приложении А.

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{259,8}{1,4-1} = 649,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$C_p = \frac{R k}{k-1} = \frac{259,8 \cdot 1,4}{1,4-1} = 909,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для пересчета массовой теплоемкости в объемную необходимо знать плотность газа (см. приложение А):

$$C'_v = C_v \rho_n = 649,5 \cdot 1,429 = 928,1 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$C'_p = C_p \rho_n = 909,3 \cdot 1,429 = 1299,4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

16 Вычислить среднюю массовую и объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур от 0 до 1200<sup>0</sup>С, если известно, что средняя мольная теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении в этом интервале температур равна 32,192 кДж/(кмоль·К).

Решение:

На основании формулы (33) определим среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении:

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{C}_{\mu p}}{\mu} = \frac{32192}{28} = 1149,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (38):

$$\bar{C}_v = \bar{C}_p - R = 1149,7 - 296,8 = 852,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (35):

$$\bar{C}'_v = \bar{C}_v \rho_n = 852,9 \cdot 1,25 = 1066,1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

17 Вычислить среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800°С [в кДж/(кг·К)], считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800°С можно рассчитать по уравнению (39). Пользуясь табл. Б.3, получаем для воздуха:

$$\bar{C}_{p0}^{800} = 1,0710 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \bar{C}_{p0}^{200} = 1,0115 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отсюда

$$\bar{C}_{p200}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

18 Решить предыдущую задачу, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

Средняя массовая теплоемкость для воздуха определяется из выражения (табл. В.1)

$$\bar{C}_p = 0,9952 + 0,00009349 \frac{t_1 + t_2}{2} = 1,0419 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

19 Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении для кислорода в пределах 350 - 1000°С:

- а) считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной;
- б) считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

а) Исходя из уравнения (39) и данных табл. Б.3 определяем:

$$\bar{C}_{p350}^{1000} = \frac{1,035 \cdot 1000 - 0,9576 \cdot 350}{1000 - 350} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

б) Пользуясь формулой (43) и данными табл. В.1, получаем:



$$\bar{C}_{p\ 350}^{1000} = 0,9127 + 0,00012724 \frac{350+1000}{2} = 0,9986 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

20 Воздух в количестве  $6 \text{ м}^3$  при давлении 3 бар и температуре  $25^\circ\text{C}$  нагревается при постоянном давлении до  $130^\circ\text{C}$ . Определить количество подведенного к воздуху тепла, считая  $C=\text{const}$ .

Решение:

Количество теплоты можно определить по уравнению (41). Для этого необходимо вычислить массу и теплоемкость воздуха. Массу газа определяем по уравнению (15)

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6}{287 \cdot 298} = 21 \text{ кг} .$$

На основании формулы (45) и данных приложения А имеем:

$$C_p = \frac{R k}{k - 1} = \frac{287 \cdot 1,4}{1,4 - 1} = 1004,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Следовательно,

$$Q_p = m C_p (t_2 - t_1) = 21 \cdot 1004,5 \cdot (130 - 25) = 2,2 \text{ МДж} .$$

21 В закрытом сосуде объемом  $300 \text{ л}$  находится воздух при давлении 8 бар и температуре  $20^\circ\text{C}$ . Какое количество тепла необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до  $120^\circ\text{C}$ ? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$m = \frac{V P}{R T} = \frac{3 \cdot 10^{-1} \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 1,07 \text{ кг} .$$

Для воздуха (двухатомный газ), считая теплоемкость величиной постоянной, имеем:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Количество подведенного тепла согласно уравнению (40)

$$Q = m C_v (t_2 - t_1) = 1,07 \cdot 717,5 \cdot 100 = 76772 \text{ Дж} .$$

Теплоемкость воздуха с учетом ее зависимости от температуры определяем из табл. В.1. Пользуясь интерполяцией, находим:

$$C_v = 0,7209 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Относительная ошибка, следовательно, равна:

$$\frac{0,7209 - 0,7175}{0,7209} \cdot 100 = 0,6 \% .$$

Незначительная величина ошибки объясняется малым интервалом температур. При большой разности температур относительная ошибка может достигнуть весьма большой величины.

22 В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении 2 бар и температуре 20°C. Какое количество тепла необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до 300°C? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Решение:

Количество тепла, сообщаемое газу при  $v=\text{const}$ , определяется на основании формулы (40). Объем газа, заключенного в сосуде, приведенный к нормальным условиям, определяется по уравнению (21):

$$V_n = \frac{P V T_n}{P_n T} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 273}{1,013 \cdot 293} = 0,552 \text{ м}^3 .$$

Значения теплоемкостей определяем по табл. Б.6 и, следовательно,

$$Q_v = 0,552 \cdot (0,9852 \cdot 300 - 0,9374 \cdot 20) = 152,8 \text{ кДж.}$$

Конечное давление можно определить, если воспользоваться характеристическими уравнениями для начального и конечного состояний кислорода:

$$P_1 v = R T_1; \quad P_2 v = R T_2.$$

Следовательно,

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot \frac{573}{293} = 3,9 \text{ бара.}$$

23 В калориметре с идеальной тепловой изоляцией находится вода в количестве 0,8 кг при температуре  $t' = 15^\circ \text{C}$ . Калориметр изготовлен из серебра, теплоемкость которого  $C_c = 0,2345 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Масса калориметра 0,25 кг. В калориметр опускают 200 г алюминия при температуре  $t_a = 100^\circ \text{C}$ . В результате этого температура воды повышается до  $t'' = 19,24^\circ \text{C}$ . Определить теплоемкость алюминия.

Решение:

Обозначим массу алюминия, помещаемого в калориметр, через  $m_a$ , а теплоемкость алюминия — через  $C_a$ . Тогда уравнение теплового баланса для калориметра будет иметь вид

$$(m_v c_v + m_c c_c) t' + m_a c_a t_a = (m_v c_v + m_c c_c + m_a c_a) t''.$$

Производя простейшие преобразования и решая это уравнение относительно  $C_a$ , получаем:

$$C_a = \frac{(m_v c_v + m_c c_c) (t'' - t')}{m_a (t_a - t'')}.$$

Подставляя в полученное выражение значения входящих в него величин, получим

$$C_a = \frac{(0,8 \cdot 4,1868 + 0,25 \cdot 0,2345) (19,24 - 15)}{0,2 (100 - 19,24)} = 0,8946 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

## Задачи

74 Определить значение массовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $C = \text{const}$ .

$$\text{Ответ: } C_p = 0,916 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$C_v = 0,654 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

75 Определить среднюю массовую теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении в пределах  $0 - 825^\circ\text{C}$ , считая зависимость от температуры нелинейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_{p0}^{825} = 1,090 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

76 Вычислить значение истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении для температуры  $1000^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Определить относительную ошибку по сравнению с табличными данными.

$$\text{Ответ: } C_{\mu p} = 36,55 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}); \varepsilon = 1,79 \% .$$

77 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p$  и  $\bar{C}_v'$  в пределах от  $200^\circ\text{C}$  до  $800^\circ\text{C}$  для  $\text{CO}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_p = 1,1216 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\bar{C}_v' = 1,0371 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

78 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p'$  и  $\bar{C}_v'$  для воздуха в пределах  $400 - 1200^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

$$\text{Ответ: } \bar{C}_p' = 1,4846 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}); \bar{C}_v' = 1,1137 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

79 Найти среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p$  и  $\bar{C}_v'$  углекислого газа в пределах 400 - 1000°C, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,2142$  кДж/(кг·К);  $\bar{C}_v' = 2,3865$  кДж/(м<sup>3</sup>·К).

80 Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах 200 - 800°C, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $\bar{C}_v = 0,8164$  кДж/(кг·К).

81 Решить предыдущую задачу, если известно, что средняя мольная теплоемкость азота при постоянном давлении может быть определена по формуле

$$\bar{C}_{\mu p} = 28,7340 + 0,0023488 \bar{t}.$$

Ответ:  $\bar{C}_v = 0,8122$  кДж/(кг·К).

82 Воздух охлаждается от 1000 до 100°C в процессе с постоянным давлением. Какое количество тепла теряет 1 кг воздуха? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Ответ: 1)  $q = - 911,9$  кДж/кг; 2)  $q = - 990,1$  кДж/кг;  $\varepsilon = 8 \%$ .

83 Пользуясь формулой, которую получили в предыдущей задаче, определить истинную мольную теплоемкость кислорода при постоянном давлении для температуры 700°C. Сравнить полученное значение теплоемкости со справочным значением.

Ответ:  $C_{\mu} = 34,725$  кДж/(кмоль·К).

84 Найти количество тепла, необходимое для нагрева 1 м<sup>3</sup> (при нормальных условиях) газовой смеси следующего объемного состава:

$\text{CO}_2=14,5\%$ ,  $\text{O}_2=6,5\%$ ,  $\text{N}_2=79,0\%$  от 200 до 1200°C при  $P=\text{const}$  и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

Ответ:  $q = 1582,2 \text{ кДж/м}^3$ .

85 Газовая смесь имеет следующий состав по объему:  $\text{CO}_2 - 0,12$ ;  $\text{O}_2 - 0,07$ ;  $\text{N}_2 - 0,75$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0,06$ . Определить среднюю массовую теплоемкость, если смесь нагревается при постоянном давлении от 100 до 300°C.

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,0928 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ .

86 В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от 150 до 600°C. Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 360 кг/ч. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Ответ:  $Q = 47,84 \text{ кДж/с}$ .

87 Продукты сгорания топлива поступают в газоход парового котла при температуре газов 1100°C и покидают газоход при температуре 700°C. Состав газов по объему:  $\text{CO}_2=11\%$ ,  $\text{O}_2=6\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}=8\%$ ,  $\text{N}_2=75\%$ . Определить, какое количество тепла теряет 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, взятой при нормальных условиях.

Ответ:  $q = 697,5 \text{ кДж/м}^3$ .

88 В закрытом резервуаре объемом 100 л находится воздух при 0°C и давлении 760 мм рт. ст. Определить количество теплоты, затраченное на нагревание этого воздуха до 200°C.

Ответ:  $Q = 18,8 \text{ кДж}$ .

## 1.5 Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии. Аналитическое выражение закона в дифференциальной форме для любого тела имеет следующий вид:

$$dQ = dU + dL \quad (49)$$

или, если масса равна 1 кг, -

$$dq = du + dl, \quad (50)$$

где Q и q – полное и удельное количество теплоты, подводимое к рабочему телу;

U и u – полная и удельная внутренняя энергия рабочего тела;

L и l – полная и удельная работа.

Единицей измерения количества теплоты и работы является джоуль. **Джоуль** (Дж) – единица измерения механической энергии, представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 Н, на пути в 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы. Единицей измерения мощности является ватт (Вт): 1 Вт = 1 Дж / с. Количественная связь между единицами энергии приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношения между единицами энергии

Единицы измерения	Килоджоули (кДж)	Килокалории (ккал)	Киловатт – часы (кВт·ч)	Лошадиная сила – часы (л.с. · ч)
1 кДж	1	0,239	0,000278	0,000378
1 ккал	4,1868	1	0,001163	0,001581
1 кВт·ч	3600	859,8	1	1,36
1 л. с · ч	2650	632,4	0,7355	1

В термодинамике изменение **внутренней энергии** определяют по формуле

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (51)$$

где  $U_1$  – внутренняя энергия в начальном состоянии, Дж;

$U_2$  – внутренняя энергия в конечном состоянии, Дж.

Для бесконечно малого изменения состояния:

$$du = C_v dT. \quad (52)$$

Изменение полной внутренней энергии для конечного интервала изменения температуры можно определить по формулам:

$$\Delta u = \bar{C}_v (T_2 - T_1); \quad \Delta U = m \bar{C}_v (T_2 - T_1). \quad (53)$$

В формулах (52-53):

$\bar{C}_v$  – средняя теплоемкость рабочего тела (в интервале температур  $T_1 - T_2$ ) при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$m$  – масса рабочего тела, кг.

**Работа**, совершаемая системой при изменении объема, определяется по формулам:

$$dl = P dv; \quad l = \int_{v_1}^{v_2} P dv. \quad (54)$$

**Энтальпия** представляет собой полную энергию термодинамической системы, равную сумме внутренней энергии системы и потенциальной энергии, которая обусловлена тем, что газ находится под давлением. Единицы измерения полной энтальпии (H) – джоуль, удельной энтальпии (h) – джоуль на килограмм.

Элементарное изменение энтальпии

$$dh = du + d(pv) = C_p dT \quad (55)$$

или для конечного процесса при произвольной массе газа

$$\Delta H = m \bar{C}_p (T_2 - T_1). \quad (56)$$



Энтальпия – это теплота, подводимая к телу в процессе нагрева его при постоянном давлении. Первый закон термодинамики может быть записан следующим образом:

$$dq = dh - v dp. \quad (57)$$

Математическое выражение **1-го закона термодинамики для потока газа** -

$$q_n = h_2 - h_1 + l_T + (\omega_2^2 - \omega_1^2) / 2. \quad (58)$$

В дифференциальном виде уравнение (58) имеет вид

$$dq_n = dh + dl_T + \omega d\omega. \quad (59)$$

В уравнениях (58) – (59):

$q_n$  – теплота, подводимая к потоку газа извне, Дж;

$\omega$  - скорость газового потока, м/с.

**При смешении** химически невзаимодействующих газов, имеющих различные давления и температуры, необходимо уметь определять конечное состояние смеси. Если газы до смешения занимают объемы  $V_1, V_2, \dots, V_n$  при давлениях  $P_1, P_2, \dots, P_n$  и температурах  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а показатели адиабаты равны  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то параметры смеси определяются по формулам (смешение газов при  $V = \text{const}$ ):

температура смеси

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{k_i - 1}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{(k_i - 1) T_i}}; \quad (60)$$

давление смеси

$$P = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}; \quad (61)$$

объем смеси

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (62)$$

Для газов, у которых равны показатели адиабаты, формулы (60), (61) имеют вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}}; \quad P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{V}. \quad (63)$$

Если массовые расходы смешивающихся потоков равны  $G_1, G_2, \dots, G_n$  (килограмм в час), объемные расходы  $V_1, V_2, \dots, V_n$  (кубических метров в час), давления газов -  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , температуры -  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а показатели адиабаты равны  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то температура смеси определяется по формуле

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} \frac{P_i V_i}{T_i}}. \quad (64)$$

Объемный расход смеси в единицу времени при температуре  $T$  и давлении  $P$

$$V = \frac{T}{P} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}. \quad (65)$$

Для газов, у которых значения  $k$  равны, температура смеси определяется формулой (63). Если газовые потоки, помимо одинаковых значений  $k$ , имеют также равные давления, то формулы (64) и (65) принимают вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}}, \quad V = T \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}. \quad (66)$$

Все уравнения, относящиеся к смешению газов, выведены при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

**Коэффициент полезного действия** (КПД) тепловых установок характеризует степень совершенства превращения тепла в работу. КПД может быть вычислен, если известны расход топлива на 1 кВт·ч и теплота сгорания топлива (количество тепла, которое выделяется при полном сгорании массовой или объемной единицы топлива. Если расход топлива на 1 кВт·ч (обозначение -  $b$ ) выражен в килограммах на киловатт-час, а теплота сгорания топлива  $Q_H^P$  - в килоджоулях на килограмм, КПД тепловой установки определяется из выражения

$$\eta = \frac{3600}{Q_H^P b} \cdot \quad (67)$$

Если же теплота сгорания выражена в килокалориях на килограмм, то формула (67) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{860}{Q_H^P b} \cdot \quad (68)$$

### Примеры решения задач

24 В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28900 кДж/кг. Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% тепла, полученного при сгорании угля.

Решение:

Количество тепла, превращенного в электрическую энергию за 20 ч работы,

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18 = 3,2 \cdot 10^9 \text{ кДж.}$$

Эквивалентная ему электрическая энергия или работа

$$L = \frac{3,2 \cdot 10^9}{3600} = 89590 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, средняя электрическая мощность станции

$$N = 89590 / 20 = 4479 \text{ кВт}.$$

25 Паросиловая установка мощностью 4200 кВт имеет КПД, равный 0,2. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания равна 25000 кДж/кг.

Решение:

По формуле (67) находим выражение для расхода топлива:

$$b = \frac{3600}{\eta Q_H^P} = \frac{3600}{0,2 \cdot 25000} = 0,72 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Часовой расход топлива составит:

$$0,72 \cdot 4200 = 3024 \text{ кг/ч}.$$

26 Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при изменении его температуры от 300 до 50 °С. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной.

Решение:

Изменение внутренней энергии можно определить на основании формулы (53). Рассчитаем среднюю теплоемкость воздуха в данном интервале температур (табл. В.1):

$$\bar{C}_v = 0,7084 + 0,00009349 \frac{300 + 50}{2} = 0,7248 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$\Delta U = 1 \cdot 0,7248 \cdot (50 - 300) = -181,2 \text{ кДж}.$$

## Задачи

89 Определить часовой расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 25 МВт, если теплота сгорания топлива 33,85 МДж/кг и известно, что на превращение тепловой энергии в механическую используется только 35% тепла сожженного топлива.

Ответ:  $G = 7,59$  т/ч.

90 Мощность турбогенератора 12000 кВт, КПД генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55°C? Температура в машинном отделении равна 20°C; среднюю теплоемкость воздуха принять равной 1,0 кДж/(кг·К).

Ответ:  $G = 10,3$  кг/с.

91 Использование атомной энергии для производства тепловой или электрической энергии в техническом отношении означает применение новых видов топлив - ядерных горючих. Количество энергии, выделяемой при расщеплении 1 кг ядерных горючих, может быть условно названо их «теплотой сгорания». Для урана эта величина равна  $22,9 \cdot 10^6$  кВт·ч/кг. Во сколько раз уран как горючее эффективнее каменного угля с теплотой сгорания 27500 кДж/кг?

Ответ: В 3 млн. раз.

92 Важнейшим элементом атомной электростанции является реактор, или «атомный котел». Тепловой мощностью реактора называют полное количество тепла, которое выделяется в нем в течение часа. Обычно эту мощность выражают в киловаттах.

Определить годовой расход ядерного горючего для реактора с тепловой мощностью 500000 кВт, если теплота сгорания применяемо-

го урана равна  $22,9 \cdot 10^6$  кВт·ч/кг, а время работы реактора составляет 7000 ч.

Ответ:  $G = 153$  кг/год.

93 Теплоемкость газа при постоянном давлении опытным путем может быть определена в проточном калориметре. Для этого пропускают через трубопровод исследуемый газ и нагревают его электронагревателем. При этом измеряют количество газа, пропускаемого через трубопровод, температуры газа перед и за электронагревателем и расход электроэнергии. Давление воздуха в трубопроводе принимают неизменным. Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом проточного калориметрирования, если расход воздуха через трубопровод 690 кг/ч, мощность электронагревателя 0,5 кВт, температура воздуха перед электронагревателем  $18^\circ\text{C}$ , а температура воздуха за электронагревателем  $20,6^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\bar{C}_p = 1,0$  кДж/(кг·К).

94 Метод проточного калориметрирования, описанный в предыдущей задаче, может быть также использован для определения количества газа или воздуха, протекающего через трубопровод. Определить часовой расход воздуха  $G$  кг/ч, если мощность электронагревателя 0,8 кВт, а приращение температуры воздуха составило  $1,8^\circ\text{C}$ . Определить также скорость воздуха  $\omega$  в трубопроводе за электронагревателем, если давление воздуха 900 мм. рт. ст., температура его за электронагревателем  $20,2^\circ\text{C}$ , а диаметр трубопровода 125 мм.

Ответ:  $G = 1600$  кг/ч,  $\omega = 25,4$  м/с.

95 При испытании двигателей внутреннего сгорания широким распространением пользуются так называемые гидротормоза. Работа двигателя при этом торможении превращается в теплоту трения и для уменьшения нагрева тормозного устройства применяется водяное ох-

лаждение. Определить часовой расход воды на охлаждение тормоза, если мощность двигателя 45 л.с., начальная температура воды 15°C; принять, что вся теплота трения передается охлаждающей воде.

Ответ:  $G = 632$  кг/ч.

96 При испытании нефтяного двигателя было найдено, что удельный расход топлива равен 170 г/(л.с.·ч). Определить эффективный КПД этого двигателя, если теплота сгорания топлива равна 41000 кДж/кг.

Ответ:  $\eta = 0,38$ .

97 В котельной электростанции за 10 часов работы сожжено 100 т каменного угля с теплотой сгорания 29300 кДж/кг. Определить количество выработанной электроэнергии и среднюю мощность станции, если КПД процесса преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 20%.

Ответ:  $Q = 162780$  кВт·ч;  $N_{\text{ср}} = 16278$  кВт.

98 В сосуд, содержащий 5 л воды при температуре 20°C, помещен электронагреватель мощностью 800 Вт. Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагревалась до температуры 100°C. Потерями тепла сосуда в окружающую среду пренебречь.

Ответ: 30 мин.

99 В калориметр, содержащий 0,6 л воды при температуре 20°C, опускают стальной образец массой 0,4 кг, нагретый до 200°C. Определить теплоемкость стали, если повышение температуры воды составило 12,5°C. Массой калориметра пренебречь.

Ответ:  $C = 0,469$  кДж/(кг·К).

100 Свинцовый шар падает с высоты 100 м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в тепло. Одна треть образовавшегося тепла передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание

шара. Теплоемкость свинца  $0,030$  ккал/(кг·К). Определить повышение температуры шара.

Ответ:  $\Delta t = 52^\circ$ .

101 Автомобиль массой  $1,5$  т останавливается под действием тормозов при скорости  $40$  км/ч. Определить конечную температуру тормозов  $t_2$ , если их масса равна  $15$  кг, начальная температура  $10^\circ\text{C}$ , а теплоемкость стали, из которой изготовлены тормозные части, равна  $0,46$  кДж/(кг·К). Потерями тепла в окружающую среду пренебречь.

Ответ:  $t_2 = 23,4^\circ\text{C}$ .

102 Предполагая, что все потери гидротурбины превращаются в тепло и тратятся на нагрев воды, определить КПД турбины по следующим данным: высота падения воды равна  $400$  м, нагрев воды составляет  $0,2^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\eta = 78,6\%$ .

103 В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание  $200$  кг стали на  $40^\circ\text{C}$  в течение  $20$  мин. Определить вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять равной  $0,46$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $3,07$  кВт.

104 Найти изменение внутренней энергии  $2$  м<sup>3</sup> воздуха, если температура его понижается от  $250$  до  $70^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха  $6$  бар. Ответ дать в килокалориях.

Ответ:  $\Delta U = 253,8$  ккал.

105 К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне  $100$  кДж тепла. Величина произведенной работы при этом составляет  $115$  кДж. Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно  $0,8$  кг.



Ответ:  $\Delta U = - 18,2$  кДж.

106  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 5 бар и температуре  $50^\circ\text{C}$  смешиваются с  $10 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 2 бар и температуре  $100^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру смеси.

Ответ:  $t_{\text{см}} = 82^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{см}} = 2,5$  бар.

107 В двух разобщенных между собой сосудах содержатся: 50 л азота при давлении 20 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  и 200 л углекислого газа при давлении 5 бар и температуре  $600^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Ответ:  $T = 684$  К;  $P = 8,9$  бар.

108 Три разобщенных между собой сосуда А, В, С заполнены различными газами. В сосуде А, имеющем объем 10 л, находится оксид серы  $\text{SO}_2$  при давлении 60 бар и температуре  $100^\circ\text{C}$ , в сосуде В с объемом 5 л — азот при давлении 4 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  и в сосуде С с объемом 5 л — азот при давлении 20 бар и температуре  $300^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов между собой. Считать, что теплообмен со средой отсутствует.

Ответ:  $P = 21,8$  бар,  $t = 118^\circ\text{C}$ .

109 В одном сосуде находится 100 л водорода при давлении 15 бар и температуре  $1200^\circ\text{C}$ , а в другом - 50 л азота при давлении 30 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$ . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Ответ:  $t = 467^\circ\text{C}$ ;  $P = 20,8$  бар.

110 Уходящие из трех паровых котлов газы при давлении 1 бар смешиваются в сборном газоходе и через дымовую трубу удаляются в

атмосферу. Объемный состав уходящих газов из отдельных котлов следующий: из первого котла -  $\text{CO}_2=10,4\%$ ;  $\text{O}_2 =7,2\%$ ;  $\text{N}_2=77,0\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}=5,4\%$ ; из второго котла -  $\text{CO}_2 = 11,8\%$ ;  $\text{O}_2 = 6,9\%$ ;  $\text{N}_2 = 75,6\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 5,8\%$ ; из третьего котла -  $\text{CO}_2= 12,0\%$ ;  $\text{O}_2 = 4,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 77,8\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 6,1\%$ . Часовые расходы газов составляют  $G_1 = 12\ 000$  кг/ч;  $G_2= 6500$  кг/ч;  $G_3 = 8400$  кг/ч, а температурсы газов – соответственно:  $t_1 = 130\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 180\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_3 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить температуру уходящих газов после смешения в сборном газоходе. Принять, что показатели адиабаты этих газов одинаковы.

Ответ:  $t_2 = 164\text{ }^\circ\text{C}$ .

111 В газоходе смешиваются три газовых потока, имеющих одинаковое давление, равное 2 бар. Первый поток представляет собой азот с объемным расходом  $V_1= 8200$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , второй поток — двуокись углерода с расходом  $7600$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и третий поток — воздух с расходом  $6400$  м<sup>3</sup>/ч при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить температуру газов после смешения и их объемный расход в общем газопроводе.

Ответ:  $t_1 = 423\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $V = 23000$  м<sup>3</sup>/ч.

112 Продукты сгорания из газохода парового котла в количестве  $400$  кг/ч при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  должны быть охлаждены до  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и направлены в сушильную установку. Газы охлаждаются смешением газового потока с потоком воздуха при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Давление в обоих газовых потоках одинаковое. Определить часовой расход воздуха, если принять, что  $R_{\text{газа}}=R_{\text{воздуха}}$ , теплоемкость продуктов сгорания равна теплоемкости воздуха.

Ответ:  $G_{\text{возд}}=36\ 6$  кг/ч.

## 1.6 Основные термодинамические процессы

**Изохорным** называют процесс, протекающий при неизменном объеме рабочего тела. Зависимость между конечными и начальными параметрами (закон Шарля):

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1. \quad (69)$$

Работа расширения в изохорном процессе равна нулю, так как изменение объема равно нулю. Следовательно,

$$q = du = C_v dT, \quad Q = m C_v dT \quad (70)$$

или для конечного изменения температуры и произвольной массы газа:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1). \quad (71)$$

**Изобарным** называют процесс, протекающий при постоянном давлении. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Гей – Люссака):

$$V_2 / V_1 = T_2 / T_1. \quad (72)$$

Работа, которую выполняет газ при расширении, в данном случае определяется следующим образом:

$$L = P (V_2 - V_1) = m R (T_2 - T_1). \quad (73)$$

Количество теплоты, затраченное на расширение газа при постоянном давлении, равно изменению **энтальпии** газа:

$$q = \Delta h = C_p (T_2 - T_1). \quad (74)$$

**Изотермическим** называют процесс, протекающий при постоянной температуре. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Бойля-Мариотта):

$$P_2 / P_1 = V_1 / V_2 \quad \text{или} \quad PV = \text{const}. \quad (75)$$

Изменение внутренней энергии равно нулю, т.к.  $T = \text{const}$ .

Работа изотермического процесса определяется по формуле:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (76)$$

**Адиабатным** называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Уравнение адиабаты имеет следующий вид:

$$P v^k = \text{const} \quad \text{или} \quad P_1 v_1^k = P_2 v_2^k, \quad (77)$$

где  $k$  - показатель адиабаты.

Зависимость между начальными и конечными параметрами:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k. \quad (78)$$

Работа расширения при адиабатном процессе совершается за счет уменьшения внутренней энергии:

$$q = \Delta u + l = 0; \quad l = -\Delta u = C_v (T_1 - T_2). \quad (79)$$

Работу расширения 1 кг газа в адиабатном процессе можно вычислить и по другой формуле:

$$l = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (80)$$

Если масса газа равна  $m$ , то

$$L = \frac{1}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (81)$$

**Политропными** процессами называют процессы, которые протекают при постоянной теплоемкости. Уравнение политропы имеет вид

$$P v^n = \text{const}, \quad (82)$$

где  $n$  – показатель политропы, может принимать любое численное значение в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но для данного процесса эта величина постоянная.

Зависимость между основными параметрами процесса:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (83)$$

Работа расширения в политропном процессе определяется по формуле

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (84)$$

Количество подведенного (или отведенного) тепла можно определить с помощью 1-го закона термодинамики:

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = C_n (T_2 - T_1), \quad (85)$$

где  $C_n$ - теплоемкость идеального газа в политропном процессе.

### Примеры решения задач

27 В закрытом сосуде заключен газ при разрежении 50 мм рт. ст. и температуре 70°C. Показание барометра — 760 мм рт. ст. До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало равным 100 мм. рт. ст.?

Решение:

Так как процесс происходит при  $V = \text{const}$ , то согласно формуле (69) получаем:

$$\frac{760 - 50}{760 - 100} = \frac{273 + 70}{T_2} \quad \text{или} \quad T_2 = \frac{660 \cdot 343}{710} = 318,8 \text{ К}; \quad t_2 = 45,8^\circ \text{С}.$$

28 В закрытом сосуде емкостью 0,6 м<sup>3</sup> содержится воздух при давлении 5 бар и температуре 20°C. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж. Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха в сосуде:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,6}{287 \cdot 293} = 3,57 \text{ кг.}$$

Количество тепла, отводимого от воздуха при  $V = \text{const}$ , определяется уравнением (70):

$$Q = m C_v (t_2 - t_1).$$

Теплоемкость определим по уравнению (45):

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Определим конечную температуру:

$$t_2 = \frac{Q}{m C_v} + t_1 = \frac{-105000}{3,57 \cdot 717,5} + 20 = -20,7^\circ \text{C}.$$

Исходя из соотношения параметров в изохорном процессе (69) имеем:

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 5 \cdot \frac{273 - 20,7}{293} = 4,3 \text{ бар.}$$

29 Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30°C. Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при  $V=\text{const}$  до 16 бар. Принять зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Из соотношения параметров изохорного процесса – уравнение (69) – получаем:

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К}; \quad t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{ С}.$$

Пользуясь данными приложения Б, находим:

$$\bar{C}_{v1} = 0,7173 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \bar{C}_{v2} = 0,7351 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Масса воздуха, находящегося в резервуаре, определяется из уравнения Клапейрона (15):

$$m = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг}.$$

Количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху,

$$Q = 0,8278 \cdot (0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30) = 184,8 \text{ кДж}.$$

30 Какое количество тепла необходимо затратить, чтобы нагреть  $2 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном избыточном давлении 2 бар от 100 до  $500^\circ \text{С}$ ? Какую работу при этом совершит воздух? Давление атмосферы принять равным 760 мм рт. ст.

Решение:

Пользуясь данными приложения Б (табл. Б.3), находим:

$$C_{p1} = 1,0061 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad C_{p2} = 1,0387 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$q_p = 1,0387 \cdot 500 - 1,0061 \cdot 100 = 418,7 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Массу воздуха определяем из уравнения (15):

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{(2+1,013) \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 373} = 5,63 \text{ кг}.$$

Количество тепла

$$Q = m \cdot q = 5,63 \cdot 418,7 = 2357 \text{ кДж}.$$

Найденное количество тепла можно определить не только по массе воздуха, но и по его объему. В этом случае в уравнении (41) используем объемные теплоемкости.

Пользуясь приложением Б, табл. Б.5, находим:

$$C'_{p1} = 1,3004 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) ; C'_{p2} = 1,3427 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Следовательно,

$$q_p = 1,3427 \cdot 500 - 1,3004 \cdot 100 = 541,4 \text{ кДж}/\text{м}^3 .$$

Объем воздуха должен быть приведен к нормальным условиям по уравнению (21). Отсюда

$$V_H = \frac{P V T_H}{T P_H} = \frac{3,013 \cdot 2 \cdot 273}{373 \cdot 1,01} = 4,35 \text{ м}^3 .$$

Таким образом,

$$Q_p = 541,4 \cdot 4,35 = 2356 \text{ кДж} .$$

Работа газа по уравнению (73)

$$L = m R \Delta T = 5,63 \cdot 287 \cdot 400 = 646,4 \text{ кДж} .$$

31 В цилиндре находится воздух при давлении 5 бар и температуре 400 °С. От воздуха отнимается тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура 0 °С. Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л . Определить количество отнятого тепла, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Решение:

Объем воздуха при нормальных условиях легко определить из выражения (21):

$$V_H = \frac{P V T_H}{P_H T} = \frac{5 \cdot 0,4 \cdot 273}{1,013 \cdot 273} = 0,8 \text{ м}^3 .$$



Теплоемкость воздуха находим по приложению Б (табл. Б.5):

$$C'_p = 1,3289 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Количество тепла на основании формулы (74) равно:

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

Количество тепла можно определить не только по объему воздуха, но и по его массе. Масса воздуха определяется из характеристического уравнения (15):

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,4}{287 \cdot 673} = 1,035 \text{ кг}.$$

Теплоемкость воздуха находим по приложению Б:

$$C_p = 1,0283 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

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

Конечный объем определяется из уравнения (72):

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

Изменение внутренней энергии определяем по уравнению (53), данные по объемной теплоемкости взяты из приложения Б:

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

Работа, затраченная на сжатие, по формуле (73)

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

32 Определить, какая часть тепла, подводимого к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая — на изменение внутренней энергии.

Решение:

Аналитическое выражение первого закона термодинамики (50) может быть представлено в виде

$$\frac{du}{dq} + \frac{dl}{dq} = 1.$$

Величина

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{du}{dq}$$

определяет ту долю от всего подводимого к газу тепла, которая превращается в работу расширения. Для идеального газа в изобарном процессе  $du$  определяется по уравнению (52),  $dq$  – по уравнению (74), тогда, принимая  $k = 1,4$ , получаем:

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{1}{1,4} = 0,285.$$

Следовательно, в изобарном процессе только 28,5% тепла, подводимого к газу, превращается в работу. Все остальное тепло (71,5%) расходуется на увеличение внутренней энергии.

33 К газообразным продуктам сгорания, находящимся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, подводится при постоянном давлении столько тепла, что температура смеси поднимается с 500 до 1900 °С. Массовый состав газовой смеси следующий:  $\text{CO}_2 = 15\%$ ;  $\text{O}_2 = 5\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 6\%$ ;  $\text{N}_2 = 74\%$ . Определить количество тепла, подведенное к 1 кг газообразных продуктов сгорания, считая теплоемкость нелинейно зависящей от температуры.

Решение:

Количество тепла, участвующее в изобарном процессе, определяется на основании формулы (74), оно равно разности энтальпий

конечного и начального состояний или произведению теплоемкости газовой смеси на разность температур. Следовательно,

$$q = \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p2i} g_i) t_2 - \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p1i} g_i) t_1.$$

На основании табл. Б.3 получаем:

$$Q_p = (1,2259 \cdot 0,15 + 1,0940 \cdot 0,05 + 2,4166 \cdot 0,06 + 1,1857 \cdot 0,74) \cdot 1900 - \\ - (1,0828 \cdot 0,15 + 0,9793 \cdot 0,05 + 1,9778 \cdot 0,06 + 1,0660 \cdot 0,74) \cdot 500 = 1836 \text{ кДж/кг.}$$

34 1 кг воздуха при температуре 30°C и начальном давлении 1 бар сжимается изотермически до конечного давления 10 бар. Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество тепла, отводимого от газа.

Решение:

Определяем начальный удельный объем воздуха из уравнения состояния (15):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 303}{1 \cdot 10^5} = 0,87 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Исходя из зависимости между параметрами в изотермическом процессе (75), определяем конечный объем:

$$v_2 = v_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,87 \cdot \frac{1}{10} = 0,087 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха, по уравнению (76)

$$l = R T \ln \frac{P_1}{P_2} = 2,303 \cdot 287 \cdot 303 \cdot \lg \frac{1}{10} = -200 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от газа в изотермическом процессе, равно работе, затраченной на сжатие.

35 Как будут соотноситься между собой значения работы изотермического сжатия, вычисленные для равной массы различных газов, при прочих одинаковых условиях?

Решение:

Значения работы изотермического сжатия для 1 кг различных газов при одинаковых условиях выражаются следующими уравнениями (76):

$$l_1 = R_1 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_2 = R_2 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_3 = R_3 T \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ и так далее,}$$

поэтому

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

т.е. работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

36 1 кг воздуха при начальной температуре 30°C и давлении 1 бар сжимается адиабатно до конечного давления 10 бар. Определить затрачиваемую работу, конечные объем и температуру.

Решение:

Из соотношения параметров в адиабатном процессе по уравнению (78) находим:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Принимая  $k = 1,4$ , получаем:

$$T_2 = 303 \cdot 10^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 303 \cdot 10^{0,286} = 585 \text{ К}; \quad t_2 = 312^\circ \text{С}.$$

Затраченная работа по уравнению (80)

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

Конечный объем определяется из уравнения состояния (16):

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{287 \cdot 585}{10 \cdot 10^5} = 0,168 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

37 В двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на 200 °С ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия  $P_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 70$  °С. Показатель адиабаты  $k = 1,36$ ,  $R = 314$  Дж/(кг·К), температура самовоспламенения равна 650 °С. Определить величину работы сжатия и степень сжатия.

Решение:

Из уравнения (78) имеем:

$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left( \frac{723}{343} \right)^{\frac{1}{0,36}} = 2,108^{2,776} = 7,29.$$

Работа сжатия по уравнению (80)

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{314}{0,36} (343 - 723) = - 331,4 \text{ кДж/кг}.$$

38 Адиабатным сжатием повысили температуру воздуха в двигателе так, что она стала равной температуре воспламенения нефти; объем при этом уменьшился в 14 раз.

Определить конечную температуру и конечное давление воздуха, если начальные параметры  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 100$  °С.

Решение:

Конечная температура определяется по формуле (78), отсюда

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 373 \cdot 14^{0,4} = 1067 \text{ К}.$$

Конечное давление определяется соответственно (78):

$$P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 \cdot \left( \frac{1067}{373} \right)^{1.4} = 40 \text{ бар} .$$

39 В баллоне емкостью 100 л находится воздух при давлении 50 бар и температуре 20°C. Давление окружающей среды 1 бар. Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и по адиабате. Определить также минимальную температуру, которую будет иметь воздух в баллоне, если открыть вентиль и выпускать воздух из баллона до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды, и при условии, что теплообмен воздуха с окружающей средой будет отсутствовать.

Решение:

Работа изотермического расширения определяется по уравнению (76):

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 2.303 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0.1 \cdot \lg 50 = 1956 \text{ кДж} .$$

Конечный объем воздуха (75)

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0.1 \cdot 50 = 5 \text{ м}^3 .$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot (5 - 0.1) = 490 \text{ кДж} .$$

Таким образом, полезная работа воздуха составит:

$$1956 - 490 = 1466 \text{ кДж} .$$

Работа адиабатного расширения определяется по формуле

$$L_{\text{ад}} = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{50 \cdot 0,1 \cdot 10^5}{0,4} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{50} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] = 840 \text{ кДж.}$$

Конечный объем воздуха (78)

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,1 \cdot 50^{\frac{1}{1,4}} = 1,636 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot 1,536 = 153,6 \text{ кДж.}$$

Полезная работа воздуха составит:

$$840 - 153,6 = 686,4 \text{ кДж.}$$

Минимальная температура определяется из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 98 \text{ К}; \quad t_2 = -177^\circ \text{C.}$$

40 Из сосуда, содержащего углекислоту при давлении 12 бар и температуре 20°C, вытекает 2/3 содержимого. Определить конечное давление и температуру, если в процессе истечения не происходит теплообмена со средой (k принять равным 1,28).

Решение:

Если из сосуда вытекает 2/3 содержимого, то удельный объем оставшейся в сосуде углекислоты возрастает втрое. Поэтому

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 3^{0,28} = 1,36.$$

Следовательно,

$$T_2 = \frac{T_1}{1,36} = \frac{293}{1,36} = 215,4 \text{ К}; \quad t_2 = 57,6^\circ \text{С.}$$

Конечное давление

$$P_2 = P_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = \frac{12}{4,081} = 2,94 \text{ бар.}$$

41 Воздушный буфер состоит из цилиндра, плотно закрытого подвижным поршнем. Длина цилиндра 50 см, а диаметр 20 см. Параметры воздуха, находящегося в цилиндре, соответствуют параметрам окружающей среды:  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ .

Определить энергию, которую может принять воздушный буфер при адиабатном сжатии воздуха, если движущийся без трения поршень продвинется на 40 см. Определить также конечное давление и конечную температуру воздуха.

Решение:

Начальный объем воздуха

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} l = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 0,5 = 0,0157 \text{ м}^3,$$

а конечный объем

$$V_2 = \frac{1}{5} V_1 = 0,00314 \text{ м}^3.$$

На адиабатное сжатие воздуха, находящегося в цилиндре, будет затрачена работа

$$L = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,0157}{0,4} (1 - 0,5^{0,4}) = -3570 \text{ Дж.}$$

Затрата работы для преодоления атмосферного давления составит:



$$P_1(V_2 - V_1) = 10^5 \left( -\frac{4}{5} \right) \cdot 0,9157 = 1256 \text{ Дж.}$$

Следовательно, аккумулированная в воздушном буфере энергия составит:

$$3570 - 1256 = 2314 \text{ Дж.}$$

Температура и давление в конце процесса определяются из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 1,91 = 558 \text{ К}; \quad P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 1,5^{1,4} = 9,52 \text{ бара.}$$

42 1 кг воздуха при давлении 5 бар и температуре 111 °С расширяется политропно до давления 1 бар. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенного тепла и полученную работу, если показатель политропы равен 1,2.

Решение:

Определяем начальный объем воздуха:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 384}{5 \cdot 10^5} = 0,22 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечный объем воздуха находим из уравнения (83):

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,22 \cdot 5^{\frac{1}{1,2}} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечную температуру проще всего найти из характеристического уравнения (16):

$$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,84}{287} = 293 \text{ К.}$$

Величину работы находим из уравнения (84):

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{0.2} \cdot (384 - 293) = 130600 \text{ Дж / кг.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) = \frac{287}{1.4-1} \cdot (293 - 384) = -65,8 \text{ кДж / кг.}$$

Количество тепла, сообщенного воздуху, по уравнению (85)

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 0.72 \cdot \frac{1.2-1.4}{1.2-1} \cdot (20 - 111) = 65.8 \text{ кДж / кг.}$$

Нетрудно видеть, что в этом процессе внешняя работа совершается за счет подведенного тепла и уменьшения внутренней энергии. Исходя из этого можно проверить полученные результаты следующим образом:

$$q = \Delta u + l; \quad l = q - \Delta u = 65,8 - (-65,8) = 131,6 \text{ кДж / кг.}$$

43 1,5 кг воздуха сжимают политропно от  $P_1=0,9$  бар и  $t_1=18^\circ\text{C}$  до  $P_2=10$  бар; температура при этом повышается до  $t_2=125^\circ\text{C}$ . Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенного тепла.

Решение:

Из соотношения между параметрами политропного процесса (83) можно получить:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{10}{0,9}} = 0,13,$$

отсюда

$$n = \frac{1}{1-0,13} = 1,149.$$

Конечный объем определяем из характеристического уравнения (15):

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{1.5 \cdot 287 \cdot 398}{10 \cdot 10^5} = 0.171 \text{ м}^3.$$

Затраченная работа по уравнению (84)

$$L = \frac{m R}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1.5 \cdot 287}{0.149} \cdot (18 - 125) = -309200 \text{ Дж}.$$

Количество отведенного тепла определяем по уравнению (85), считая теплоемкость воздуха не зависящей от температуры:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1.4-1} = 717.5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 1.5 \cdot 0.7175 \cdot \frac{1.149-1.4}{1.149-1} \cdot (125 - 18) = -195.4 \text{ кДж}.$$

44 Воздух в количестве  $0,01 \text{ м}^3$  при давлении 10 бар и температуре  $25^\circ\text{C}$  расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до 1 бар. Определить конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенное тепло, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателем  $n = 1,3$ .

Решение:

а) Изотермическое расширение

Конечный объем определяется по формуле (75):

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,01 \cdot \frac{10}{1} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то конечная температура  $t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}$ .

Работа газа по уравнению (76)

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot 2,303 \cdot \lg 10 = 23000 \text{ Дж.}$$

Количество подведенного тепла по 1-му закону термодинамики равно работе, т.к. изменение внутренней энергии равно нулю.

б) Адиабатное расширение

Конечный объем определяется по уравнению (77):

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха на основании уравнения (78)

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \cdot (0,1)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 298 \cdot \frac{1}{1,931} = 154,3 \text{ К}; \quad t_2 = -118,7^\circ \text{С}.$$

Работа газа по уравнению (81)

$$L = \frac{1}{1,4-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 12000 \text{ кДж.}$$

в) Политропное расширение

Конечный объем определяется из уравнения (82):

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,3}} = 0,05885 \text{ м}^3.$$

Конечная температура по уравнению (83)

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,3}{1,3}} = 175,2 \text{ К}; \quad t_2 = -97,8^\circ \text{С}.$$

Работа газа по уравнению (84)

$$L = \frac{1}{1,25-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 13700 \text{ кДж.}$$

Подведенное тепло можно определить по следующему уравнению, полученному из уравнений (84) и (85):

$$Q = L \frac{k - n}{k - 1} = 13,7 \cdot \frac{0,1}{0,4} = 3,425 \text{ кДж} .$$

45 20 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 1 бар и температуре 18°С сжимаются по политропе до давления 8 бар, причем показатель политропы равен 1,25. Какую работу надо затратить для получения 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха и какое количество тепла отводится при сжатии?

Решение:

Конечная температура определяется по уравнению (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 291 \cdot \left( \frac{8}{1} \right)^{\frac{0,25}{1,25}} = 291 \cdot 1,51 = 439 \text{ К} .$$

Масса газа определится из характеристического уравнения (15) для начального состояния газа:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{10^5 \cdot 20}{287 \cdot 291} = 23,95 \text{ кг} .$$

Объем воздуха в конце сжатия

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{23,95 \cdot 287 \cdot 439}{8 \cdot 10^5} = 3,77 \text{ м}^3 .$$

Работа газа по формуле (84)

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{10^5}{0,25} \cdot (1 \cdot 20 - 8 \cdot 3,77) = -4064000 \text{ Дж} .$$

Работа, затрачиваемая на получение 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха,

$$l = \frac{-L}{V_2} = -\frac{4064}{3,77} = -1078 \text{ кДж / м}^3 .$$

Количество тепла, отводимого при сжатии воздуха, по уравнению (85) составит:

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 23,95 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,25-1,4}{1,25-1} \cdot 148 = -1548 \text{ кДж} .$$

## Задачи

113 Газ при давлении 10 бар и температуре 20°C нагревается при постоянном объеме до температуры 300°C. Определить конечное давление газа.

Ответ:  $P_2 = 19,56$  бар.

114 В закрытом сосуде емкостью 0,3 м<sup>3</sup> содержится 2,75 кг воздуха при давлении 8 бар и температуре 25°C. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0°C.

Ответ:  $P_2 = 7,32$  бар;  $v = 0,109$  м<sup>3</sup>/кг.

115 В закрытом сосуде заключен газ при давлении 28 бар и температуре 120°C. Чему будет равно конечное давление, если температура упадет до 25°C?

Ответ:  $P_2 = 21,2$  бар.

116 В закрытом сосуде находится газ при разрежении 20 мм рт. ст. и температуре 10°C. Показание барометра составляют 750 мм рт. ст. После охлаждения газа разрежение стало равным 150 мм рт. ст. Определить конечную температуру газа.

Ответ:  $t_2 = -40,4$ °C.

117 До какой температуры нужно нагреть газ при  $V = \text{const}$ , если начальное давление газа 2 бар и температура 20°C, а конечное давление 5 бар.

Ответ: до  $t_2 = 459,5$ °C.

118 В закрытом сосуде емкостью 0,5 м<sup>3</sup> содержится двуокись углерода при  $P_1 = 6$  бар и  $t_1 = 527$ °C. Как изменится давление газа, если от него отнять 100 ккал? Принять зависимость  $C = f(t)$  линейной.

Ответ:  $P_2 = 4,2$  бар.

119 До какой температуры нужно охладить  $0,8 \text{ м}^3$  воздуха с начальным давлением 3 бар и температурой  $15^\circ\text{C}$ , чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 1 бар? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Ответ: до  $t_2 = -177^\circ\text{C}$ ;  $Q = -402 \text{ кДж}$ .

120 Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении 125 бар. Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла, если начальная температура кислорода  $10^\circ\text{C}$ , а конечная -  $30^\circ\text{C}$ . Теплоемкость кислорода считать постоянной, не зависящей от температуры.

Ответ:  $P_2 = 134 \text{ бар}$ ;  $Q = 133 \text{ кДж}$ .

121 В цилиндре диаметром 400 мм содержится 80 л воздуха при давлении 2,9 бар и температуре  $15^\circ\text{C}$ . Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, до какой величины должна увеличиться сила, действующая на поршень, чтобы последний оставался неподвижным, если к воздуху подводятся 20 ккал тепла.

Ответ:  $N = 51,1 \text{ кН}$ .

122 В калориметрической бомбе емкостью  $300 \text{ см}^3$  находится кислород при давлении 26 бар и температуре  $22^\circ\text{C}$ . Определить температуру кислорода после подвода к нему тепла в количестве 1 ккал, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ:  $t_2 = 593^\circ\text{C}$ .

123 Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав:  $\text{CO}_2$  - 14%;  $\text{O}_2$  - 6%;  $\text{N}_2$  - 75%;  $\text{H}_2\text{O}$  - 5%, нагревается при постоянном давлении от 600 до  $2000^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, подведенного к 1 кг газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Ответ:  $q_p = 1841 \text{ кДж/кг}$ .

124 Определить количество тепла, необходимое для нагревания  $2000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении 5 бар от  $150$  до  $600^\circ\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Ответ:  $Q_p = 3937 \text{ МДж}$ .

125 В установке воздушного отопления внешний воздух при температуре  $-15^\circ\text{C}$  нагревается в калорифере при  $P = \text{const}$  до  $60^\circ\text{C}$ . Какое количество тепла надо затратить для нагрева  $1000 \text{ м}^3$  наружного воздуха? Теплоемкость воздуха считать постоянной. Давление воздуха принять равным  $760 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ:  $Q = 103\,033 \text{ кДж}$ .

126  $0,2 \text{ м}^3$  воздуха, имеющего начальную температуру  $18^\circ\text{C}$ , подогреваются в цилиндре диаметром  $50 \text{ см}$  при постоянном давлении  $2 \text{ бар}$  до температуры  $200^\circ\text{C}$ . Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченного тепла, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ:  $L = 25\,000 \text{ Дж}$ ;  $h = 0,64 \text{ м}$ ;  $Q = 88,3 \text{ кДж}$ .

127 На отходящих газах двигателя мощностью  $N = 2500 \text{ кВт}$  установлен подогреватель, через который проходит  $60\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $15^\circ\text{C}$  и давлении  $1,01 \text{ бар}$ . Температура воздуха после подогревателя равна  $75^\circ\text{C}$ . Определить, какая часть тепла топлива использована в подогревателе? Коэффициент полезного действия двигателя принять равным  $0,33$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ:  $17,4\%$ .

128 К  $1 \text{ м}^3$  воздуха, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении  $335 \text{ кДж}$  тепла. Объем воздуха при этом увеличивается до  $1,5 \text{ м}^3$ . Начальная температура воздуха равна  $15^\circ\text{C}$ . Какая устанавли-



вается в цилиндре температура и какова работа расширения? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ:  $t_2 = 159^\circ\text{C}$ ;  $L = 95,1$  кДж.

129  $2\text{ м}^3$  воздуха с начальной температурой  $15^\circ\text{C}$  расширяются при постоянном давлении до  $3\text{ м}^3$  вследствие сообщения газу  $837$  кДж тепла. Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

Ответ:  $t_2 = 159^\circ\text{C}$ ;  $P = 2,4$  бар;  $L = 239$  кДж.

130 Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура газов  $300^\circ\text{C}$ , конечная –  $160^\circ\text{C}$ ; расход газов равен  $1000$  кг/ч. Начальная температура воздуха составляет  $15^\circ\text{C}$ , а расход его равен  $910$  кг/ч. Определить температуру нагретого воздуха, если потери воздухоподогревателя составляют  $4\%$ . Средние теплоемкости для отходящих из котла газов и воздуха принять соответственно равными  $1,0467$  и  $1,0048$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $168,9^\circ\text{C}$ .

131 В цилиндре двигателя внутреннего сгорания находится воздух при температуре  $500^\circ\text{C}$ . Вследствие подвода тепла конечный объем воздуха увеличился в  $2,2$  раза. В процессе расширения воздуха давление в цилиндре практически оставалось постоянным. Определить конечную температуру воздуха и удельные количества тепла и работы, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ:  $t_2 = 1428^\circ\text{C}$ ;  $q_p = 1088,7$  кДж/кг;  $l = 266,3$  кДж/кг.

132 Воздух, выходящий из компрессора с температурой  $190^\circ\text{C}$ , охлаждается в охладителе при постоянном давлении  $5$  бар до температуры  $20^\circ\text{C}$ . При этих параметрах производительность компрессора

равна  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Определить часовой расход охлаждающей воды, если она нагревается на  $10^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $V = 733 \text{ л/ч}$ .

133 При сжигании в топке парового котла каменного угля объем продуктов сгорания составляет  $11,025 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Анализ продуктов сгорания показывает следующий их объемный состав:  $\text{CO}_2$  -  $10,3\%$ ;  $\text{O}_2$  -  $7,8\%$ ;  $\text{N}_2$  -  $75,3\%$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  -  $6,6\%$ . Считая количество и состав продуктов сгорания неизменными по всему газовому тракту парового котла, а зависимость теплоемкости от температуры — нелинейной, определить количество тепла, теряемого с уходящими газами (на  $1 \text{ кг}$  топлива), если на выходе из котла температура газов равна  $180^\circ\text{C}$ , а температура окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ . Давление продуктов сгорания принято равным атмосферному.

Ответ:  $Q_{yx}=2418 \text{ кДж/кг}$ .

134 Воздух в количестве  $0,5 \text{ кг}$  при  $P_1 = 5 \text{ бар}$  и  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество тепла, сообщаемого газу.

Ответ:  $P_2 = 1 \text{ бар}$ ;  $L = Q = 70 \text{ кДж}$ .

135 Для осуществления изотермического сжатия  $0,8 \text{ кг}$  воздуха при  $P_1 = 1 \text{ бар}$  и  $t = 25^\circ\text{C}$  затрачена работа в  $100 \text{ кДж}$ . Как велико давление  $P_2$  сжатого воздуха и сколько тепла необходимо при этом отвести от газа?

Ответ:  $P_2 = 3,22 \text{ бар}$ ;  $Q = - 90 \text{ кДж}$ .

136  $8 \text{ м}^3$  воздуха при  $P_1 = 0,9 \text{ бар}$  и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  сжимаются при постоянной температуре до  $8,1 \text{ бар}$ . Определить конечный объем, затраченную работу и количество тепла, которое необходимо отвести от газа.

Ответ:  $V_2 = 0,889 \text{ м}^3$ ;  $L = Q = - 1581 \text{ кДж}$ .

137 При изотермическом сжатии  $0,3 \text{ м}^3$  воздуха с начальными параметрами  $P_1 = 10 \text{ бар}$  и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  отводится  $500 \text{ кДж}$  тепла. Определить конечный объем и конечное давление.

Ответ:  $V_2 = 0,057 \text{ м}^3$ ;  $P_2 = 52,6 \text{ бар}$ .

138 В воздушный двигатель подается  $0,0139 \text{ м}^3/\text{с}$  воздуха при давлении  $5 \text{ бар}$  и  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ . Определить мощность, полученную при изотермическом расширении воздуха в машине, если  $P_2 = 1 \text{ бар}$ .

Ответ:  $L = 11,188 \text{ кВт}$ .

139 Воздух при давлении  $1 \text{ бар}$  и температуре  $27^\circ\text{C}$  сжимается в компрессоре до давления  $35 \text{ бар}$ . Определить величину работы, затраченной на сжатие  $100 \text{ кг}$  воздуха, если сжатие производится изотермически.

Ответ:  $L = - 30 576 \text{ кДж}$ .

140 При изотермическом сжатии  $2,1 \text{ м}^3$  азота, взятого при давлении  $1 \text{ бар}$ , от газа отводится  $335 \text{ кДж}$  тепла. Определить конечный объем, конечное давление и затраченную работу.

Ответ:  $V_2 = 0,426 \text{ м}^3$ ;  $L = - 335 \text{ кДж}$ ;  $P_2 = 4,93 \text{ бар}$ .

141  $0,5 \text{ м}^3$  кислорода при давлении  $10 \text{ бар}$  и температуре  $30^\circ\text{C}$  сжимаются изотермически до объема, в  $5$  раз меньше начального. Определить объем и давление кислорода после сжатия, работу сжатия и количество тепла, отнятого у газа.

Ответ:  $P_2 = 50 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,1 \text{ м}^3$ ;  $L = - 805 \text{ кДж}$ .

142 Газ расширяется в цилиндре изотермически до объема, в  $5$  раз больше первоначального. Сравнить величины работ: полного расширения и расширения на первой половине хода поршня.

Ответ:  $L_2/L_1 = 0,684$ .

143 Воздуху в количестве  $0,1 \text{ м}^3$  при давлении 10 бар и температуре  $200^\circ\text{C}$  сообщается 125 кДж тепла; температура его при этом не изменяется. Определить конечное давление, конечный объем и получаемую работу.

Ответ:  $P_2 = 2,86 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$ ;  $L = 125 \text{ кДж}$ .

144 1 кг воздуха при температуре  $15^\circ\text{C}$  и начальном давлении 1 бар адиабатно сжимается до 8 бар. Определить работу, конечный объем и конечную температуру.

Ответ:  $t_2 = 248^\circ\text{C}$ ;  $v_2 = 0,187 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $l = -167,2 \text{ кДж/кг}$ .

145 Воздух при давлении 4,5 бар, расширяясь адиабатно до 1,2 бар, охлаждается до  $t_2 = -45^\circ\text{C}$ . Определить начальную температуру и работу, совершенную 1 кг воздуха.

Ответ:  $t_1 = 61^\circ\text{C}$ ;  $l = 75,3 \text{ кДж/кг}$ .

146 1 кг воздуха, занимающий объем  $0,0887 \text{ м}^3/\text{кг}$  при давлении 10 бар, расширяется до 10-кратного объема. Определить конечное давление и работу, совершенную воздухом, в изотермическом и адиабатном процессах.

Ответ: 1)  $T = \text{const}$ ;  $P_2 = 1 \text{ бар}$ ;  $l = 204 \text{ кДж/кг}$ ;

2)  $dQ = 0$ ;  $P_2 = 0,4 \text{ бар}$ ;  $l = 133,5 \text{ кДж/кг}$ .

147 Воздух при температуре  $25^\circ\text{C}$  адиабатно охлаждается до  $t_2 = -55^\circ\text{C}$ ; давление при этом падает до 1 бар. Определить начальное давление и работу расширения 1 кг воздуха.

Ответ:  $P_1 = 3 \text{ бар}$ ;  $l = 57,4 \text{ кДж/кг}$ .

148  $0,8 \text{ м}^3$  углекислого газа при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 7 бар адиабатно расширяются до трехкратного объема. Определить конечные параметры, величину полученной работы (показатель адиабаты принять равным 1,28).

Ответ:  $P_2 = 1,71 \text{ бар}$ ,  $t_2 = -57,6^\circ\text{C}$ ;  $L = 535,7 \text{ кДж}$ .

149 До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси? Начальные параметры:  $P_1 = 1$  бар;  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Температура воспламенения смеси  $t_2 = 550^\circ\text{C}$ ; показатель адиабаты - 1,39.

Ответ:  $P_2 = 42$  бар.

150 Работа, затраченная на адиабатное сжатие 3 кг воздуха, составляет 471 кДж. Начальное состояние воздуха характеризуется параметрами:  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ ;  $P_1 = 1$  бар. Определить конечную температуру и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $t_2 = 234^\circ\text{C}$ ;  $U_2 - U_1 = -471$  кДж.

151 В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении 1 бар и температуре  $50^\circ\text{C}$ . Объем камеры сжатия двигателя составляет 16% от объема, описываемого поршнем. Определить конечное давление и конечную температуру газовой смеси при адиабатном ее сжатии. Показатель адиабаты принять равным 1,38.

Ответ:  $P_2 = 4$  бар;  $t_2 = 412^\circ\text{C}$ .

152 В двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимается выше температуры воспламенения нефти. Какое минимальное давление должен иметь воздух в конце процесса сжатия, если температура воспламенения нефти равна  $800^\circ\text{C}$ ? Во сколько раз при этом уменьшится объем воздуха? Начальное давление воздуха 1 бар, начальная температура воздуха  $80^\circ\text{C}$ . Сжатие воздуха считать адиабатным.

Ответ:  $P_2 = 49$  бар;  $V_1 / V_2 = 16$ .

153 Объем воздуха при адиабатном сжатии в цилиндре двигателя внутреннего сгорания уменьшается в 13 раз. Начальная темпе-

ратура воздуха перед сжатием  $77^{\circ}\text{C}$ , а начальное давление  $0,9$  бар. Определить температуру и давление воздуха после сжатия.

Ответ:  $t_2 = 703^{\circ}\text{C}$ ;  $P_2 = 32,7$ бар.

154  $2$  кг воздуха при давлении  $1$  бар и температуре  $15^{\circ}\text{C}$  адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления  $7$  бар. Определить конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие.

Ответ:  $t_2 = 229^{\circ}\text{C}$ ;  $L = - 307,1$  кДж.

155  $1$  м<sup>3</sup> воздуха при давлении  $0,95$  бар и начальной температуре  $10^{\circ}\text{C}$  сжимается по адиабате до  $3,8$  бар. Определить температуру и объем воздуха в конце сжатия и работу, затраченную на сжатие.

Ответ:  $t = 148^{\circ}\text{C}$ ;  $V_2 = 0,373$  м<sup>3</sup>;  $L = - 117,5$  кДж.

156 Воздух при температуре  $127^{\circ}\text{C}$  изотермически сжимается так, что объем его становится равным  $1/4$  начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления. Определить температуру воздуха в конце адиабатного расширения.

Ответ:  $t_2 = - 4^{\circ}\text{C}$ .

157  $1$  кг воздуха при температуре  $17^{\circ}\text{C}$  сжимается адиабатно до объема, составляющего  $1/5$  начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема. Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

Ответ:  $l = 67$  кДж/кг.

158 Воздух при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  должен быть охлажден посредством адиабатного расширения до температуры  $-60^{\circ}\text{C}$ . Конечное давление воздуха при этом должно составлять  $1$  бар. Определить начальное давление воздуха и удельную работу расширения.

Ответ:  $P_1 = 3,04$  бар;  $l = 57,8$  кДж/кг.

159 Воздух в количестве  $3 \text{ м}^3$  расширяется политропно от давления 5,4 бара и температуры  $45^\circ\text{C}$  до давления 1,5 бара. Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным  $10 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенного тепла.

Ответ:  $m = 1,064$ ;  $t_2 = 21,4^\circ\text{C}$ ;  $L = 1875 \text{ кДж}$ ;  $Q = 1575 \text{ кДж}$ .

160 В цилиндре двигателя с изобарным подводом тепла происходит сжатие воздуха по политропе с показателем  $n = 1,33$ . Определить температуру и давление воздуха в конце сжатия, если степень сжатия  $\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = 14$ ,  $t = 77^\circ\text{C}$  и  $P_1 = 1 \text{ бар}$ .

Ответ:  $t_2 = 564^\circ\text{C}$ ;  $P_2 = 33,9 \text{ бар}$ .

161 В процессе политропного сжатия затрачивается работа, равная 195 кДж, причем в одном случае от газа отводится 250 кДж, а в другом - газу сообщается 42 кДж. Определить показатели обеих политроп.

Ответ: 1)  $n = 0,9$ ; 2)  $n = 1,49$ .

162  $1,5 \text{ м}^3$  воздуха сжимаются от 1 бар и  $17^\circ\text{C}$  до 7 бар; конечная температура при этом равна  $100^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, которое необходимо отвести, затраченную работу и показатель политропы?

Ответ:  $n = 1,147$ ;  $L = -290 \text{ кДж}$ ;  $Q = 183 \text{ кДж}$ .

163 Горючая смесь в цилиндре двигателя, имеющая температуру  $100^\circ\text{C}$  и давление 0,9 бар, подвергается сжатию по политропе с показателем  $n = 1,33$ . Определить конечное давление и степень сжатия в момент, когда температура достигнет  $400^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\epsilon = 5,9$ ;  $P_2 = 9,5 \text{ бар}$ .

164 В процессе политропного расширения воздуху сообщается 83,7 кДж тепла. Определить изменение внутренней энергии воздуха и произведенную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а давление его уменьшилось в 8 раз.

Ответ:  $\Delta U = 16,7$  кДж;  $L = 6702$  Дж.

165 Воздух расширяется по политропе, совершая при этом работу, равную 270 кДж, причем в одном случае воздуху сообщается 420 кДж тепла, а в другом - от воздуха отводится 92 кДж тепла. Определить в обоих случаях показатели политропы.

Ответ: 1)  $n = 0,78$ ; 2)  $n = 1,88$ .

166 Смесь коксового газа с воздухом сжимается по политропе с показателем  $n = 1,38$ ; начальное давление  $P_1 = 1$  бар, начальная температура  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ . Определить конечную температуру и давление, если степень сжатия  $\varepsilon = 4$ .

Ответ:  $t_2 = 276^\circ\text{C}$ ;  $P_2 = 6,8$  бар.

167 В газовом двигателе политропно сжимается горючая смесь до температуры  $450^\circ\text{C}$ . Начальное давление смеси 0,9 бара, начальная температура  $80^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,35$ . Определить работу сжатия и степень сжатия. Газовую постоянную смеси принять равной 340 Дж/(кг·К).

Ответ:  $l = - 360$  кДж/кг;  $\varepsilon = 7,82$ .

168  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 2 бар и температуре  $40^\circ\text{C}$  сжимаются до давления 11 бар и объема  $0,5 \text{ м}^3$ . Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенного тепла.

Ответ:  $n = 1,23$ ;  $L = - 652$  кДж;  $Q = - 272$  кДж.

169 Находящийся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания воздух при давлении 0,9 бар и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  должен быть так сжат, чтобы конечная температура его поднялась до  $650^\circ\text{C}$ . Определить, какое



должно быть отношение объема камеры сжатия двигателя к объему, описываемому поршнем, если сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,3$ .

Ответ:  $V_2 = 0,05121 V_n$ .

170 1 кг воздуха при давлении 4 бар и температуре 100 °С расширяется до давления 1 бар. Определить конечную температуру, количество тепла и совершенную работу, если расширение происходит: а) изохорно, б) изотермически, в) адиабатно и г) политропно с показателем  $n = 1,2$ .

Ответ: а)  $t_2 = - 180$  °С;  $l = 0$ ;  $q = - 202$  кДж/кг;

б)  $t_1 = t_2$ ,  $l = 148,2$  кДж/кг;  $q = 148,2$  кДж/кг;

в)  $t_2 = - 22$  °С;  $l = 87,5$  кДж/кг;  $q = 0$ ;

г)  $t_2 = 24$  °С;  $l = 10,9$  кДж/кг,  $q = 54,5$  кДж/кг.

171 5 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 4 бар и 60 °С расширяются по политропе до трехкратного объема и давления 1 бар. Определить показатель политропы, работу, количество сообщенного извне тепла и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $n = 1,26$ ;  $L = 1923$  кДж;

$Q = 672,4$  кДж;  $U_2 - U_1 = - 1250,6$  кДж.

## 1.7 Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем. Математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \quad (86)$$

где  $dS$  — бесконечно малое приращение энтропии системы;

$dQ$  — бесконечно малое количество тепла, полученного системой от источника тепла;

$T$  — абсолютная температура источника тепла.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства — обратимым процессам. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = T dS, \quad (87)$$

а так как согласно первому закону термодинамики

$$dQ = dU + P dV,$$

то уравнение (87) принимает следующий вид:

$$T dS = dU + P dV .$$

**Изменение энтропии** между двумя произвольными состояниями газа 1 и 2 определяют по следующим формулам:

при **переменной теплоемкости**, считая зависимость ее от температуры линейной, -

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1), \quad (88)$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} + b (T_2 - T_1), \quad (89)$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{P_2}{P_1} + a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1); \quad (90)$$

при постоянной теплоемкости -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (91)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (92)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (93)$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат TS имеют следующий вид (при постоянной теплоемкости):

уравнение изохоры -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (94)$$

уравнение изобары -

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (95)$$

уравнение изотермы -

$$T = \text{const}, \quad (96)$$

при этом изменение энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}; \quad (97)$$

уравнение адиабаты -

$$s = \text{const}; \quad (98)$$

(127)

(128)

(129)

уравнение политропы -

$$s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (99)$$

Широким распространением при решении термодинамических задач пользуется диаграмма TS. Адиабаты в этой диаграмме изображаются вертикалями, изотермы — горизонталями, изохоры и изобары идеального газа — логарифмическими кривыми. Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рис. 1.

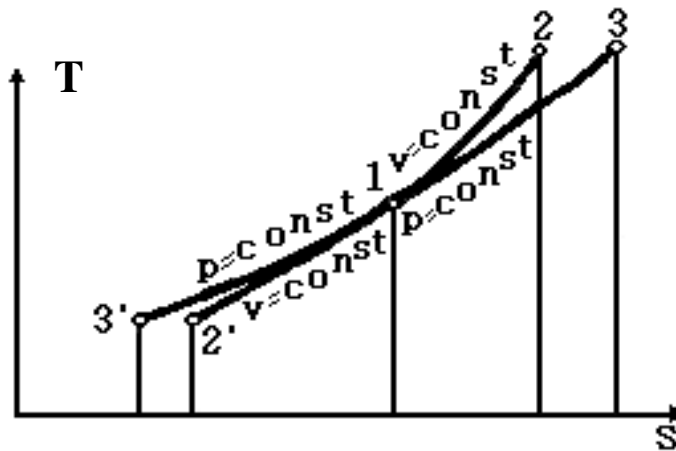


Рисунок 1 – Изображение изобарного и изохорного процессов на TS-диаграмме

Если работа совершается с помощью газа, параметры которого отличаются от параметров окружающей среды, то **максимальная работа**, которую может произвести этот газ, достижима лишь при условии его перехода от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. При этом **максимальная полезная работа** меньше максимальной работы на величину работы вытеснения воздуха окружающей среды.

Величина максимальной полезной работы определяется формулой

$$I_{\max \text{ полезн}} = u_1 - u_2 - T_0(s_1 - s_2) - P_0(v_2 - v_1). \quad (100)$$

В этой формуле параметры, имеющие индекс 1 и 2, относятся соответственно к начальному и конечному состоянию источника работы, а параметры с индексом 0 относятся к рабочей среде.

Так как выражения

$$u_1 - u_2 \text{ и } T_0(S_1 - S_2)$$

представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процесса, то формулу (97) можно представить в следующем виде:

$$I_{\max \text{ полезн}} = I_{\text{ад}} - I_{\text{из}} - P_0(v_2 - v_1). \quad (101)$$

### Примеры решения задач

46 1 кг кислорода при температуре 127°C расширяется до пятикратного объема; температура его при этом падает до 27°C. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

По уравнению (91)

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{259,6}{1,4-1} \ln \frac{300}{400} + 259,6 \ln 5 = 0,23 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

47 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при  $V = \text{const}$  давление повышается в 1,5 раза. Определить общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

Изменение энтропии в адиабатном процессе будет равно нулю.

Изменение энтропии в изохорном процессе определится по формуле (94):

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{P_3}{P_2} = c_v \ln 1,5 = 2,303 \frac{287}{1,4-1} \lg 1,5 = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

следовательно,

$$\Delta s = \Delta s_v = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

48  $10 \text{ м}^3$  воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры  $400^\circ\text{C}$ . Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы  $n = 2,2$ . Считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить энтропию воздуха в конце каждого процесса.

Решение:

Находим массу  $10 \text{ м}^3$  воздуха при нормальных условиях:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 10}{287 \cdot 273} = 12,9 \text{ кг}.$$

Определяем изменение энтропии в каждом из перечисленных процессов:

1) изохорное сжатие -

$$\Delta s_1 = s_1 = m c_v \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 8,42 \text{ кДж}/\text{К};$$

2) изобарное сжатие -

$$\Delta s_2 = s_2 = m c_p \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 1,0117 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 11,78 \text{ кДж}/\text{К};$$

3) адиабатное сжатие -

$$\Delta s = s_3 = 0;$$

4) политропное сжатие -

$$\Delta s_4 = s_4 = m c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \frac{2,2-1,4}{2,2-1} 2,303 \lg \frac{673}{273} = 5,56 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

49 В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от 25 до - 37 °С. Начальное давление воздуха 4 бар, количество его 2 кг. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенного к воздуху тепла составляет 89,2 кДж.

Решение:

Количество тепла, сообщаемого газу в политропном процессе, на основании уравнения (85) составляет

$$Q = m c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) .$$

Подставляя значения известных величин, получаем:

$$\frac{n-k}{n-1} = - \frac{89,2}{2 \cdot 0,723 \cdot 62} = - 0,995 .$$

Отсюда показатель политропы  $n = 1,2$ .

Из соотношения параметров политропного процесса определяем конечное давление:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} ; \quad P_2 = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 4 \left( \frac{236}{298} \right)^6 = 1 \text{ бар} .$$

Изменение энтропии по уравнению (92)

$$\Delta S = 2 \cdot 2,3 \left[ \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} \lg \frac{236}{298} - 287 \lg \frac{1}{4} \right] = 0,338 \text{ кДж}/\text{К} .$$

50 В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении 50 бар и температуре 20 °С. Параметры среды:  $P_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20$  °С.

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  $P_1 = 50$  бар до давления среды  $P_2 = 1$  бар. Максимальная полезная работа определяется на основании формулы (100):

$$L_{\text{max полезн}} = T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1)$$

или

$$L_{\text{max полезн}} = m T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1).$$

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг};$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{50 \cdot 0,3}{1} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе определяется по формуле (97)

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{P_1}{P_2},$$

то

$$\begin{aligned} L_{\text{max полезн}} &= m T_0 R \ln \frac{P_1}{P_2} - P_0 (V_2 - V_1) = \\ &= 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot 2,3 \cdot 1,699 - 10^5 (15 - 0,3) = 4377 \text{ кДж}. \end{aligned}$$



51 Определить максимальную полезную работу, которая может быть произведена 1 кг кислорода, если его начальное состояние характеризуется параметрами  $t_1 = 400^\circ\text{C}$  и  $P_1 = 1$  бар, а состояние среды - параметрами  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 1$  бар.

Решение:

Максимальная работа, которую произведет при данных условиях кислород, может быть получена лишь при условии перехода его от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. Так как температура кислорода в начальном состоянии выше температуры среды, то прежде всего необходимо обратимым процессом снизить температуру кислорода до температуры среды. Таким процессом может явиться только адиабатное расширение кислорода. При этом конечный объем и конечное давление определяются из следующих соотношений:

$$\frac{v_a}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{260 \cdot 673}{1 \cdot 10^5} = 1,75 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$v_a = v_1 \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,75 \left( \frac{673}{293} \right)^{2,5} = 14,05 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$p_a = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{259,6 \cdot 293}{14,05} = 0,0542 \text{ бар}.$$

После адиабатного расширения необходимо обратимым путем при  $t = \text{const}$  сжать кислород от давления 0,0542 бар до давления окружающей среды, т. е. осуществить изотермическое сжатие кислорода до 1 бар. При этом конечный объем кислорода

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{260 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,762 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Максимальная полезная работа определяется по формуле (101):

$$L_{\max \text{ полезн}} = I_{\text{АД}} - I_{\text{ИЗ}} - P_0(v_2 - v_1) = 124,8 \text{ кДж/кг.}$$

Задача может быть решена также и графическим способом – через площади на PV-диаграмме.

### Задачи

172 1 кг воздуха сжимается от  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  до  $P_2 = 5$  бар и  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ:  $\Delta s = -0,196 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

173 Определить приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до  $400^\circ\text{C}$ ; б) при нагревании его по изохоре от 0 до  $880^\circ\text{C}$ ; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ: а)  $\Delta s_p = 2,744 \text{ кДж/K}$ ;

б)  $\Delta s_v = 3,134 \text{ кДж/K}$ ; в)  $\Delta s_T = 2,359 \text{ кДж/K}$ .

174 1 кг воздуха сжимается по политропе от 1 бар и  $20^\circ\text{C}$  до 8 бар при  $n = 1,2$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенного тепла и затраченную работу.

Ответ:  $t_2 = 141^\circ\text{C}$ ;  $q = -87,1 \text{ кДж/кг}$ ;

$\Delta s = -0,02445 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $l = -173,0 \text{ кДж/кг}$ .

175 В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 100 бар. Температура среды  $20^\circ\text{C}$ , давление среды 1 бар. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

Ответ:  $L_{\max \text{ полезн}} = 7220 \text{ кДж}$ .

176 Торпеда приводится в действие и управляется автоматически, двигаясь на заданной глубине. Для двигателя торпеды использу-

ется имеющийся в ней запас сжатого воздуха. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести двигатель торпеды, если объем сжатого воздуха в ней 170 л, давление 180 бар, а температура воздуха и морской воды  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ . Торпеда отрегулирована на движение под уровнем моря на глубине 4 м. Определить также силу, с которой торпеда устремляется вперед, если радиус ее действия равен 4 км, а потерями привода можно пренебречь.

Ответ:  $L_{\text{max полезн}} = 11810 \text{ кДж}$ ;  $N = 295 \text{ Н}$ .

177. В сосуде объемом 400 л заключен воздух при давлении 1 бар и температуре  $40^\circ\text{C}$ . Параметры среды:  $P_0 = 1 \text{ бар}$  и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Определить максимальную полезную работу, которую может произвести воздух, заключенный в сосуде.

Ответ:  $L_{\text{max полезн}} = 4600 \text{ Дж}$ .

178 Айсберг массой  $10^9 \text{ кг}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  дрейфует в Гольфстриме, температура воды в котором  $20^\circ\text{C}$ . Через некоторое время айсберг растаял и осталась вода при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии океанской воды, связанное с таянием айсберга.

Ответ:  $\Delta S = 1500000 \text{ МДж/К}$ .

179 Определить изменение энтропии кислорода массой 1 кг при давлении 1 МПа и температуре  $427^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $S = 0,2 \text{ кДж}$ .

180 При подземном взрыве ядерной бомбы произошел выброс горячей породы массой  $10^{10} \text{ кг}$  при температуре 3000 К. Выброшенная порода остывает до температуры земной коры 600 К. Удельную теплоемкость породы принять  $3352 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Определить изменение энтропии выброшенной породы.

Ответ:  $\Delta S = 5,36 \cdot 10^{13} \text{ Дж/К}$ .

## 1.8 Круговые процессы

С помощью второго закона термодинамики можно определять степень совершенства процесса перехода тепла в работу в тепловых двигателях. Переход тепла в работу в них осуществляется в результате круговых процессов или циклов.

**Круговым процессом** или **циклом** называют совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

Работа кругового процесса ( $l_0$ ) изображается на PV-диаграмме площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла. Прямой цикл ( $l_0 > 0$ ) характерен для тепловых двигателей, обратный цикл ( $l_0 < 0$ ) – для холодильных машин.

Для оценки степени совершенства любого цикла вводят термический коэффициент полезного действия  $\eta_t$ :

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}, \quad (102)$$

где  $q_1$  - количество тепла, заимствованного 1 кг рабочего тела от внешнего (или верхнего) источника тепла;

$q_2$  - количество тепла, отданного 1 кг рабочего тела внешнему охладителю (или нижнему источнику);

$l_0$  - полезно использованное в цикле тепло.

**Цикл Карно** состоит из двух изотерм 1-2 и 3-4 и двух адиабат 2-3 и 4-1 (рис. 2 - 3). В цикле Карно так же, как и в любом другом цикле, нельзя перевести все подведенное тепло в работу. Для цикла Карно уравнение для термического коэффициента полезного действия принимает вид

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (103)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - соответственно температуры верхнего и нижнего источника тепла, К.

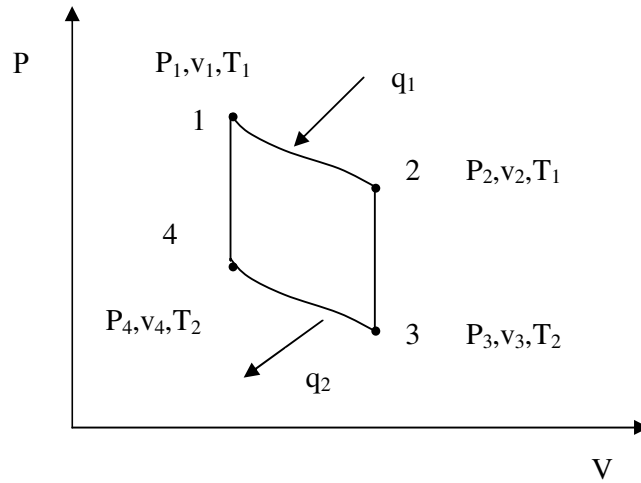


Рисунок 2 – Прямой обратимый цикл Карно в PV-координатах

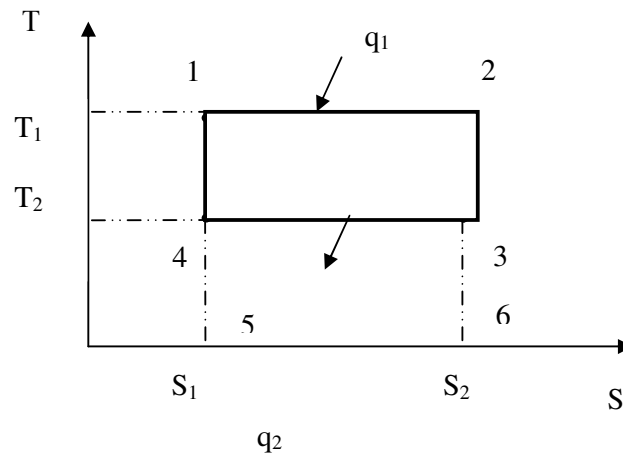


Рисунок 3 – Прямой обратимый цикл Карно в TS-координатах

Пользуясь TS-диаграммой, можно определить термический КПД цикла графическим путем:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{\text{пл. 1-2-3-4}}{\text{пл. 1-2-6-5}} \quad (104)$$

Цикл Карно в заданном диапазоне температур  $T_1$  и  $T_2$  имеет наибольший термический КПД по сравнению с любым другим циклом. Однако по ряду практических соображений цикл Карно в тепловых двигателях не осуществляется.

В настоящее время в **двигателях внутреннего сгорания** (ДВС) осуществляются следующие циклы:

а) с подводом тепла **при постоянном объеме** (цикл состоит из двух адиабат и двух изохор – рис. 4), характеристиками которого являются степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ , термический КПД  $\eta_t$ :

$$\epsilon = V_1 / V_2; \quad \lambda = P_3 / P_2; \quad (105)$$

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) = 1 - 1 / \epsilon^{k-1}, \quad (106)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

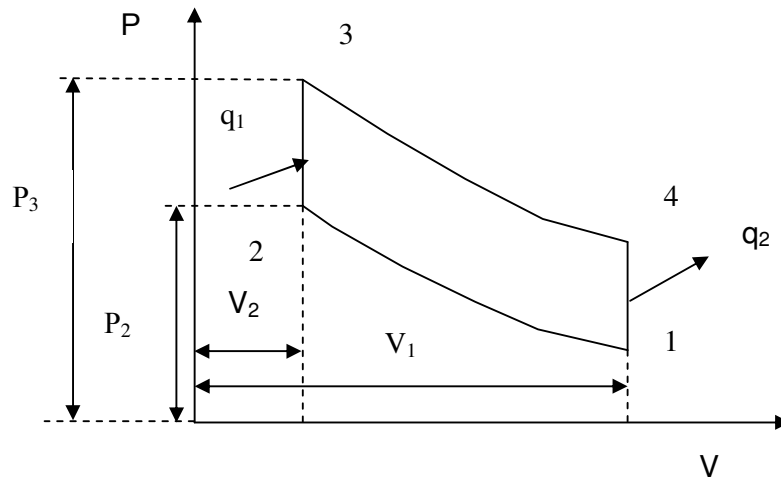


Рисунок 4 – PV-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме

б) с подводом тепла **при постоянном давлении** (цикл состоит

из двух адиабат, одной изобары и одной изохоры - рис. 5), характеристиками которого являются: степень сжатия  $\epsilon$ , степень предварительного расширения  $\rho$ , термический КПД  $\eta_t$ :

$$\epsilon = v_1 / v_2; \quad \rho = v_3 / v_2; \quad (107)$$

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = c_v (T_4 - T_1) / c_p (T_3 - T_2). \quad (108)$$

или

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}. \quad (109)$$

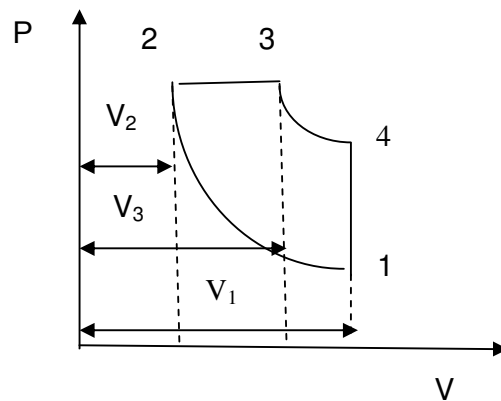


Рисунок 5 – PV-диаграмма цикла ДВС с подводом теплоты при  $P = \text{const}$

в) **смешанный цикл**, с подводом части тепла при постоянном объеме и части - при постоянном давлении (цикл состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары - рис. 6), характеристиками которого являются: степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ , степень предварительного расширения  $\rho$  и термический КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)}. \quad (110)$$

Методика определения термического КПД более сложных циклов приведена в задаче 114.

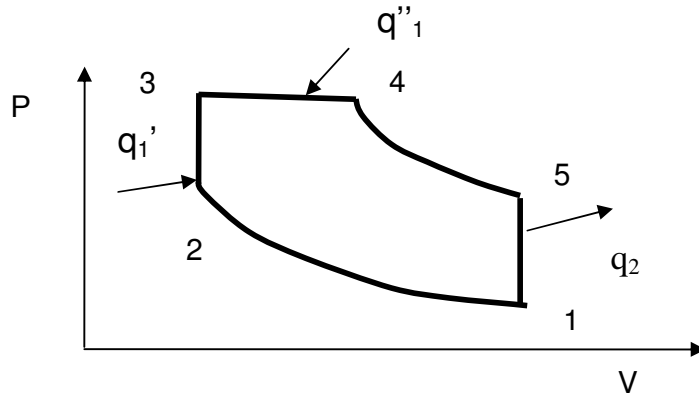


Рисунок 6 – PV-диаграмма цикла ДВС со смешанным подводом теплоты

**Газотурбинные установки (ГТУ)** могут быть 2 видов: установки с подводом теплоты при постоянном давлении и установки с подводом теплоты при постоянном объеме. Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива **при  $P = \text{const}$**  (рис. 7) состоит из двух адиабат и двух изобар.

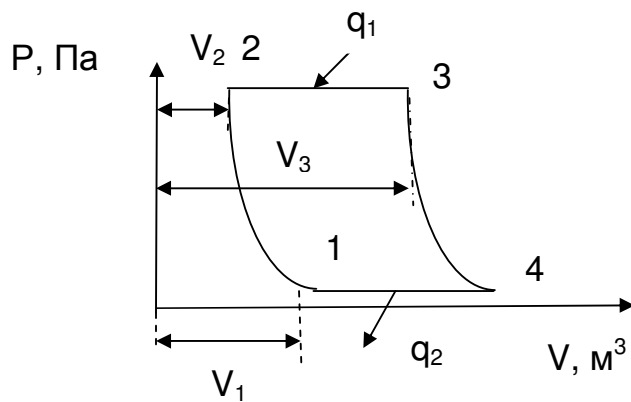


Рисунок 7 – PV-диаграмма цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении

Основными характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре  $\beta$  и термический КПД:



$$\beta = \frac{P_2}{P_1}; \quad (111)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (112)$$

Цикл газотурбинной установки со сгоранием топлива **при  $V = \text{const}$**  (рис. 8) состоит из двух адиабат, одной изохоры и одной изобары. Основными характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре  $\beta$ , степень добавочного повышения давления  $\lambda$  и термический КПД:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \lambda = \frac{P_3}{P_2}; \quad (113)$$

$$\eta_t = 1 - k \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{k}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}, \quad (114)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

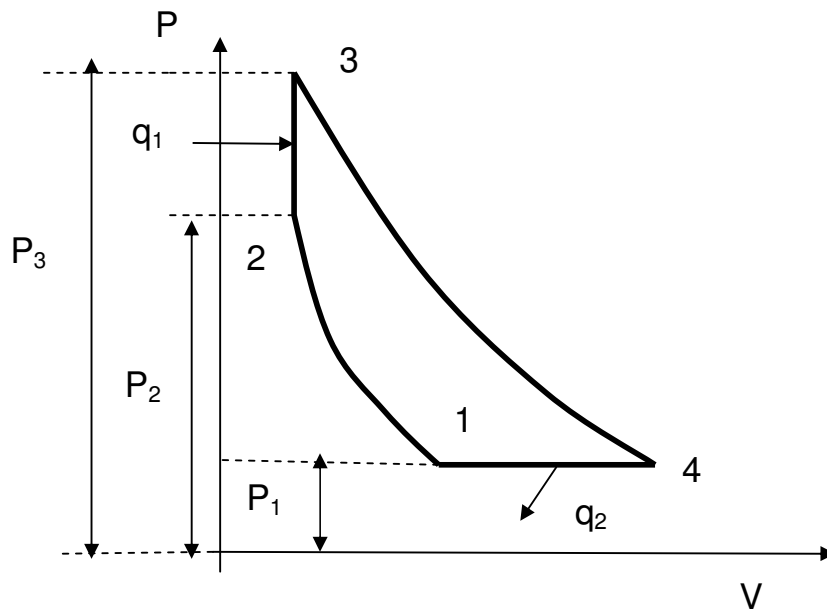


Рисунок 8 – PV-диаграмма цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме

Процессы, протекающие в идеальном **компрессоре**, также являются циклическими. Работа, расходуемая на сжатие 1 кг газа в одноступенчатом компрессоре, Дж/кг, определяется в зависимости от характера процесса сжатия по формулам:

**при изотермном сжатии -**

$$l_0 = p_1 v_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = R T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad (115)$$

**при политропном сжатии -**

$$l_0 = \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]; \quad (116)$$

**при адиабатном сжатии -**

$$l_0 = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} P_2 v_2 \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (117)$$

или

$$l_0 = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (118)$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 м<sup>3</sup> газа начального состояния в одноступенчатом компрессоре, Дж/м<sup>3</sup>, в случае политропного сжатия определяется по формуле

$$L_0 = \frac{n}{n-1} P_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (119)$$

Мощность, расходуемая на сжатие газа в компрессоре, кВт

$$N = \frac{L_0 V}{3600 \cdot 1000} = \frac{l_0 G}{3600 \cdot 1000}, \quad (120)$$

где  $V$  – объемная производительность компрессора, м<sup>3</sup>/ч;

$G$  – массовая производительность компрессора, кг/ч.

Теоретическая производительность компрессора, м<sup>3</sup>/мин,

$$V_T = F S n_0, \quad (121)$$

где  $F$  - площадь поршня, м<sup>2</sup>;

$S$  - ход поршня, м;

$n_0$  - число оборотов вала компрессора в минуту.

Объемный коэффициент полезного действия, учитывающий влияние относительного объема вредного пространства на производительность компрессора,

$$\lambda_v = 1 - a_0 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (122)$$

где  $a_0$  — относительный объем вредного пространства (отношение объема вредного пространства  $V_0$  к объему, описываемому поршнем,  $V_{оп}$ );

$n$  — показатель политропы расширения газа вредного пространства.

Для получения газа высокого давления применяются **многоступенчатые компрессоры**. В этом случае допустимая степень повышения давления газа в одной ступени

$$\lambda = \sqrt[z]{\frac{P_z}{P_1}}, \quad (123)$$

где  $z$  - необходимое число ступеней многоступенчатого компрессора;

$P_z$  - конечное давление газа за компрессором;

$P_1$  - начальное давление газа перед компрессором.

Конечные давления по ступеням (давления нагнетания) определяются следующим образом:

$$P^I = \lambda P_1 ;$$

$$P^{\text{II}} = \lambda P^{\text{I}} = \lambda^2 P_1 ;$$

$$P^z = \lambda P^{z-1} = \lambda^z P_1 . \quad (133)$$

Полная работа многоступенчатого компрессора равна сумме работ, затраченных во всех ступенях компрессора.

При промежуточном охлаждении газа после каждой ступени до начальной температуры всасываемого газа (для 3-ступенчатого компрессора -  $T_1=T_2=T_5$ ) при равенстве допустимой степени повышения давления  $\lambda$  и показателя политропы сжатия  $n$  по ступеням ( $T_2=T_4=T_6$ ) в каждой ступени будет расходоваться на сжатие газа одинаковая работа и работа многоступенчатого компрессора будет равна работе одной ступени, умноженной на число ступеней:

$$l_0 = z \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (125)$$

Количество тепла, отводимого водой рубашки от 1 кг газа при его политропном сжатии в цилиндре компрессора,

$$q = C_n (t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1). \quad (126)$$

Количество тепла, отводимого от 1 кг сжатого газа при его охлаждении при  $P=\text{const}$  в холодильнике (промежуточном или конечном),

$$q = C_p (t_2 - t_1). \quad (127)$$

### Примеры решения задач

52 1 кг воздуха совершает цикл Карно (см. рис. 2) в пределах температур  $t_1 = 627^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , причем наивысшее давление составляет 60 бар, а наинизшее — 1 бар.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенного и отведенного тепла.

Решение:

**Точка 1:**  $P_1 = 60$  бар;  $T_1 = 900$  К. Удельный объем газа определяем из характеристического уравнения (16):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 900}{60 \cdot 10^5} = 0,043 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 2:**  $T_2 = 900$  К. Давление находим из уравнения адиабаты (процесс 2-3):

$$\frac{P_2}{P_3} = \left( \frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{900}{300} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 46,8 ; \quad P_2 = 46,8 \text{ бар} ; \quad P_3 = 46,8 \cdot 1 = 46,8 \text{ бар} .$$

Удельный объем находим из уравнения изотермы (процесс 1-2):

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 ; \quad v_2 = \frac{P_1 v_1}{P_2} = \frac{60 \cdot 0,043}{46,8} = 0,055 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 3:**  $P_3 = 1$  бар;  $T_3 = 300$  К;

$$v_3 = \frac{R T_3}{P_3} = \frac{287 \cdot 300}{1 \cdot 10^5} = 0,861 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 4:**  $T_4 = 300$  К. Давление воздуха находим из уравнения адиабаты (процесс 4 - 1), удельный объем – из уравнения изотермы (процесс 3 - 4):

$$\frac{P_1}{P_4} = \left( \frac{T_1}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 46,8 ; \quad P_4 = \frac{P_1}{46,8} = 1,284 \text{ бар} ; \quad v_4 = \frac{P_3 v_3}{P_4} = \frac{1 \cdot 0,861}{1,284} = 0,671 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0,667 .$$

Подведенное количество тепла

$$q_1 = R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 287 \cdot 900 \cdot \ln \frac{0,055}{0,043} = 63,6 \text{ кДж/кг} .$$

Отведенное количество тепла

$$q_2 = R T_2 \ln \frac{v_3}{v_4} = 287 \cdot 300 \cdot \ln \frac{0,861}{0,671} = 21,5 \text{ кДж/кг} .$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг} .$$

Для проверки можно воспользоваться формулой (102):

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{42,1}{63,6} = 0,662.$$

53 Для идеального цикла поршневого ДВС с подводом тепла при  $V = \text{const}$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенного и отведенного тепла, если:  $P_1=1$  бар;  $t_1=20^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon = 3,6$ ;  $\lambda = 3,33$ ;  $k = 1,4$ . Рабочее тело - воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Решение:

Расчет ведем для 1 кг воздуха.

**Точка 1:**  $P_1=1$ бар;  $t_1=20^\circ\text{C}$ . Удельный объем определяем из уравнения состояния (15):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

**Точка 2:** Удельный объем находим исходя из степени сжатия:

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{0,84}{3,6} = 0,233 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Температура в конце адиабатного сжатия определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 3,6^{0,4} = 489 \text{ К}; \quad t_2 = 216^\circ \text{ С.}$$

Давление в конце адиабатного сжатия определяем по характеристическому уравнению (15):

$$P_2 = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 489}{0,233 \cdot 10^5} = 6,02 \text{ бар.}$$

**Точка 3:** Удельный объем  $v_3=v_2=0,233 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 2-3) получаем:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda = 3,33.$$

Следовательно,

$$P_3 = P_2 \lambda = 6,02 \cdot 3,33 = 20 \text{ бар}; \quad T_3 = T_2 \lambda = 489 \cdot 3,33 = 1628 \text{ К}; \quad t_3 = 1355^\circ \text{ С.}$$

**Точка 4:** Удельный объем  $v_4=v_1=0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Температура в конце адиабатного расширения – уравнение (78):

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = 1628 \cdot \left( \frac{0,233}{0,84} \right)^{0,4} = 976 \text{ К.}$$

Давление в конце адиабатного расширения определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4-1):

$$P_4 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 1 \cdot \frac{976}{293} = 3,33 \text{ бар.}$$

Определяем количество подведенного и отведенного тепла:

$$q_1 = C_v (T_3 - T_2) = \frac{287}{1,4 - 1} (1628 - 489) = 825 \text{ кДж / кг};$$

$$q_2 = C_v (T_4 - T_1) = \frac{287}{1,4 - 1} (976 - 293) = 495 \text{ кДж / кг};$$

Термический КПД цикла определяем по формуле (102):

$$\eta_t = \frac{825 - 495}{825} = 0,4$$

или по формуле (106)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{3,6^{0,4}} = 0,4.$$

Работа цикла

$$l_o = q_1 - q_2 = 330 \text{ кДж/кг.}$$

54 В идеальном одноступенчатом компрессоре массовой производительностью  $G=180$  кг/ч сжимается воздух до давления 4,9 бар. Определить теоретически необходимую мощность электродвигателя компрессора, отведенное в рубашку цилиндра компрессора тепло и расход охлаждающей воды, если сжатие происходит политропно ( $n=1,3$ ), а охлаждающая вода нагревается на  $25^\circ\text{C}$ . Начальное давление воздуха  $P_1=0,98$  бар и температура  $t_1=0^\circ\text{C}$ .

Решение:

Работа, расходуемая на сжатие 1 кг газа в одноступенчатом компрессоре при политермическом режиме, определяется по формуле (116):

$$l_o = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{1,3}{0,3} \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot 273 \cdot (5^{0,231} - 1) = 153 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность, расходуемая на сжатие газа в компрессоре, определяем по формуле (120)

$$N = \frac{l_o \cdot G}{3600 \cdot 1000} = \frac{153000 \cdot 180}{3600000} = 7,63 \text{ кВт.}$$

Удельное количество отведенной теплоты определяем по формуле (85)

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 0,17 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1} (396 - 273) = -29,1 \text{ кДж/кг.}$$



Температуру в конце политропного сжатия определяем из соотношения (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 273 \cdot 5^{0,231} = 396 \text{ К} .$$

Определяем полное количество отведенной теплоты:

$$Q = q G = - \frac{29,1 \cdot 180}{3600} = - 1,46 \text{ кДж / с} .$$

Расход охлаждающей воды составляет:

$$G_{\text{воды}} = \frac{Q}{C \cdot \Delta t} = \frac{1,46}{4,18 \cdot 25} = 139 \cdot 10^{-4} \text{ кг / с} .$$

55 Определить расход воды на охлаждение воздуха в рубашке двухступенчатого компрессора производительностью 10 м<sup>3</sup>/мин в промежуточном и конечном холодильниках, если в холодильниках воздух охлаждается до начальной температуры, а вода нагревается на 15°С. Воздух перед компрессором имеет давление P<sub>1</sub>=0,98 бар и температуру t<sub>1</sub>=10°С, сжатие воздуха в компрессоре происходит политропно (n=1,3) до конечного давления P<sub>2</sub>=8,8 бар.

Решение:

Количество тепла, отводимого в рубашке компрессора :

от 1 кг воздуха -

$$q = C (t_2 - t_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) ;$$

от G кг воздуха -

$$Q = q G .$$

Количество тепла, отводимого в промежуточном и конечном холодильниках: от 1 кг воздуха -

$$q_{\text{хол}} = C_p (t_2 - t_1) ;$$

от  $G$  кг воздуха -

$$Q_{\text{хол}} = q_{\text{хол}} G.$$

Массовую производительность компрессора определяем из характеристического уравнения (15):

$$G = \frac{P V}{R T} = \frac{1 \cdot 10^4 \cdot 10}{\frac{287}{1,4-1} \cdot 283} = 12,05 \text{ кг/мин}.$$

Промежуточное давление – уравнения (123) и (124):

$$P_2' = \lambda P_1 = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} P_1 = 2,94 \text{ бар}.$$

Температура в конце сжатия – уравнение (83):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n-z}} = 283 \cdot \left( \frac{9}{1} \right)^{\frac{1,3-1,4}{1,3-2}} = 283 \cdot 9^{0,115} = 365 \text{ К}.$$

Количество тепла, отводимого в рубашке компрессора,

$$Q = 12,05 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1,0} (92-15) = -220 \text{ кДж/мин}.$$

Количество тепла, отводимого в промежуточном и конечном холодильниках,

$$Q_{\text{хол}} = 12,05 \cdot \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot (92-15) = 932 \text{ кДж/мин}.$$

Расход охлаждающей воды

$$G_{\text{воды}} = \frac{2(Q + Q_{\text{хол}})}{C \Delta t} = \frac{2 \cdot (220 + 932)}{4,19 \cdot 15} = 36,7 \text{ кг/мин}.$$

## Задачи

181 Определить термический КПД цикла Карно (см. рис. 2), давление, объем и температуру во всех точках, работу цикла, количе-

ство подведенного и отведенного, тепла, если известно, что рабочим телом является 1 кг сухого воздуха,  $P_1=1$  ат,  $v_1=1,3$  м<sup>3</sup>/кг,  $T_3=T_4=890$  К,  $P_2=4$  ат,  $k=1,4$ .

Ответ:  $\eta_t=0,5$ ;  $T_1=T_2=445$  К;  $v_2=0,325$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_3=44,5$  бар;  
 $v_3=0,0575$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_4=11,1$  бар;  $v_4=0,23$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $q_1=354$  кДж/кг;  $q_2=177$  кДж/кг;  $l_{ц}=177$  кДж/кг.

182 Определить параметры всех точек цикла Карно (см. рис. 2), работу  $l_{ц}$  и термический КПД цикла, если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха, подведенное тепло  $q_1=712$  кДж/кг,  $P_1=0,98$  бар,  $t_1=33$  °С,  $t_3=800$  °С, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

Ответ:  $P_1=0,98$  бар;  $T_1=306$  К;  $v_1=0,896$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_2=1,96$  бар;  
 $T_2=306$  К;  $v_2=0,448$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_3=159$  бар;  $T_3=1073$  К;  
 $v_3=0,0194$  м<sup>3</sup>/кг;  $P_4=15$  бар;  $T_4=1073$  К;  
 $v_4=0,0194$  м<sup>3</sup>/кг;  $l_{ц}=510$  кДж/кг;  $\eta_t=0,715$ .

183 Определить параметры точек цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме (см. рис. 4), если известно, что  $P_1=0,78$  бар,  $t_1=87$  °С, степень сжатия  $\varepsilon=7,0$  и степень повышения давления  $\lambda=3,2$ , рабочим телом является 1 кг сухого воздуха, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

Ответ:  $v_1=1,32$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_1=360$  К;  $P_2=11,9$  бар;  $v_2=0,189$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_2=780$  К;  $P_3=37,8$  бар;  $v_3=0,189$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_3=2496$  К;  
 $P_4=2,5$  бар;  $v_4=1,32$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_4=1155$  К.

184 Определить количество подведенного и отведенного тепла, работу сжатия, работу расширения, полезную работу и КПД цикла предыдущей задачи. Сравнить КПД данного цикла с КПД цикла Карно, протекающего в том же интервале температур. Определить также мощность, если расход воздуха 10 кг/ч. Теплоемкость принять постоянной.

Ответ:  $q_1=1230$  кДж/кг;  $q_2=570$  кДж/кг;  
работа сжатия  $l=301$  кДж/кг;  
работа расширения  $l=962$  кДж/кг;  
 $l_{ц}=282000$  кДж/кг;  $N=110$  кВт;  $\eta_t=0,538$ ;  
для цикла Карно  $\eta_t=0,856$ ;  $\Delta =37\%$ .

185 Определить параметры точек цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении (см. рис. 5), если  $P_1=0,676$  бар,  $t_1=45^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon =13$ , степень предварительного расширения  $\rho =2,2$ ; рабочее тело - сухой воздух, показатель адиабаты принять постоянным  $k=1,4$ .

Ответ:  $T_1=318$  К;  $P_1=0,88$  бар;  $v_1=1,035$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_2=886$  К;  $P_2=32$  бар;  $v_2=0,0796$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_3=1945$  К;  $P_3=32$  бар;  $v_3=0,175$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $T_4=955$  К;  $P_4=2,66$  бар;  $v_4=1,03$  м<sup>3</sup>/кг.

186 Определить для цикла задачи 185 количество подведенного  $q_1$  и отведенного  $q_2$  тепла, работу сжатия, работу расширения, КПД цикла и мощность при расходе воздуха 1 кг/с. Теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными.

Ответ:  $q_1=1065$  кДж/кг;  $q_2 =456$  кДж/кг;  
работа сжатия  $l=407$  кДж/кг;  
работа расширения  $l=1010$  кДж/кг;  
 $\eta_t =0,57$ ;  $N=606$  кВт.

187 Определить параметры точек смешанного термического цикла ДВС (см. рис. 6), если  $P_1=0,83$  бар,  $t_1= 57^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon=15$ ; степень повышения давления  $\lambda= 1,6$ ; степень предварительного расширения  $\rho = 1,4$ ; показатель адиабаты  $k= 1,4$ ; рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

Ответ:  $T_1=330$  К;  $P_1=0,834$  бар;  $v_1=1,14$  м<sup>3</sup>/кг;

$$T_2=974 \text{ К}; P_2=36,9 \text{ бар}; v_2=0,076 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_3=1557 \text{ К}; P_3=59 \text{ бар}; v_3=0,076 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_4=2180 \text{ К}; P_4=59 \text{ бар}; v_4=0,1064 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_5=845 \text{ К}; P_5=2,13 \text{ бар}; v_5=1,14 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

188 Определить для цикла, данного в задаче 187, количество подведенного и отведенного тепла, среднее КПД цикла и мощность при расходе воздуха 30 кг/мин.

$$\text{Ответ: } q_1=1040 \text{ кДж/кг}; q_2=369 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t=65\%; N=366 \text{ кВт}.$$

189 Определить параметры точек, количество подведенного и отведенного тепла, КПД, работу цикла и мощность при расходе воздуха 5 кг/с термического цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении (см. рис. 7), если  $P_1=0,93 \text{ бар}$ ,  $t_1=27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\frac{v_3}{v_2}=1,5$ ,  $\frac{P_2}{P_1}=4$ , рабочее тело - сухой воздух, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными.

$$\text{Ответ: } v_1=0,923 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1=0,93 \text{ бар}; T_1=300 \text{ К};$$

$$v_2=0,342 \text{ м}^3/\text{кг}; P_2=3,73 \text{ бар}; T_2=444 \text{ К};$$

$$v_3=0,513 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=3,73 \text{ бар}; T_3=666 \text{ К};$$

$$v_4=1,385 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4=0,95 \text{ бар}; T_4=450 \text{ К};$$

$$q_1=223 \text{ кДж/кг}; q_2=151 \text{ кДж/кг};$$

$$l_u=72 \text{ кДж/кг}; N=360 \text{ кВт}.$$

190 Для цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме (см. рис. 8) определить параметры точек, количество подведенного тепла, КПД и мощность при расходе воздуха 3 кг/с, если  $P_1=0,98 \text{ бар}$ ,  $t_1=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\frac{P_2}{P_1}=3$ ,  $\lambda=\frac{P_3}{P_2}=1,7$ , рабочее тело - сухой воздух, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } P_1=0,98 \text{ бар}; T_1=293 \text{ К}; v_1=0,857 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_2=2,94 \text{ бар}; T_2=401 \text{ К}; v_2=0,392 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_3=2,94 \text{ бар}; T_3=682 \text{ К}; v_3=0,392 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_4=0,98 \text{ бар}; T_4=426 \text{ К}; v_4=1,2 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$q_1=201 \text{ кДж/кг}; \eta_t=0,333; N=200 \text{ кВт}.$$

191 Определить параметры точек, КПД и работу термического цикла ДВС (рис. 4), если известно, что  $P_1=0,98$  бар,  $t_1=30^\circ\text{C}$ ;

$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = 6,0$  и количество подведенного тепла  $q_1=1256$  кДж/кг, рабочим

телом является 1 кг сухого воздуха, теплоемкость  $C_v$  принять постоянной, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } P_1=0,98 \text{ бар}; T_1=303 \text{ К}; v_1=0,886 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_2=12,05 \text{ бар}; T_2=620 \text{ К}; v_2=0,148 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_3=46,1 \text{ бар}; T_3=2375 \text{ К}; v_3=0,148 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_4=3,76 \text{ бар}; T_4=1160 \text{ К}; v_4=0,886 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\eta_t=0,514; l_{ц}=646 \text{ кДж/кг}.$$

192 Определить параметры точек, КПД и количество подведенного тепла термического цикла ДВС (см. рис. 5), если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха,  $P_1=0,93$  бар,  $q_2=629$  кДж/кг, теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  принять постоянными, показатель адиабаты  $k=1,4$ .

$$\text{Ответ: } v_1=0,904 \text{ м}^3/\text{кг}; P_1=0,93 \text{ бар}; T_1=293 \text{ К};$$

$$v_2=0,0753 \text{ м}^3/\text{кг}; P_2=30,8 \text{ бар}; T_2=792 \text{ К};$$

$$v_3=0,202 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=30,8 \text{ бар}; T_3=2130 \text{ К};$$

$$v_4=0,904 \text{ м}^3/\text{кг}; P_4=3,72 \text{ бар}; T_4=1171 \text{ К};$$

$$\eta_t=0,535; q_1=1350 \text{ кДж/кг}.$$

193 Определить параметры точек, количество подведенного тепла и КПД смешанного цикла ДВС (см. рис. 6), если  $P_1=0,98$  бар,

$t_1=47^\circ\text{C}$ ,  $P_2=39,2$  бар,  $\rho = \frac{v_4}{v_3} = 1,5$  и количество отведенного тепла

$q_2=5870$  кДж/кг; рабочим теплом является 1 кг сухого воздуха, тепло-

емкость  $c_v = 0,71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  и  $c_p = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Ответ:  $P_1=0,98$  бар;  $T_1=320$  К;  $v_1=0,395$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_2=39,2$  бар;  $T_2=920$  К;  $v_2=0,0665$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_3=79,6$  бар;  $T_3=1855$  К;  $v_3=0,0665$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_4=79,6$  бар;  $T_4=2783$  К;  $v_4=0,1$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $P_5=3,49$  бар;  $T_5=1140$  К;  $v_2=0,935$  м<sup>3</sup>/кг;  
 $q_1=1600$  кДж/кг;  $\eta_t=0,633$ .

194 В идеальном одноступенчатом компрессоре сжимается воздух до давления  $P_2=2,74$  бар. Начальная температура воздуха  $t_1=17$  °С, давление  $P_1=0,98$  бар. Определить работу, затраченную на сжатие 1 кг воздуха, и конечную температуру, если сжатие происходило: а) изотермно; б) политропно при  $n=1,25$ ; в) адиабатно при  $k=1,41$ .

Ответ: а)  $T_1=T_2=290$  К;  $l=85,7$  кДж/кг;  
б)  $T_2=356$  К;  $l=96$  кДж/кг;  
в)  $T_2=392$  К;  $l=100$  кДж/кг.

195 В идеальном компрессоре производительностью 20 м<sup>3</sup>/мин адиабатно сжимается воздух до давления 5,9 бар. Начальное давление воздуха  $P_1=0,98$  бар и температура  $t_1=20$  °С. Определить, как изменится теоретическая мощность, затрачиваемая на сжатие, если конечное давление воздуха в компрессоре понизится до  $P_3=2,9$  бар.

Ответ: мощность уменьшается на 44 %.

196 Идеальный поршневой компрессор производительностью 150 м<sup>3</sup>/ч сжимает воздух от давления  $P_1=0,98$  бар до  $P_2=3,92$  бар. Как изменится теоретическая мощность компрессора, если его использовать для сжатия азота (N<sub>2</sub>), сохранив прежнюю объемную производительность? Какой должна быть теоретическая мощность при сжатии в

том же компрессоре 150 кг/ч азота и воздуха? Во всех случаях пределы изменения давления остаются одинаковыми, процесс сжатия изотермный, начальная температура 20° С.

Ответ:  $N=5,68$  кВт. При сжатии азота и сохранении той же объемной производительности необходимо затрачивать прежнюю мощность. Для сжатия 150 кг/ч азота надо затрачивать мощность  $N=5,03$  кВт, для сжатия 150 кг/ч воздуха -  $N=4,87$  кВт.

197 Одноступенчатый поршневой компрессор имеет диаметр цилиндра  $D=300$  мм, ход поршня  $S=450$  мм, относительный объем мертвого пространства  $a_0=3\%$  и число оборотов  $n_0=980$  об/мин. Давление воздуха в конце сжатия в 3,2 раза превышает начальное давление. Определить теоретическую производительность компрессора для случаев а) адиабатного, б) политропного ( $n=1,18$ ) и в) изотермного расширения остающегося в мертвом пространстве воздуха.

Ответ:  $V = 31,2$  м<sup>3</sup>/мин; а)  $v' = 30$  м<sup>3</sup>/мин;  
б)  $v'' = 29,6$  м<sup>3</sup>/мин; в)  $v''' = 29,15$  м<sup>3</sup>/мин.

198 Воздух сжимается в компрессоре, техническая характеристика которого дана в задаче 197. Как изменится теоретическая производительность компрессора, если давление воздуха в конце сжатия будет превышать начальное давление: а) в 10 раз, б) в 20 раз? Расширение остающегося в мертвом пространстве воздуха считать политропным,  $n=1,18$ .

Ответ:  $V = 31,2$  м<sup>3</sup>/мин; а)  $v' = 25,5$  м<sup>3</sup>/мин;  
б)  $v'' = 20,4$  м<sup>3</sup>/мин.

199 В одноступенчатом поршневом компрессоре сжимается воздух, начальное давление которого 745 мм рт. ст. и температура



10°C. Определить величину максимально допустимого повышения давления воздуха в цилиндре компрессора при: а) адиабатном,  $k=1,41$  и б) политропном,  $n=1,25$  (при охлаждении цилиндра) сжатии, если оно ограничивается температурой вспышки компрессорного масла  $t=165^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $T_2=438\text{ K}$ ; а)  $P_2/P_1=5,8$ ;  $P_2=5,76\text{ бар}$ ;

б)  $P_2/P_1=12,9$ ;  $P_2=12,8\text{ бар}$ .

200 Определить, сколько ступеней должен иметь идеальный компрессор при адиабатном сжатии в нем воздуха от начального давления  $P_1=0,98\text{ бар}$  до конечного давления  $P_2=49\text{ бар}$ , если в каждой ступени повышение давления не должно быть больше, чем в 3,8 раза. Определить также промежуточные давления.

Ответ:  $z = 2,92$ . При  $z = 3$   $\lambda = 3,68$ ;

$P' = 3,6\text{ бар}$ ;  $P'' = 13,29\text{ бар}$ .

201 В идеальном компрессоре воздух сжимается от начального давления  $P_1=0,98\text{ бар}$  при  $t_1=0^\circ\text{C}$  до конечного давления  $P_2=24,5\text{ бар}$ . Определить, какую температуру будет иметь воздух в конце: а) одноступенчатого, б) двухступенчатого, в) трехступенчатого сжатия, если сжатие происходит политропно,  $n=1,25$ , с промежуточным охлаждением до начальной температуры.

Ответ: а)  $T_2 = 519\text{ K}$ ;  $t_2 = 236^\circ\text{C}$ ; б)  $T_2 = 377\text{ K}$  ;

$t_2 = 104^\circ\text{C}$ ; в)  $T_2 = 338\text{ K}$  или  $t_2 = 65^\circ\text{C}$ .

## 1.9 Истечение газов и паров. Дросселирование

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход. В этих случаях необходимо прежде всего найти отношение

$$\beta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $P_2$  – давление среды на выходе из сопла;

$P_1$  - давление среды на входе в сопло.

Полученное числовое значение сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым из равенства

$$\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_1} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (128)$$

и равным: для одноатомных газов - 0,487; двухатомных - 0,528; для трех- и многоатомных газов – 0,546.

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta > \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость истечения газа, м/с, определяется по формуле

$$\omega = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (129)$$

Теоретическая скорость истечения газа (м/с) может быть также определена по формуле

$$\omega = 1,41 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (130)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях, Дж/кг.

Если значения энтальпии выражены в килоджоулях на килограмм, то формула принимает следующий вид:

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2}. \quad (131)$$

Действительная скорость истечения всегда меньше теоретической, так как процесс истечения связан с наличием трения:

$$\omega = 1,41 \psi \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (132)$$

где  $\psi$  - скоростной коэффициент сопла.

Расход газа, кг/с, определяется по формуле

$$G = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (133)$$

где  $F$  – площадь выходного сечения сопла, м<sup>2</sup>.

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta \leq \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость истечения газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определяется по формуле

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1}. \quad (134)$$

Критическая скорость может быть также определена по уравнению

$$\omega_{кр} = 1,41 \cdot \sqrt{h_1 - h_{кр}}, \quad (135)$$

Расход газа, кг/с, в этом случае будет максимальным и определяется по формуле

$$G_{max} = F \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}}. \quad (136)$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяют сопло Лаваля. В минимальном сечении сопла Лаваля скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами  $P_{кр}$  и  $v_{кр}$ . Площадь минимального сопла,  $m^2$ , определяется по формуле

$$F_{min} = \frac{G_{max} \cdot v_{кр}}{\omega_{кр}}. \quad (137)$$

Площадь выходного сечения сопла,  $m^2$ ,

$$F = f_{min} \frac{\omega_{кр} \cdot v_2}{\omega \cdot v_{кр}} = \frac{G \cdot v_2}{\omega}, \quad (138)$$

где  $v_2$  – удельный объем газа при давлении среды  $P_2$ ,

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (139)$$

Длина расширяющейся части сопла определяется по уравнению

$$l = \frac{d - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (140)$$

где  $d$  и  $d_{min}$  – соответственно диаметры выходного и минимального сечений;

$\alpha$  - угол конусности расширяющейся части сопла.

При прохождении газа или пара через суженное сечение происходит снижение его давления. Этот процесс называют **дресселированием** или **мятием**. В процессе дресселирования газа или пара наряду со снижением давления всегда возрастает удельный объем. Температура идеальных газов при дресселировании остается неизменной, температура же реальных газов остается постоянной лишь при определенной начальной температуре газа, называемой **темпе-**

**ратурой инверсии**; приближенное значение этой температуры определяется из выражения

$$T_{\text{инв}} \approx T_{\text{кр}}, \quad (141)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура газа или пара, К.

Если же температура подвергающегося дросселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа меньше температуры инверсии, и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

С достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова, т.е.

$$h_1 = h_2. \quad (142)$$

Задачи, связанные с дросселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дросселирования. Проще всего они решаются при помощи  $h$ - $s$ -диаграммы: конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку, с изобарой конечного давления.

### **Примеры решения задач**

56 Воздух из резервуара с постоянным давлением 100 бар и температурой 15°C вытекает в атмосферу через трубку с внутренним диаметром 10 мм. Определить скорость истечения воздуха и его секундный расход. Наружное давление равно 1 бар. Процесс расширения воздуха считать адиабатным.

Решение:

Определяем величину  $\beta$  и сравниваем ее с критическим значением для воздуха:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{100} < \beta_{кр} = 0,528.$$

Скорость истечения будет критической и определяется по формуле (134):

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с}.$$

Секундный расход определяем по формуле (136), предварительно рассчитав площадь сечения сопла и начальный удельный объем воздуха:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2 ;$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288}{100 \cdot 10^5} = 0,00827 \text{ м}^3 / \text{кг} ;$$

$$G_{max} = 0,0000785 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \left( \frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}} \cdot \frac{100 \cdot 10^5}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с}.$$

57 В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживают давление  $P_1 = 50$  бар. Газ вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 40 бар. Начальная температура кислорода  $100^\circ\text{C}$ . Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла  $F = 20 \text{ мм}^2$ . Найти также теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если истечение будет происходить в атмосферу. В обоих случаях считать истечение адиабатным. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Решение:

Отношение давлений составляет:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{40}{50} = 0,8 > \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{кр} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения меньше критической и определяется по формуле (129). Из характеристического уравнения (15) определяем начальный удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{259,8 \cdot 373}{50 \cdot 10^5} = 0,0194 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Все остальные величины, входящие в формулу (129), известны. Подставляя их значения, получаем

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0,0194 \left[ 1 - \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 205 \text{ м/с} .$$

Секундный расход найдем по формуле (133):

$$G = 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot \frac{50 \cdot 10^5}{0,0194} \left[ \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,175 \text{ кг/с} .$$

При истечении в атмосферу отношение давлений

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{50} < \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{кр} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход будет максимальным. По формуле (134) с учетом показателя адиабаты для воздуха, равной 1,4, получаем:

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{\frac{287}{1,4-1} \cdot 373} = 336 \text{ м/с} .$$

Максимальный расход определяем по формуле (136) с учетом  $k=1$ :

$$G_{\max} = 0,686 f \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} = 0,686 \cdot 0,00002 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^5}{0,0194}} = 0,22 \text{ кг/с} .$$

58 Воздух при давлении 10 бар и температуре 300°С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением  $P_2 = 1$  бар. Расход воздуха 4 кг/с. Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным 10°. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

Решение:

Площадь минимального сечения сопла определяем по формуле (137). Удельный объем воздуха в минимальном сечении  $v_{кр}$  находим из соотношения параметров адиабатного процесса :

$$\frac{v_{кр}}{v_1} = \left( \frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} .$$

Значение  $v_1$  определяем из начальных условий:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 573}{10 \cdot 10^5} = 0,164 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Критическое отношение давлений для воздуха

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 0,528 .$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла,

$$P_{кр} = 0,528 P_1 = 0,528 \cdot 10 = 5,28 \text{ бар} ;$$

$$v_{кр} = v_1 \left( \frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot \left( \frac{10}{5,28} \right)^{1,4} = 0,259 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$



Теоретическая скорость воздуха  $\omega_{кр}$  в минимальном сечении по формуле, полученной в примере 57,

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 573} = 432 \text{ м/с}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла должна быть:

$$F_{min} = \frac{4 \cdot 0,259}{432} \cdot 10^6 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{f_{min}}{\pi/4}} = \sqrt{\frac{2400}{0,785}} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла по формуле (138)

$$F = \frac{G v_2}{\omega}.$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении

$$v_2 = v_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,85 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла по уравнению (129)

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 0,164 \left[ 1 - \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 744 \text{ м/с}$$

и, следовательно, площадь выходного сечения сопла

$$F = \frac{4 \cdot 0,85}{744} \cdot 10^6 = 4680 \text{ мм}^2,$$

а диаметр выходного сечения сопла

$$d = \sqrt{\frac{F}{0,785}} = \sqrt{\frac{4680}{0,785}} = 77,0 \text{ мм}.$$

Длина расширяющейся части определяется по формуле (140):

$$l = \frac{77,0 - 55,4}{2 \cdot 0,0875} = 123 \text{ мм} .$$

59. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление  $P_1 = 14$  бар, температура  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , а противодействие равно 0,06 бар? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Решение:

Из  $h$ -диаграммы (приложение К)

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 896 \text{ кДж/кг} ,$$

а по уравнению (131)

$$\omega = 44,76 \sqrt{896} = 1340 \text{ м/с} .$$

60 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление пара в котле 12 бар, температура  $300^\circ\text{C}$ . Процесс расширения пара считать адиабатным. Барометрическое давление принять равным 750 мм рт. ст.

Решение:

Отношение давлений равно 0,0834, т.е. оно меньше критического отношения давлений для перегретого пара, составляющего 0,546. Следовательно, если истечение происходит не через сопло Лавалья, то скорость истечения будет равна критической скорости. Для перегретого пара эта скорость определяется по уравнению (139). Для нахождения  $h_{кр}$  определяем  $P_{кр}$ :

$$P_{кр} = P_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 12 \cdot 0,546 = 6,6 \text{ бар} .$$

Проведя на  $h_s$ -диаграмме (приложение Г) адиабату от точки, характеризуемой  $P_1 = 12$  бар и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , до изобары  $P_2 = 6,6$  бар, получаем:

$$h_1 - h_{кр} = 148 \text{ кДж/кг}$$

и, таким образом,

$$\omega_{кр} = 44,76 \sqrt{148} = 546 \text{ м/с}.$$

61 Решить предыдущую задачу при условии, что истечение пара происходит через сопло Лаваля.

Решение:

В этом случае скорость истечения больше критической. Она определится из уравнения

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2},$$

причем  $h_2$  будет соответствовать состоянию пара в конце адиабатного расширения при  $P = 1$  бар.

Пользуясь  $h_s$ -диаграммой, получаем  $h_2 - h_1 = 492$  кДж/кг и, таким образом,

$$\omega = 44,76 \sqrt{492} = 990 \text{ м/с}.$$

62 Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от 8 бар до 6 бар. Начальная температура воздуха  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Определить изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

Решение:

Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия воздуха в начальном и конечном состояниях

одинакова, т.е.  $h_1 = h_2$ , то конечную температуру воздуха можно принять равной начальной, т.е.  $t_2 = t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Приращение энтропии можно определить по формуле (92):

$$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

и, так как для рассматриваемого процесса  $T_2 = T_1$ , то

$$\Delta s = -R \ln \frac{P_2}{P_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2} = 287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{8}{6} = 82,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

63 Водяной пар при давлении 18 бар и температуре  $250^\circ\text{C}$  дросселируется до давления 10 бар. Определить температуру пара в конце дросселирования.

Решение:

Находим на диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара и проводим через найденную точку линию постоянной энтальпии. На пересечении с изобарой  $P_2 = 10$  бар находим точку, характеризующую конечное состояние пара. Температура, соответствующая этой точке, равна  $234^\circ\text{C}$ .

### Задачи

202 Воздух при постоянном давлении  $P_1 = 60$  бар и  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  вытекает в среду с давлением  $P_2 = 40$  бар.

Определить теоретическую скорость и конечную температуру при адиабатном истечении.

Ответ:  $\omega = 257$  м/с;  $t_2 = -6^\circ\text{C}$ .

203 Через сопло форсунки компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия подается воздух для распыливания нефти,

поступающей в цилиндр двигателя. Давление воздуха  $P_1 = 50$  бар, а его температура  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ . Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя 35 бар. Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха из сопла форсунки.

Ответ:  $\omega = 241$  м/с.

204 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если  $P_1 = 70$  бар,  $P_2 = 45$  бар,  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ ,  $F = 10$  мм<sup>2</sup>.

Ответ:  $\omega = 282$  м/с;  $G = 0,148$  кг/с.

205 Воздух при давлении  $P_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  вытекает из резервуара. Найти значение  $P_2$ , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, и величину этой скорости.

Ответ:  $P_{2\text{кр}} = 0,528$  бар;  $\omega_{\text{кр}} = 310$  м/с.

206 К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении 10 бар и температуре  $600^\circ\text{C}$ . Давление за соплами 1,2 бар. Расход газа, отнесенный к одному соплу,  $G = 1440$  кг/ч. Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным  $10^\circ$ . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

Ответ:  $d_{\text{min}} = 19,4$  мм;  $d = 25$  мм;  $l = 32$  мм.

207 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха через сопло Лавалья, если  $P_1 = 8$  бар и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а давление среды на выходе из сопла  $P_2 = 1$  бар. Сравнить полученную скорость с критической.

Ответ:  $\omega = 514$  м/с;  $\omega_{\text{кр}} = 313$  м/с.

208 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление в котле 1,5 бар и степень сухости 0,95. Процесс расширения пара считать адиабатным.

Ответ:  $\omega = 360$  м/с.

209 Влажный пар с параметрами  $P_1 = 18$  бар и  $x_1 = 0,92$  вытекает в среду с давлением  $P_2 = 12$  бар; площадь выходного сечения сопла  $20 \text{ мм}^2$ . Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

Ответ:  $\omega = 380$  м/с;  $G = 0,05$  кг/с.

210 Определить теоретическую скорость истечения пара из сопла Лаваля для следующих данных:  $P_1 = 16$  бар,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ ,  $P_2 = 1$  бар. Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Ответ:  $\omega = 1040$  м/с.

211 Водяной пар давлением 20 бар с температурой  $400^\circ\text{C}$  при истечении из сопла расширяется по адиабате до давления 2 бар. Определить площадь минимального и выходного сечения сопла, а также скорости истечения в этих соплах, если расход пара 4 кг/с. Процесс расширения пара в сопле принять адиабатным.

Ответ:  $F_{\min} = 16 \text{ см}^2$ ;  $F_{\max} = 36 \text{ см}^2$ ;

$\omega_{\text{кр}} = 580$  м/с;  $\omega = 1050$  м/с.

212 Парогенератор вырабатывает 1800 кг/ч пара давлением 10,8 бар. Каким должно быть сечение предохранительного клапана, чтобы при внезапном прекращении отбора пара давление не превысило 10,8 бар?

Ответ:  $F_{\min} = 321 \text{ мм}^2$ .

213 Для обдувки поверхностей нагрева паровых котлов пользуются так называемыми обдувочными аппаратами, снабженными соплами, через которые обычно пропускают пар или воздух.

Определить диаметры минимального и выходного сечения сопла для часового расхода 1000 кг сухого насыщенного пара, если начальное давление его  $P_1 = 20,6$  бар, а конечное  $P_2 = 1,0$  бар. Процесс расширения пара принять адиабатным. Определить также теоретическую скорость истечения пара из сопла.

Ответ:  $d_{\min} = 11,2$  мм;  $d = 22,4$  мм;  $\omega = 1000$  м/с.

214 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 200^\circ\text{C}$  дросселируется от давления 12 бар до давления 7 бар. Определить энтальпию воздуха после дросселирования (принимая, что энтальпия его при  $0^\circ\text{C}$  равна нулю) и изменение энтропии в рассматриваемом процессе.

Ответ:  $h=202,4$  кДж/кг;  $\Delta s=0,157$  кДж/(кг·К).

215 В стальном баллоне находятся 6,25 кг воздуха при давлении 50 бар. При выпуске из баллона воздуха он дросселируется до давления 25 бар. Определить приращение энтропии в процессе дросселирования.

Ответ:  $\Delta s = 0,199$  кДж/К.

216 Пар при давлении 1 бар и  $x_1 = 0,9$  дросселируется до давления 1 бар. Определить конечную сухость пара.

Ответ:  $x_2 = 0,96$ .

217 До какого давления необходимо дросселировать пар при  $P_1 = 60$  бар и  $x_1 = 0,96$ , чтобы он стал сухим насыщенным?

Ответ:  $P_2 = 2,6$  бар.

218 Пар при давлении 20 бар и степени сухости 0,9 дросселируется до давления 8 бар. Определить состояние пара в конце дросселирования.

Ответ:  $x_2 = 0,921$ .

219 Пар при давлении 100 бар и  $t_1 = 320^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2 = 30$  бар. Определить параметры конечного состояния и изменение температуры пара.

Ответ:  $x_2 = 0,99$ ;  $\Delta t = 85^\circ\text{C}$ .

220 Отработавший пар из паровой турбины поступает в конденсатор в количестве 125 т/ч. Состояние отработавшего пара:  $P_2 = 0,044$  бар и  $x = 0,89$ . Определить диаметр входного патрубка конденсатора, если скорость пара в нем  $\omega = 120$  м/с.

Ответ:  $d = 3,22$  м.

221 Определить площади минимального и выходного сечений сопла Лаваля, если известны начальные параметры пара:  $P_1 = 9,8$  бар,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Давление за соплом  $P_2 = 2,45$  бар. Расход пара через сопло 720 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94.

Ответ:  $F_{\min} = 165 \text{ мм}^2$ ;  $F_{\max} = 210 \text{ мм}^2$ .

222 В паровую турбину подается пар со следующими параметрами:  $P_1 = 60$  бар,  $t_1 = 400^\circ\text{C}$ . В клапанах турбины пар дросселируется до 55 бар и поступает в расширяющиеся сопла, давление за которыми  $P_2 = 10$  бар. Расход пара через одно сопло 8000 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94. Определить площади минимального и выходного сечений.

Ответ:  $F_{\min} = 355 \text{ мм}^2$ ;  $F_{\max} = 546 \text{ мм}^2$ .

223 По паропроводу течет влажный пар, параметры которого:  $P_1 = 10$  бар и  $x_1 = 0,98$ . Часть пара через дроссельный вентиль перепускается в паропровод, давление в котором  $P_2 = 1,2$  бар. Определить состояние пара в паропроводе низкого давления.

Ответ: пар перегретый,  $t_2 = 130^\circ\text{C}$ .



## 1.10 Пары. Водяной пар

В зависимости от состояния пар может быть сухим, влажным и перегретым. **Сухой пар**, находящийся в равновесии с жидкостью, - это насыщенный пар. **Влажный пар** - это механическая смесь сухого пара и кипящей жидкости. **Перегретый пар** является ненасыщенным паром. Для аналитического решения задач на пары используются таблицы водяного пара (Приложение Д) и приводимые ниже формулы.

**Сухой пар.** Основными параметрами состояния сухого пара являются:  $P$ , Па - абсолютное давление;  $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;  $t''$ , °С - температура насыщения.

Состояние сухого пара полностью характеризуется или давлением или температурой насыщения, а все остальные параметры и термодинамические величины для него могут быть найдены по паровым таблицам – приложение Д. В таблицах Д.1 и Д.2 для 1 кг сухого пара содержатся величины следующих данных:

- $P$ , МПа - абсолютное давление;
- $t_n$ , °С или  $T_n$ , К - температура насыщения;
- $v'$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем кипящей жидкости;
- $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем сухого пара;
- $\rho''$ , кг/м<sup>3</sup> - плотность сухого пара;
- $h'$ , кДж/кг - энтальпия кипящей жидкости;
- $h''$ , кДж/кг — энтальпия сухого пара;
- $r$ , кДж/кг — теплота парообразования;
- $s'$ , кДж/(кг·К) - энтропия кипящей жидкости;
- $s''$ , кДж/(кг·К) - энтропия сухого пара.

Энтальпия и энтропия сухого пара кипящей жидкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$h'' = h' + r; \quad s'' = s' + \frac{r}{T_H}. \quad (143)$$

**Влажный пар.** В 1 кг влажного пара содержится  $x$  кг сухого пара (степень сухости влажного пара) и  $(1-x)$  кг кипящей жидкости (степень влажности). Состояние влажного пара принято обычно характеризовать одной из следующих пар параметров:  $P, x; P, (1-x); t'', x; t'', (1-x)$ .

Удельный объем влажного пара

$$v_x = x v'' + (1-x) v' = v' + x (v'' - v'), \quad (144)$$

при  $x > 0,5$  и небольших давлениях с достаточной степенью точности

$$v_x = x v''. \quad (145)$$

Энтальпия влажного пара

$$h_x = h' + x (h'' - h') = h' + x r. \quad (146)$$

Внутренняя энергия влажного пара

$$u_x = h_x - P v_x. \quad (147)$$

Энтропия влажного пара

$$s_x = s' + x (s'' - s') = s' + \frac{x r}{T_H}. \quad (148)$$

**Перегретый пар.** Основными параметрами состояния перегретого пара являются:  $P, Pa$  - абсолютное давление;  $v, m^3/kg$  - удельный объем;  $t, ^\circ C$  или  $T, K$  - температура перегрева.

Состояние перегретого пара характеризуется двумя параметрами:  $P$  и  $t$  – приложение Е. В таблицах для 1 кг перегретого пара содержатся величины следующих данных:

$P, Pa$  - абсолютное давление;

$t, ^\circ C$  - температура перегретого пара;

$v, m^3/kg$  - удельный объем перегретого пара;

$h$ , кДж/кг - энтальпия перегретого пара;

$s$ , кДж/(кг·К) - энтропия перегретого пара.

Тепло, идущее на перегрев пара, при  $P=\text{const}$ , кДж/кг,

$$q_{II} = h - h'' = \bar{C}_p (t - t''), \quad (149)$$

где  $\bar{C}_p$  - средняя массовая теплоемкость перегретого пара для интервала температур насыщения и перегрева, кДж/(кг·К).

Энтальпия перегретого пара, кДж/кг,

$$h = h'' + q_{II} = h'' + \bar{C}_p (t - t''). \quad (150)$$

Внутренняя энергия перегретого пара, кДж/кг,

$$u = h - P v. \quad (151)$$

Энтропия перегретого пара, кДж/(кг·К),

$$s = s'' + \left( \frac{C_p}{T} \right)_{CP} (t - t''), \quad (152)$$

где  $\left( \frac{C_p}{T} \right)_{CP}$  - средняя величина отношения истинной теплоемкости при  $P=\text{const}$  к абсолютной температуре для интервала температур насыщения и перегрева.

### **Основные паровые процессы и их исследование по таблицам водяного пара**

Изохорный процесс ( $v=\text{const}$ ). Тепло, участвующее в процессе, идет исключительно на изменение внутренней энергии пара, так как работа процесса равна нулю:

$$q = u_2 - u_1. \quad (153)$$

Для определения конечных параметров пара по начальным используется уравнение процесса –  $v_2 = v_1$ .

Изобарный процесс ( $P=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы, уравнение может быть представлено в виде

$$q = h_2 - h_1 . \quad (154)$$

Изотермический процесс ( $T=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) \quad (155)$$

происходит за счет изменения ее потенциальной части, причем при росте объема пара внутренняя энергия увеличивается и наоборот.

Тепло, участвующее в процессе,

$$q = T (s_2 - s_1) . \quad (156)$$

Работа процесса

$$l = q - \Delta u . \quad (157)$$

Адиабатный процесс ( $dq=0$ ). Из уравнения первого закона термодинамики следует, что работа для адиабатного процесса

$$l = u_1 - u_2 . \quad (158)$$

Для нахождения конечных параметров процесса по начальным используется уравнение адиабаты –  $s_2 = s_1$ .

Процесс при постоянной степени сухости ( $x=\text{const}$ ). Возможно лишь приближенное решение процесса. Участвующее в процессе тепло

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} (s_2 - s_1) . \quad (159)$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики.

При аналитическом решении процессов с парами начальное и

конечные значения внутренней энергии, энтальпии и энтропии определяются по приведенным формулам в зависимости от вида пара в начале и конце процесса.

**Исследование паровых процессов по  $h$ - $s$ -диаграмме водяного пара** – приложение Г. Решение с помощью диаграммы более наглядно и значительно сокращает время, необходимое для расчета.

По  $h$ - $s$ -диаграмме определяют состояние для перегретого, сухого насыщенного и влажного водяного пара. По любой точке диаграммы можно найти следующие величины:

$v$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;

$t$ , °С - температура;

$P$ , Па - давление абсолютное;

$h$ , кДж/кг - энтальпия;

$s$ , кДж/(кг·К) - энтропия.

Значение внутренней энергии (кДж/кг) подсчитывается по формуле

$$u = h - P v . \quad (160)$$

Рассмотрим основные задачи, решаемые по  $h$ - $s$ -диаграмме.

**Изохорный процесс** ( $v = \text{const}$ ). На рис. 9 изображен изохорный процесс на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество тепла, участвующего в процессе, определяется по формуле (153), которая одновременно служит для нахождения изменения внутренней энергии. Работа изохорного процесса, как и для газов, равняется нулю.

**Изобарный процесс** ( $P = \text{const}$ ). На рис. 10 представлен изобарный процесс на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество участвующего в процессе тепла находится по разности энтальпий (154).

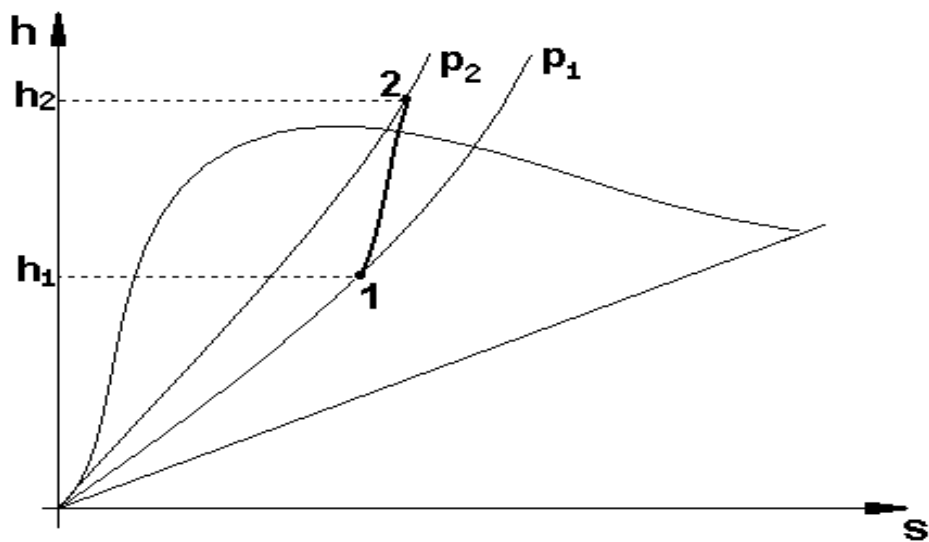


Рисунок 9 – Изображение изохорного процесса на  $h$ - $s$ -диаграмме

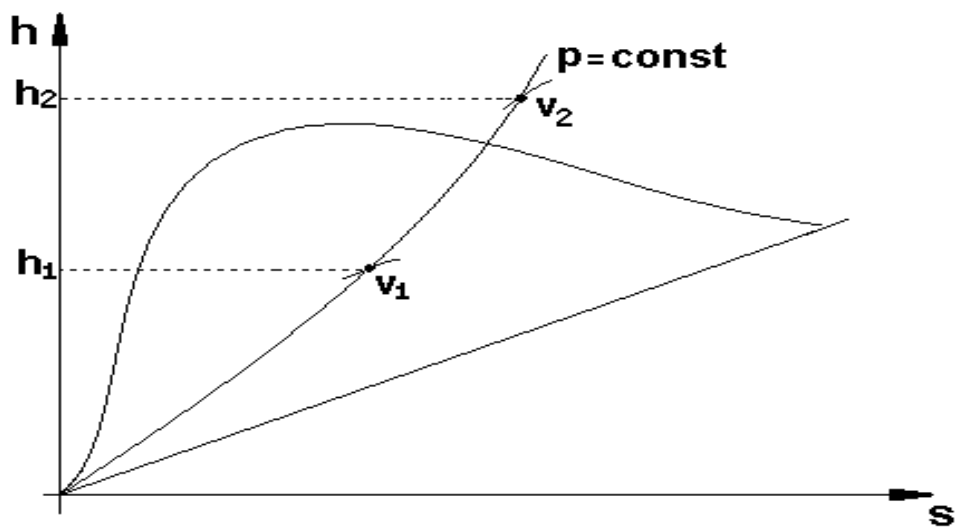


Рисунок 10 – Изображение изобарного процесса на  $h$ - $s$ -диаграмме

Изменение внутренней энергии находят по формуле (155). Работу изобарного процесса можно определить или по формуле

$$l = P(v_2 - v_1), \quad (161)$$

или по уравнению первого закона термодинамики (50).

**Изотермический процесс** ( $T=\text{const}$ ). На рис. 11 изображен изотермический процесс на  $hs$ -диаграмме.

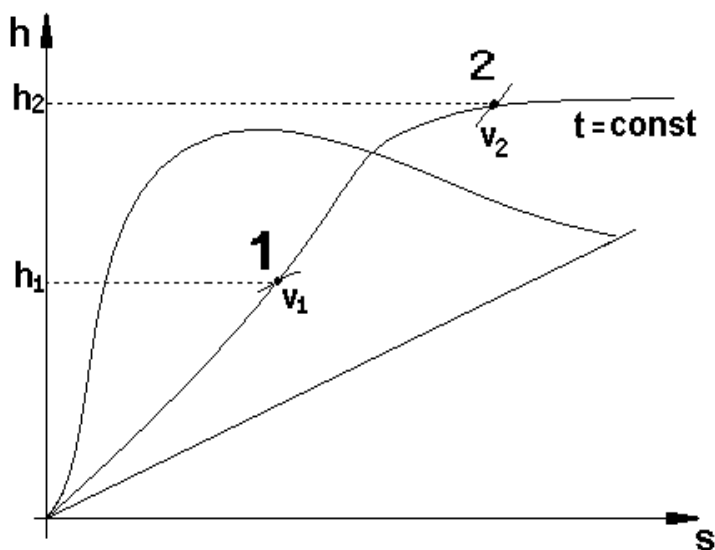


Рисунок 11 – Изображение изотермического процесса на  $hs$ -диаграмме

Тепло, изменение внутренней энергии (потенциальной ее части) и работу процесса находят по формулам (155) – (157).

**Адиабатный процесс** ( $dq=0$ ). На рис. 12 представлен адиабатный процесс, протекающий без участия тепла, т. е. и без изменения энтропии.

Изменение внутренней энергии для адиабатного процесса определяют, как и для прочих процессов, по выражению (155). Работа процесса равна изменению внутренней энергии.

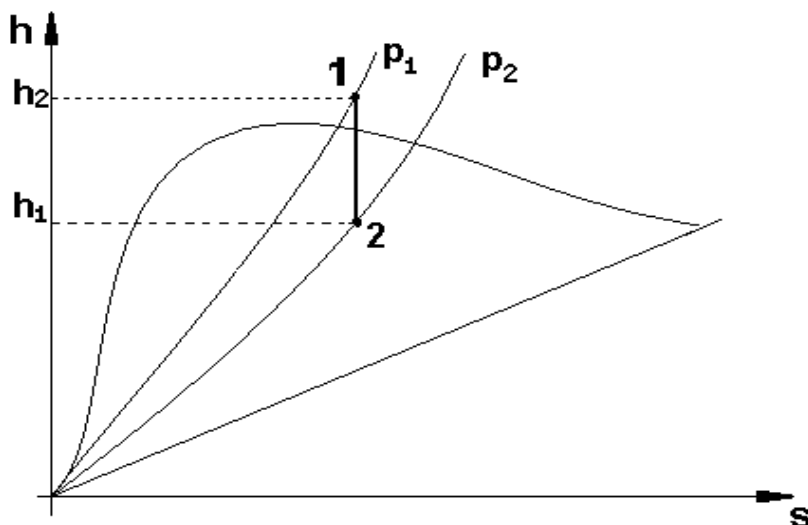


Рисунок 12 – Изображение адиабатного процесса на hs-диаграмме

**Процесс при постоянной степени сухости** ( $x=\text{const}$ ). Если в первом приближении линию  $x=\text{const}$  в Ts-диаграмме принять за прямую линию, то тепло процесса, определяемое площадью под линией, можно найти по формуле

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s . \quad (162)$$

Применительно к hs-диаграмме (рис. 13) эта формула примет вид

$$q = \frac{t_1 + 273 + t_2 + 273}{2} (s_2 - s_1) . \quad (163)$$

Изменение внутренней энергии в процессе находят обычным способом (155). Работа процесса определяется по уравнению (157).

**Теоретический паросиловой цикл** (цикл Ренкина). Для определения основных величин цикла – термического КПД, работы 1 кг пара, удельных расходов пара и тепла - достаточно на диаграмме изобразить линию расширения пара в паровом двигателе 1-2 (рис. 14).



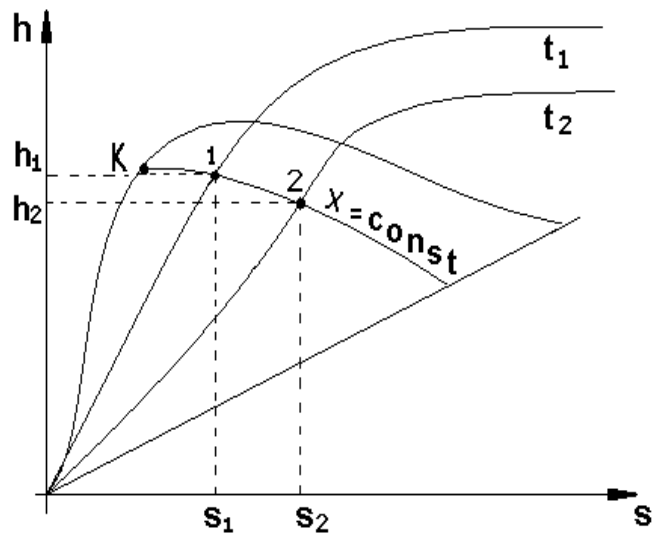


Рисунок 13 – Изображение процесса при постоянной степени сухости на  $hs$ -диаграмме

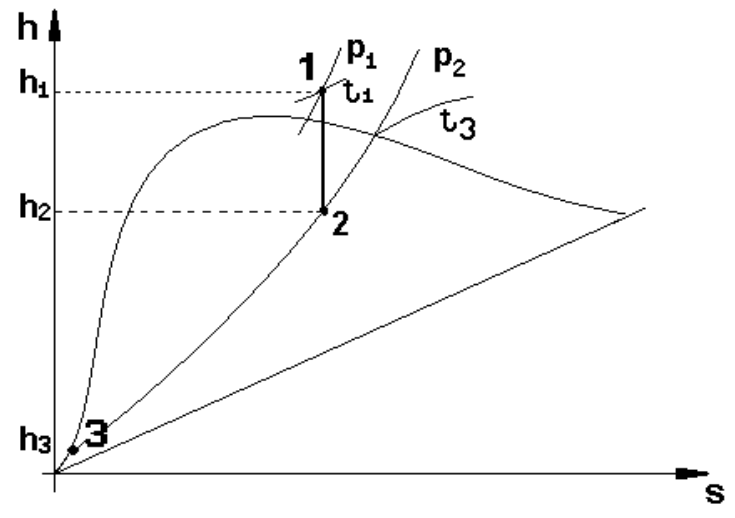


Рисунок 14 – Изображение процесса расширения пара в паровом двигателе на  $hs$ -диаграмме

## Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_3}, \quad (164)$$

поскольку энтальпия конденсата (точка 3) численно равна температуре насыщения в той же точке. Работа 1 кг пара

$$l_u = h_2 - h_1. \quad (165)$$

Удельный расход пара на 1 кВт·ч

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{h_1 - h_2}; \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (166)$$

Удельный расход тепла на 1 кВт·ч

$$q = G (h_1 - h_3) \cong G (h_1 - t_3); \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (167)$$

или

$$q = \frac{3600}{\eta_t}; \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (168)$$

В формулах (166) – (168) величина 3600 кДж/(кВт·ч) является тепловым эквивалентом.

**Дросселирование.** Термодинамическая характеристика процесса дросселирования  $h = \text{const}$ . Если состояние пара до дросселирования определяется точкой 1 (рис. 15) и давление  $P_2$  после дросселирования задано, то конечное состояние определится точкой 2, лежащей на пересечении горизонтальной линии, проведенной из точки 1, с изобарой  $P_2$ .

При этом по расположению точки 2 видно, что в результате дросселирования пар, будучи вначале влажным, стал перегретым, что удельный объем его возрос, что температура снизилась, а энтропия возросла.

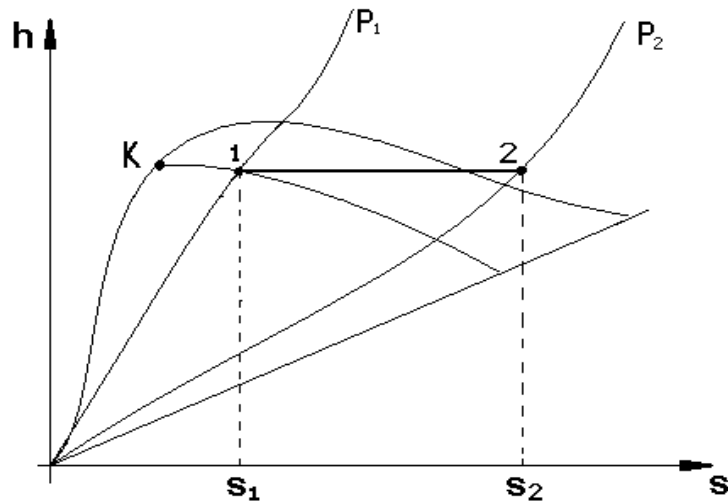


Рисунок 15 – Изображение процесса дросселирования пара на hs-диаграмме

Эффект изменения температуры при дросселировании называется дроссель-эффектом (эффектом Джоуля - Томсона), который принято различать по величине и знаку.

Под дифференциальным дроссель-эффектом понимают величину

$$\epsilon = \left( \frac{dT}{dP} \right)_h, \quad (169)$$

т. е. изменение температуры при дросселировании на  $dP$ , причем поскольку всегда  $dp < 0$ , то

при  $dT < 0$   $\epsilon > 0$  (положительный дроссель-эффект),

при  $dT > 0$   $\epsilon < 0$  (отрицательный дроссель-эффект),

при  $dT = 0$   $\epsilon = 0$  (нулевой дроссель-эффект).

Интегральный дроссель-эффект есть изменение температуры при дросселировании на конечное количество единиц давления:

$$\Delta T = \int_{P_1}^{P_2} \epsilon dP . \quad (170)$$

Его знак совпадает со знаком дифференциального дроссель-эффекта. Поскольку дросселирование происходит без теплообмена с внешней средой (адиабатически необратимо), то отмеченное возрастание энтропии указывает на необратимость процесса дросселирования.

### Примеры решения задач

64 В трубу парового котла поступает 1000 кг/ч воды при температуре насыщения. Найти плотность выходящей из трубы пароводяной смеси, если давление в котле  $P_{абс}=40$  ат, теплоглощение трубы 40000 ккал/ч; изменением давления по высоте трубы можно пренебречь.

Решение:

Определяем по табл. Д.2 приложения Д теплоту парообразования  $r$ , удельный объем кипящей воды  $v'$  и сухого пара  $v''$  при давлении 40 ат (3,92 МПа).

Количество получающегося пара в трубе

$$G_{п} = \frac{Q}{r} = \frac{40000 \cdot 4,186}{1713,2,6} = 97,7 \text{ кг/ч} .$$

Степень сухости смеси в выходном сечении трубы

$$x = \frac{G_{п}}{G_{вод}} = \frac{97,7}{1000} = 0,0977 .$$

Удельный объем смеси по уравнению (144)

$$v_x = 0,0977 \cdot 0,05078 + (1 - 0,0977) \cdot 0,0012493 = 0,00608 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Следовательно, плотность смеси

$$\rho_x = \frac{1}{0,00608} = 164 \text{ кг/м}^3.$$

65 На получение пара давлением  $P=75$  ат затрачено тепла 480 ккал/кг. Определить состояние пара и его плотность, если пар получался из воды с температурой  $150^\circ\text{C}$ .

Решение:

Энтальпия воды при температуре  $150^\circ\text{C}$  (по табл. Д.1 приложения Д) составляет 632,2 кДж/кг.

Энтальпия пара

$$h = h' + q = 632,2 + 480 \cdot 4,186 = 2641,5 \text{ кДж/кг}.$$

Характеристики водяного пара при давлении 75 ат (7,35 МПа) следующие (табл. Д.2 приложения Д):

$$h' = 1231 \text{ кДж/кг}; h'' = 2758,6 \text{ кДж/кг}; r = 1492 \text{ кДж/кг}; \rho'' = 38,6 \text{ кг/м}^3.$$

Сравнивая энтальпию полученного пара с энтальпией сухого пара, устанавливаем, что пар влажный.

Степень сухости пара определяем исходя из уравнения (146):

$$x = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{2641,5 - 1231}{1492} = 0,94.$$

Плотность полученного пара

$$\rho_x = \frac{\rho''}{x} = \frac{38,6}{0,94} = 41,06 \text{ кг/м}^3.$$

66 В резервуаре объемом  $0,75 \text{ м}^3$  находится сухой насыщенный пар давлением 1 МПа. Пар подогревается при неизменном объеме, и к концу нагревания его давление повышается до 1,4 МПа.

Определить количество затраченного на нагревание тепла.

Решение:

Сухой насыщенный пар при  $P=1$  МПа имеет удельный объем  $v''=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг и энтальпию  $h''=2777,8$  кДж/кг. Следовательно, его внутренняя энергия

$$u'' = h'' - P_1 v'' = 2777,8 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,1945 = 2583,3 \text{ кДж/кг.}$$

К концу нагревания пар будет перегрет, причем его энтальпия будет равна (интерполяция по таблицам перегретого пара для  $P=1,4$  МПа,  $v=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг – приложение Е): 3197,3 кДж/кг.

Внутренняя энергия перегретого пара

$$u = h - P_2 v = 3197,3 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1945 = 2906,3 \text{ кДж/кг.}$$

Масса пара в сосуде

$$m = \frac{V}{v''} = \frac{0,75}{0,1945} = 3,85 \text{ кг.}$$

На нагревание было затрачено тепло

$$Q = m (u - u'') = 3,85 \cdot (2906,3 - 2583,3) = 1244 \text{ кДж.}$$

67 Найти количество получающегося сухого насыщенного пара в сепараторе непрерывной продувки парового котла производительностью 200 т/ч, если процент непрерывной продувки равен 2,5%, давление в котле  $P_1=3$  МПа, а котловая вода перед входом в сепаратор дросселируется до  $P_2=0,3$  МПа. КПД сепаратора принять равным 98%.

Решение:

Энтальпия котловой воды при давлении 3 МПа составляет 1009,4 кДж/кг (табл. Д.2). При давлении 0,3 МПа энтальпия воды – 561,7 кДж/кг; энтальпия сухого насыщенного пара - 2725,5 кДж/кг; теплота парообразования – 2163,8 кДж/кг.

Количество выделяемого сепаратором пара

$$G = \frac{0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot (10009,4 - 561,7) \cdot 0,98}{2163,8} = 1043 \text{ кг/ч.}$$

68 Какое количество воды можно нагреть от 10 до 20°C водой, выходящей из сепаратора непрерывной продувки (см. задачу 67), если вода в теплообменнике непрерывной продувки должна быть охлаждена до 50°C? Потеря тепла теплообменником в окружающую среду 5%.

Решение:

Энтальпия воды при 50°C (табл. Д.1) 209,3 кДж/кг.

Количество подогреваемой воды

$$G_{\text{вод}} = \frac{(561,75 - 209,3) \cdot 0,95 \cdot (0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 - 1043)}{20 - 10} = 31400 \text{ кг/ч.}$$

69 В установке для подогрева сетевой воды (системы теплофикации) имеются пиковые и основные подогреватели. Первые обогреваются паром с давлением 5 ат и температурой 250°C, а вторые - паром с  $P_2=1,2$  ат температурой 130°C. Конденсат пиковых подогревателей направляется в основные, где происходит частичное использование его энтальпии.

Определить часовые расходы пара на пиковые и основные подогреватели, если:

- количество воды, которую следует подогреть,  $G_w=30$  т/ч;
- вода в установке подогревается с  $t_1=60^\circ$  до  $t_2=110^\circ\text{C}$ ;
- разность между температурой воды, выходящей из основных подогревателей, и температурой насыщения обогревающего их пара составляет  $8^\circ\text{C}$ ;
- КПД подогревателей  $\eta=98\%$ .

Решение:

Температура насыщения пара при  $P_2=1,2 \text{ ат} = 0,12 \text{ МПа}$  (табл. Д.2) составляет  $t''=104,25^\circ\text{C}$ , следовательно, при входе в пиковые подогреватели сетевая вода будет иметь температуру

$$t = 104,25 - 8 = 96,25^\circ\text{C}.$$

Энтальпия пара при  $250^\circ\text{C}$  составляет  $h_5=2801 \text{ кДж/кг}$  (табл. Д.1). Энтальпия кипящей воды при  $P_1=5 \text{ ат} = 0,49 \text{ МПа}$  (табл. Д.2) составляет  $h'_5=640,1 \text{ кДж/кг}$ .

Расход пара на пиковые подогреватели

$$G_5 = \frac{G_w \cdot 10^3 \cdot (t_2 - t)}{\eta (h_5 - h'_5)} = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot (110 - 96,25)}{0,98 \cdot (2801 - 640,1)} = 775 \text{ кг/ч}.$$

Энтальпия пара при  $130^\circ\text{C}$  –  $h_{1,2}=2720,6 \text{ кДж/кг}$ . Энтальпия кипящей воды при  $P_2=1,2 \text{ ат} = 0,12 \text{ МПа}$  –  $h'_{1,2}=439,34 \text{ кДж/кг}$ .

Суммарный теплосъем с основных подогревателей

$$q_{\text{оп}} = G_w \cdot 10^3 \cdot C_w (t - t_1) = 30 \cdot 10^3 \cdot 4,186 \cdot (96,25 - 60) = 4,55 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч},$$

из которых на конденсат пиковых подогревателей приходится:

$$q' = \eta G_5 (h'_5 - h'_{1,2}) = 0,98 \cdot 775 \cdot (640,1 - 439,34) = 151887 \text{ кДж/ч}$$

и на пар при давлении  $0,12 \text{ МПа}$  -

$$q_{\text{оп}} - q' = 4,55 \cdot 10^6 - 151887 = 4,4 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Часовой расход пара на основные подогреватели

$$G_{1,2} = \frac{4,4 \cdot 10^6}{0,98 \cdot (2720,6 - 439,34)} = 1955 \text{ кг/ч}.$$

70 Найти с помощью  $h_s$ -диаграммы теплоту парообразования для давления  $5 \text{ бар}$ .

Решение:

На  $h_s$ -диаграмме находим изобару  $P=5 \text{ бар}$  (приложение Г).



На изобаре при любой степени сухости берется точка 1 и рассматривается изобарный процесс 1-2 (точка 2 – сухой насыщенный пар), для которого подведенное тепло

$$q = h_2'' - h_1 = r(1 - x).$$

Например, точка 1:  $P_1=5$  бар;  $x=0,8$ ;  $h_1=2340$  кДж/кг. Точка 2:  $P_2=5$  бар;  $h_2=2750$  кДж/кг. Теплота парообразования для давления 5 бар будет соответственно равна

$$r = \frac{h_2'' - h_1}{1 - x} = \frac{2750 - 2340}{1 - 0,8} = 2050 \text{ кДж/кг}.$$

71 В сосуде неизменной емкости находится 1 кг пара с давлением 30 бар и температурой 600°C. От пара отводится 400 кДж тепла. До каких значений упадут давление и температура пара внутри сосуда?

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме исходную точку 1 ( $P_1=30$  бар;  $t_1=600^\circ\text{C}$ ) и находим: значение энтальпии –  $h_1=3690$  кДж/кг и удельного объема –  $v_1=0,133$  м<sup>3</sup>/кг. Внутренняя энергия для нее будет:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 880 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3290 \text{ кДж/кг}.$$

В изохорном процессе теплообмен связан лишь с изменением внутренней энергии. Следовательно,

$$u_2 = u_1 - q = 3290 - 400 = 2890 \text{ кДж/кг}.$$

Давление в точке 2 находим интерполяцией. Для этого на изохоре  $v=0,133$  м<sup>3</sup>/кг берем две точки с давлениями (произвольными):  $P_3=20$  бар и  $P_4=24$  бар, определяем по диаграмме их энтальпию и подсчитываем для них внутреннюю энергию:

для  $P_3=20$  бар -

$$u_3 = 3080 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 2820 \text{ кДж/кг};$$

для  $P_4=24$  бар -

$$u_4 = 3310 \cdot 10^3 - 24 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3000 \text{ кДж/кг}.$$

Давление в конце процесса находят интерполяцией:

$$P_2 = 20 + \frac{(24 - 20)(2890 - 2820)}{3000 - 2820} = 23,5 \text{ бар}.$$

Находим на диаграмме точку 2 и определяем ее температуру  $t_2=350^\circ\text{C}$ .

72 Сухой насыщенный пар при постоянном давлении 10 бар сначала перегревается до  $600^\circ\text{C}$ , а затем при неизменном объеме вновь охлаждается до сухого насыщенного состояния. Найти изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме точки 1, 2 и 3 и определяем их характеристики:

$$P_1=10 \text{ бар}; x=1; h_1=2770 \text{ кДж/кг}; s_1=6,68 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_1=0,22 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$t_2=600^\circ\text{C}; h_2=3700 \text{ кДж/кг}; s_2=8,06 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_2=0,4 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_3=0,4 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=4 \text{ бар}; x=1; h_3=2750 \text{ кДж/кг}; s_3=6,88 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Находим изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе:

$$\Delta h = h_3 - h_1 = 2750 - 2770 = -20 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u = u_3 - u_1 = (2750 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5 \cdot 0,4) - (2770 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,22) = -21,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = s_3 - s_1 = 6,88 - 6,68 = 0,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

73 Процесс протекает при неизменной 90%-ной сухости от давления  $P_1=20$  бар до давления  $P_2=1$  бар. Найти участвующее в процессе тепло, изменение внутренней энергии и работу пара по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ s-диаграмме (приложение Г) точки 1 и 2 и определяем их характеристики:

$$P_1=20 \text{ бар}; x=0,9;$$

$$t_1=212 \text{ }^\circ\text{C}; h_1=2620 \text{ кДж/кг}; s_1=5,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_1=0,11 \text{ м}^3\text{/кг};$$

$$P_2=1 \text{ бар}; x=0,9;$$

$$t_2=100 \text{ }^\circ\text{C}; h_2=2450 \text{ кДж/кг}; s_2=6,76 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_2=1,5 \text{ м}^3\text{/кг}.$$

Найдем подведенное тепло по уравнению (162):

$$q \cong \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s = \frac{485 + 373}{2} (6,76 - 5,97) = 339 \text{ кДж/кг},$$

затем изменение внутренней энергии в процессе

$$\Delta u = (2450 \cdot 10^3 - 10^5 \cdot 1,5) - (2620 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,11) = -137,5 \text{ кДж/кг}.$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики:

$$l = q - \Delta u = 339 - (-137,5) = 485,5 \text{ кДж/кг}.$$

74 Перегретый пар давлением  $P_1=100$  бар и температурой  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2=10$  бар. Определить средний дифференциальный дроссель-эффект по величине и знаку.

Решение:

Для нахождения состояния пара после дросселирования из точки 1 ( $P_1=100$  бар;  $t_1=350 \text{ }^\circ\text{C}$ ) проводим линию  $h=\text{const}$  до пересечения с заданным конечным давлением  $P_2=10$  бар. По  $h$ s-диаграмме на-

ходим  $t_2=243^\circ\text{C}$ . Следовательно, средний дифференциальный дроссель-эффект

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{P_2 - P_1} = \frac{243 - 350}{10 - 100} = 1,185 .$$

Поскольку при дросселировании всегда  $\Delta P < 0$ , а в данном случае и  $\Delta t < 0$ , то знак дроссель-эффекта положительный ( $\varepsilon > 0$ ).

75 Для подачи потребителю пара в сухом насыщенном состоянии давлением 6 бар используется пар, вырабатываемый котлами при  $P_2=40$  бар и  $350^\circ\text{C}$ . После дросселирования пар пропускается через поверхностный пароохладитель, где происходит его охлаждение при неизменном давлении. Сколько тепла за 1 ч отводится от пара в охладителе, если расход его составляет 5000 кг/ч?

Решение:

Наносим на  $h_s$ -диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара, вырабатываемого котлами, – точка 1, после дросселирования – точка 2 и направляемого потребителю – точка 3. Определим значение энтальпии до и после пароохладителя:

$$h_1=3090 \text{ кДж/кг}; h_2=2760 \text{ кДж/кг}.$$

Поскольку охлаждение пара в поверхностном охладителе происходит при  $P=\text{const}$ , то отведенное тепло

$$Q = G (h_3 - h_2) = 5000 \cdot (2760 - 3090) = -1650000 \text{ кДж/ч} = 458 \text{ кДж/с} .$$

76 В идеальном паросиловом цикле Ренкина пар перед турбиной имеет давление 50 бар и температуру  $400^\circ\text{C}$ . Определить работу 1 кг пара, расходы пара и тепла на киловатт-час и термический КПД, если вакуум в конденсаторе турбины 95%, а барометрическое давление 700 мм рт. ст.

Решение:

Абсолютное давление в конденсаторе

$$P_2 = \frac{P_{\text{бар}} (1 - 0,95)}{735,6} = \frac{700 \cdot (1 - 0,95)}{735,6} = 0,04665 \text{ бар} .$$

Для нахождения указанных в задаче величин достаточно на диаграмме (приложение Г) провести линию 1-2 адиабатного расширения пара в турбине. Характеристики точек:

$$h_1 = 3200 \text{ кДж/кг}; h_2 = 2020 \text{ кДж/кг}; t_2 = 32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Работа 1 кг пара

$$l_u = h_1 - h_2 = 3200 - 2020 = 1180 \text{ кДж/кг} .$$

Удельный расход пара на киловатт-час

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{1180} = 3,05 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} .$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_2} = \frac{3200 - 2020}{3200 - 32} = 0,384 .$$

Удельный расход тепла на киловатт-час

$$q = \frac{3600}{\eta_t} = \frac{3600}{0,384} = 9375 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} .$$

### Задачи

224 Найти температуру насыщенного пара при давлении 85,4 ат.

Ответ:  $t'' = 298,34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

225 Температура насыщенного пара при некотором давлении равна  $305,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Каково давление этого пара?

Ответ:  $P = 92,9 \text{ бар}$ .

226 По данным испытаний турбины разрежение в ее конденсаторе составляет 94% при барометрическом давлении 730 мм рт. ст. и 0°C. Каково абсолютное давление в конденсаторе?

Ответ:  $P=0,0587$  бар.

227 Абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины 0,04 ат. Каково при этом значение вакуума в процентах, если барометрическое давление 720 мм рт. ст. при температуре 25°C?

Ответ: вакуум 96%.

228 Как велика ошибка при определении удельного объема влажного пара с давлением 20 ат и влажностью 20% по приближенной формуле (145)?

Ответ: ошибка 0,288%.

229 Какова будет ошибка при определении удельного объема пара предыдущей задачи, если влажность пара увеличится до 60%.

Ответ: ошибка 1,705%.

230 Пользуясь паровыми таблицами, найти удельный объем, энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию влажного пара при давлении 5 ат и влажности 15%.

Ответ:  $v_x = 0,324$  м<sup>3</sup>/кг;  $h_x=2430$  кДж/кг;  
 $u_x=2270$  кДж/кг;  $s_x=6,1$  кДж/(кг·К).

231 В сосуде шарообразной формы находится в верхней половине сухой насыщенный пар, в нижней - вода в состоянии насыщения. Во сколько раз вес воды больше веса пара, если внутренний диаметр сосуда 1 м и давление внутри него 20 ат?

Ответ: в 86,5 раз.

232 Пар в некотором состоянии имеет давление 30 ат и плотность 14,71 кг/м<sup>3</sup>. Определить состояние пара и его удельный объем, энтальпию и энтропию.

Ответ: пар сухой;  $v''=0,06798 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$h''=2800 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=6,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

233 Пар в некотором состоянии при температуре  $245^\circ\text{C}$  имеет энтальпию  $630 \text{ ккал/кг}$ . Определить состояние пара, его плотность и внутреннюю энергию.

Ответ: пар влажный;  $\rho_x=20,2 \text{ кг/м}^3$ ;

$u_x=2460 \text{ кДж/кг}$ .

234 Пар при давлении  $66 \text{ ат}$  имеет удельный объем  $0,04675 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Найти температуру, энтальпию и энтропию пара.

Ответ: пар влажный;  $h=3260 \text{ кДж/кг}$ ;

$s=6,64 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

235 Стальной цилиндрический резервуар диаметром  $600 \text{ мм}$  и длиной  $2500 \text{ мм}$  заполнен сухим насыщенным паром с  $P_1=20 \text{ ат}$ . К резервуару подводится некоторое количество тепла, в результате чего давление пара увеличивается до  $P_2=35 \text{ ат}$ . Определить конечную температуру пара и количество подведенного тепла.

Ответ:  $t_2 = 503,3^\circ\text{C}$ ;  $Q=3565 \text{ кДж}$ .

236 Найти тепло, идущее на перегрев сухого насыщенного пара давлением  $80 \text{ бар}$  до  $500^\circ\text{C}$ , с помощью паровых таблиц, а также используя данные о теплоемкостях пара. На сколько процентов энтальпия перегретого пара больше энтальпии сухого пара?

Ответ:  $q=614 \text{ кДж/кг}$ ; на  $23,3\%$ .

237 Определить тепло, идущее на перегрев пара в пароперегревателе котла, если до поступления в него пар имеет давление  $60 \text{ бар}$  и влажность  $0,5\%$ , а конечная температура пара  $500^\circ\text{C}$ . Найти также работу пара, связанную с увеличением его объема в процессе перегрева, протекающем при  $P=\text{const}$ .

Ответ:  $q=647,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $l=146000 \text{ кДж/кг}$ .

238 Определить часовое количество тепла, затрачиваемого на перегрев пара до  $480^{\circ}\text{C}$  в котлоагрегате, если давление пара 45 бар, а производительность агрегата 60 т/ч. На сколько процентов пойдет больше тепла на перегрев того же количества пара, если благодаря несовершенной системе сепарации в перегреватель будет поступать пар с 2%-ной влажностью?

Ответ:  $Q=35,85 \cdot 10^6$  кДж/ч; перерасход тепла на 5,63%.

239 В промежуточный перегреватель поступает сухой насыщенный пар из турбины с  $P_1=12$  бар в количестве 60 т/ч и перегревается до  $400^{\circ}\text{C}$ . Определить часовое количество тепла, затрачиваемое на перегрев пара.

Ответ:  $Q=28,7 \cdot 10^6$  кДж/ч.

240 На сколько градусов снизится перегрев пара, если при одном и том же подводе тепла  $21 \cdot 10^6$  кДж/ч и производительности перегревателя 30 т/ч в него будет вместо сухого насыщенного пара поступать влажный пар с 1,5%-ной влажностью? Давление пара  $P=60$  бар.

Ответ: на  $10,7^{\circ}\text{C}$ .

241 В цилиндре, закрытом поршнем, находится перегретый пар с начальным давлением  $P_1=23$  бар и температурой  $300^{\circ}\text{C}$ , причем поршень отстоит от дна цилиндра на 1000 мм. Под действием груза, лежащего на поршне, пар сжимается и поршень проходит путь, равный 400 мм. Определить работу, затраченную на сжатие, и количество отведенного тепла.

Ответ:  $L = 64000$  кДж;  $Q=4365$  кДж.

242 Начальное давление пара 12 бар, влажность 20%. Пар в результате подогрева превращается в перегретый с температурой  $250^{\circ}\text{C}$  первый раз при  $v = \text{const}$ , а второй раз при  $P=\text{const}$ . Какая теплота больше и во сколько раз? Каков должен быть по величине и зна-



ку теплообмен с внешней средой, чтобы из конечного состояния, полученного в процессе  $v=\text{const}$ , достигнуть конечное состояние в процессе  $P=\text{const}$  при условии  $t=\text{const}$ .

Ответ: при  $P=\text{const}$  больше в 1,18 раз, теплообмен положительный,  $q=104,6$  кДж/кг.

243 Сухой насыщенный пар с  $P_1=40$  бар расширяется при  $t=\text{const}$  до  $P_2=10$  бар. Какова совершенная паром работа?

Ответ:  $l=338$  кДж/кг.

244 1 кг влажного пара с давлением 30 бар и 10%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до  $P_2=2$  бар. Определить работу процесса.

Ответ:  $l=777$  кДж/кг.

245 Каково значение удельного объема в конце изотермического процесса расширения сухого насыщенного пара с  $P_1=25$  бар, если за время процесса к пару подводится 629 кДж/кг тепла? Как велика ошибка в определении конечного удельного объема, если пар принять за идеальный газ?

Ответ:  $v_2=0,96275$  м<sup>3</sup>/кг; ошибка 49,8%.

246 В начальном состоянии перегретый пар имеет давление 60 бар и температуру 400°C. Какова будет влажность этого пара в конце обратимого адиабатного расширения, если конечное давление 3 бар?

Ответ: влажность  $(1-x)=8,3\%$ .

247 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 10%-ной влажностью сжимается по адиабате до  $P_2=50$  бар. Каковы состояние и основные параметры пара в конце сжатия?

Ответ: пар перегрет;  $t_2=322,6^\circ\text{C}$ ;

$s_2=6,35$  кДж/(кг·К);  $v_2=0,04954$  м<sup>3</sup>/кг.

248 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 80%-ной влажностью сжимается адиабатно в идеальном паровом компрессоре до  $P_1=250$  бар. Каковы состояние пара на выходе из компрессора и работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг пара?

Ответ: в конце сжатия – некипящая вода с  $t_2=261,54^\circ\text{C}$ ;  $l=82150$  кДж/кг.

249 Идет обратимый адиабатный процесс в области перегретого пара от начального давления  $P_1=20$  бар при  $t_1=500^\circ\text{C}$  до конечного давления  $P_2_{\text{абс}}=3$  бар. Найти показатель адиабаты указанного процесса, считая его неизменным по всей длине процесса.

Ответ:  $k=1,29$ .

250 Процесс происходит при неизменной 20%-ной влажности от начального давления 1 бар до конечного 20 бар. Найти по величине и знаку тепло, изменение внутренней энергии и работу процесса.

Ответ:  $q = - 250,1$  кДж/кг;  $\Delta u = 173,5$  кДж/кг;

$l = - 424000$  кДж/кг.

251 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и  $x_1=0,85$  дросселируется до 5 бар, после чего направляется на производство. Найти состояние, удельный объем, степень сухости и температуру пара после дросселирования.

Ответ: пар влажный;  $v_2=0,344$  м<sup>3</sup>/кг;  $x_2=0,9$ ;  
 $t=151,11^\circ\text{C}$ .

252 Влажный пар с  $P_1=50$  бар и  $x=0,98$  дросселируется до давления 1 бар. Найти состояние пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-эффект положителен,  $\Delta t = - 118,1^\circ\text{C}$ .

253 Перегретый пар с  $P_1=100$  бар и  $t_1=350^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2=10$  бар. Найти конечную температуру и изменение внутренней энергии и энтропии пара в результате дросселирования.

Ответ:  $t_2=242,7^\circ\text{C}$ ;  $\Delta u = - 3.36$  кДж/кг;

$\Delta s=0,942$  кДж/(кг·К).

254 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и 5%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=1$  бар. Определить состояние пара после дросселирования, интегральный и средний дифференциальный дроссель-эффекты по величине и знаку и увеличение энтропии пара.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-

эффект положительный:  $\Delta t = - 114,86^\circ\text{C}$ ;

$\epsilon=3,95 > 0$ ;  $\Delta s=1,71$  кДж/(кг·К).

255 Идеальный одноступенчатый компрессор сжимает перегретый пар с  $P_1=2$  бар,  $t_1=150^\circ\text{C}$  до  $P_2=30$  бар. Определить работу, затраченную на компрессор, если сжатие производится по адиабате и сжимается 5 кг пара.

Ответ:  $L = 362000$  кДж.

256 Барабан котла имеет внутренний диаметр 1500 мм и длину 10 м. Какова аккумулирующая способность котла, если при неизменном давлении и прекращении питания уровень воды в нем может быть понижен на 200 мм (100 мм вверх и 100 мм вниз от центра барабана)? Давление в котле 60 бар, температура питательной воды  $150^\circ\text{C}$ . Каково увеличение часовой производительности котла, если указанное понижение уровня происходит в течение 1 мин?

Ответ:  $\Delta G=36300$  кг/ч.

257 Для влажного пара с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью найти удельный объем, температуру, энтропию, энтальпию и внутреннюю энергию.

Ответ:  $v=0,081 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $t=213^\circ\text{C}$ ;  $h=2420 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $s=5,575 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $u=2265 \text{ кДж/кг}$ .

258 Сравнить значения энтропии и энтальпии сухого насыщенного пара давлением  $P=50$  бар по  $h$ - $s$ -диаграмме и по паровым таблицам.

Ответ: по диаграмме -  $h''=2800 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=5,97 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
по таблицам -  $h''=2795 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=5,980 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

259 Для перегретого пара давлением 50 бар и температурой перегрева  $400^\circ\text{C}$  найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию пара.

Ответ:  $v=0,059 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $u=2905 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $h=3190 \text{ кДж/кг}$ ;  $s=6,65 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

260 Пар имеет энтропию  $7,25 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Найти внутреннюю энергию пара, если его давление 10 бар. Каково состояние пара?

Ответ:  $u=2855 \text{ кДж/кг}$ ; пар перегрет.

261 При давлении 50 бар энтальпия пара равна  $3150 \text{ кДж/кг}$ . Определить температуру, энтропию и внутреннюю энергию пара.

Ответ:  $t=380^\circ\text{C}$ ;  $s=6,556 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  
 $u=2865 \text{ кДж/кг}$ .

262 1 кг влажного пара с начальным давлением 10 бар и 80%-ным паросодержанием подсушивается до сухого насыщенного состояния при неизменном давлении и неизменном объеме. В каком из процессов затрачивается больше тепла на подсушку? Каково давление в конце процесса подсушки при неизменном объеме?

Ответ:  $q_p=402 \text{ кДж/кг}$ ;  $q_v=372,5 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $P_2=12,4$  бар.

263 Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе  $P=30 \text{ бар}=\text{const}$ , если в начале процесса пар имел

влажность 13%, а в конце стал перегретым и его температура повысилась до 400°C. Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный?

Ответ:  $q=660$  кДж/кг;  $l=117,6$  кДж/кг;  $\Delta u=541,5$  кДж/кг;  
для превращения пара в сухой насыщенный было  
затрачено 35,5% тепла.

264 Сколько надо затратить тепла, чтобы сухой насыщенный пар, занимающий объем 0,05 м<sup>3</sup>/кг, нагреть при постоянном объеме до 650°C. Во сколько раз при этом возрастет давление пара?

Ответ:  $q=753$  кДж/кг; в 2,07 раза.

265 Перегретый пар с начальным давлением 1 бар и температурой 250°C сжимается по изотерме и в конце процесса становится влажным с 15% влаги. Найти отводимое тепло, изменение внутренней энергии и работу, затрачиваемую на сжатие.

Ответ:  $q= - 1282$  кДж/кг;  $\Delta u= - 356$  кДж/кг;  
 $l = - 926$  кДж/кг.

266 Влажный пар с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до сухого насыщенного состояния. Найти теплообмен с окружающей средой и изменение внутренней энергии по величине и знаку.

Ответ:  $q=383$  кДж/кг;  $\Delta u=342$  кДж/кг.

267 Какова работа процесса, если происходит процесс адиабатного сжатия сухого насыщенного пара давлением 3 бар до конечного давления 50 бар? Определить конечную температуру пара.

Ответ:  $t_2=505^\circ\text{C}$ ;  $l= - 559$  кДж/кг.

268 Процесс протекает по верхней пограничной кривой от  $P_1=20$  бар до  $P_2=1,5$  бар. Определить значение средней теплоемкости

процесса по величине и знаку? Изменится ли знак теплоемкости, если процесс будет протекать в противоположном направлении?

Ответ:  $C_p = - 3,73 \text{ кДж/(кг·К)}$ ; от перемены направления знак не меняется.

269 Перегретый пар с  $P_1=20$  бар и  $t_1=400^\circ\text{C}$  сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается до температуры  $115^\circ\text{C}$  при неизменном объеме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса.

Ответ:  $q = - 267 \text{ кДж/кг}$ ;  $l=418,6 \text{ кДж/кг}$ .

270 При изотермном сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего в начале  $P_1=3$  бар и  $t_1=300^\circ\text{C}$ , отводится 419 кДж тепла. Каково давление в конце сжатия и на сколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти также затраченную работу на сжатие пара.

Ответ:  $P_2 = 13,5$  бар;  $\Delta u = - 25,05 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $l = - 396 \text{ кДж/кг}$ .

271 Адиабатное расширение сухого (насыщенного) пара происходит от 10 до 0,5 бар. Найти средний показатель кривой процесса.

Ответ:  $k=1,135$ .

272 Влажный пар с давлением 30 бар и 15%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=3$  бар. Найти удельный объем пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ:  $v=0,56 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\Delta t=102^\circ\text{C}$ .

273 Котельная производит пар давлением 15 бар. Каков должен быть перегрев пара, если цех предприятия должен получить пар давлением  $P_2 = 2$  бар и температурой  $200^\circ\text{C}$ . Снижение давления с 15 до 2 бар происходит в редукционном клапане.

Ответ:  $t=227^\circ\text{C}$ .

274 Построить график изменения термического КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина) для начальных давлений пара  $P=20, 40, 60, 80$  и  $100$  бар и начальной температуры пара  $400^\circ\text{C}$ , если вакуум в конденсаторе во всех случаях равен  $96\%$  при барометрическом давлении  $735,6$  мм рт. ст. Найти влажность пара в конце расширения для всех указанных начальных давлений.

Ответ:  $P_i = 100; 80; 60; 40; 20$  бар;

$\eta_{t1} = 0,41; 0,407; 0,395; 0,381; 0,352;$

$(1-x)_i = 29; 26,2; 24; 21,3; 16,8\%$ .

275 Как сказывается на экономичности теоретической паросиловой установки повышение температуры перегрева до  $300, 400, 500$  и  $600^\circ\text{C}$  при неизменном начальном давлении  $30$  бар и вакууме в конденсаторе  $95\%$  при барометрическом давлении  $760$  мм рт. ст.

Ответ:  $\eta_{t1} = 0,347; 0,362; 0,374; 0,392$ .

276 Сравнить удельные расходы пара двух турбин одинаковых начальных параметров:  $P_1=130$  бар,  $t_1=565^\circ\text{C}$  при одинаковых давлениях в конденсаторе  $P_2=0,035$  бар, если одна из них имеет промежуточный перегрев при  $P_n=30$  бар до начальной температуры, считая процессы расширения адиабатными.

Ответ:  $G_1=2,36$  кг/(кВт·ч);  $G_2=1,955$  кг/(кВт·ч).

277 Параметры острого пара турбин  $P_1=29$  бар,  $t_1=230^\circ\text{C}$  (сухой насыщенный пар). Определить изменение термического КПД, если давление в конденсаторе изменилось от  $0,04$  до  $0,06$  бар. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина.

Ответ:  $\eta_t=34,8$  и  $33,7\%$ .

## 1.11 Влажный воздух

При давлениях, близких к атмосферному, парциальное давление водяного пара в воздухе обычно невелико, поэтому для влажного воздуха (как для смеси) можно применять формулы, справедливые для идеальных газов, а именно, уравнение состояния идеальных газов (15) – (17) а также уравнение закона Дальтона – уравнение (31).

Основные характеристики влажного воздуха: абсолютная и относительная влажность, влагосодержание.

**Абсолютная влажность** - количество водяного пара в  $1\text{ м}^3$  влажного воздуха, численно равное плотности пара ( $\rho_p$ ) при его парциальном давлении ( $P_p$ ). Согласно закону Дальтона общее давление влажного воздуха состоит из парциального давления водяного пара ( $P_p$ ) и парциального давления сухого воздуха ( $P_B$ ).

**Относительная влажность** ( $\varphi$ ) - отношение действительной абсолютной влажности  $\rho_p$  к максимально возможной абсолютной влажности  $\rho_{p \max}$  при той же температуре:

$$\varphi = \rho_p / \rho_{p \max}. \quad (171)$$

При определении  $\rho_{p \max}$  различают два случая:

1) Температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для влажного воздуха. В этом случае  $\rho_{\max} = \rho_n$ , т. е. плотности насыщенного пара при данной температуре и находится по таблицам насыщенного водяного пара.

2) Температура влажного воздуха, а следовательно, и находящегося в нем водяного пара, больше температуры насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для влажного воздуха,



тогда  $\rho_{п \max}$  равен плотности перегретого водяного пара и определяется по таблицам перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть определена по уравнению

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{н}}, \quad (172)$$

где  $P_{п}$  — парциальное давление водяного пара;

$P_{н}$  — давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха. Для данной температуры воздуха значение  $P_{н}$  берется из таблицы насыщенного пара (приложение Д).

**Влагосодержание** воздуха - отношение массы водяного пара ( $m_{п}$ ), содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха ( $m_{в}$ ):

$$d = \frac{G_{п}}{G_{в}} = \frac{\rho_{п}}{\rho_{в}}. \quad (173)$$

Единицы измерения влагосодержания – килограмм на килограмм или грамм на килограмм. Влагосодержание можно рассчитать: в кг/кг - по уравнению

$$d = \frac{0,622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (174)$$

в г/кг - по уравнению

$$d = \frac{622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (175)$$

где  $P_{п}$  - парциальное давление пара, Па;

$P$  - общее давление, Па.

Из уравнения (175) следует, что

$$P_{п} = P \frac{d}{622 + d}. \quad (176)$$

Если парциальное давление водяного пара  $P_{\text{п}}$  равно давлению насыщения  $P_{\text{н}}$  при данной температуре, то влагосодержание при насыщении

$$d_{\text{max}} = 0,622 \frac{P_{\text{н}}}{P - P_{\text{н}}}, \quad (177)$$

откуда

$$P_{\text{н}} = P \frac{d_{\text{max}}}{0,622 + d_{\text{max}}}, \quad (178)$$

где  $d_{\text{max}}$  — максимальное влагосодержание влажного воздуха, определяемое при данном давлении влажного воздуха.

Влагосодержание и относительная влажность связаны между собой следующим уравнением:

$$\varphi = \frac{d / (0,622 + d)}{P / P_{\text{max}}}, \quad (179)$$

где  $P_{\text{max}}$  - максимально возможное давление водяного пара при данной температуре.

**Степенью насыщения** называется отношение влагосодержания к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха при данной температуре и давлении:

$$\psi = \frac{d}{d_{\text{max}}}. \quad (180)$$

Между  $\psi$  и  $\varphi$  существуют следующие соотношения:

$$\psi = \varphi \frac{0,622 + d}{0,622 + d_{\text{max}}} \quad \text{и} \quad \psi = \varphi \frac{P - P_{\text{н}}}{P - P_{\text{п}}}. \quad (181)$$

Для невысоких температур, когда  $P_{\text{н}}$  довольно мало по сравнению с общим давлением  $P$ , можно полагать, что  $\psi = \varphi$ .

Температура ( $t_p$ ), до которой нужно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным (т.е.  $\Phi = 100\%$ ), называется **температурой точки росы**. При охлаждении ниже данной температуры происходит конденсация водяного пара.

Плотность влажного воздуха,  $\text{кг/м}^3$ , определяют по формуле

$$\rho = \frac{P}{287 T} - 0,0129 \frac{\Phi P_n}{T}, \quad (182)$$

где  $P$  и  $P_n$  – давление воздуха, Па;

$T$  – температура воздуха, К.

Энтальпия влажного воздуха равна сумме энтальпий 1 кг сухого воздуха и энтальпии  $d$  кг пара:

$$h = h_v + h_n d, \quad (183)$$

где  $d$  выражено в  $\text{кг/кг}$ , а  $h$ ,  $h_v$ ,  $h_n$  – в  $\text{кДж/кг}$ .

Энтальпия водяного пара  $h_v$ , содержащегося во влажном воздухе,  $\text{ккал/кг}$ , определяется по формуле

$$h_n = 597 + 0,46 t. \quad (184)$$

Тогда энтальпия влажного воздуха,  $\text{ккал/кг}$  сухого воздуха,

$$h = 0,24 t + d (597 + 0,46 t). \quad (185)$$

Энтальпию влажного воздуха обычно относят к 1 кг сухого воздуха, т.е. к  $(1+d)$  кг влажного воздуха.

Если смешиваются два потока воздуха ( $G_1$  и  $G_2$ ) и заданы их влагосодержания и энтальпии  $d_1$ ,  $h_1$  и  $d_2$ ,  $h_2$ , то после смешения

$$d_{\text{см}} = \frac{d_1 + a d_2}{1 + a}, \quad h_{\text{см}} = \frac{h_1 + a h_2}{1 + a}, \quad (186)$$

где  $a = G_2/G_1$ .

Для решения задач, связанных с изменением состояния влажного воздуха, применяют  $h$ - $d$ -диаграмму (приложение Ж).

В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание  $d$ , а по оси ординат - энтальпия влажного воздуха  $h$ . Для лучшего использования диаграммы координатные оси в ней проведены под углом  $135^\circ$ . Диаграмма построена для барометрического давления воздуха 745 мм рт. ст. В прилагаемой диаграмме наклонная ось не показана, вместо нее из начала координат проведена горизонтальная прямая, на которой даны значения влагосодержания  $d$ .

Линии  $h=\text{const}$  идут параллельно наклонной оси абсцисс. Линии  $d=\text{const}$  располагаются вертикально, параллельно оси ординат. Изотермы сухого воздуха располагаются наклонно к оси абсцисс. Кривая насыщения  $\varphi=100\%$  делит площадь  $h$ - $d$ -диаграммы на две области. Область диаграммы, лежащая над линией насыщения, соответствует состоянию ненасыщенного влажного воздуха при разных значениях  $\varphi$ . Область диаграммы, лежащая под линией насыщения, соответствует состоянию воздуха, насыщенного водяным паром.

В нижней части  $h$ - $d$ -диаграммы приводится кривая парциальных давлений водяного пара  $p_n = f(d)$ . Справа по оси ординат отложены значения  $P_n$  в миллиметрах ртутного столба.

Имея два любых параметра, по  $h$ - $d$ -диаграмме легко найти все параметры, характеризующие состояние влажного воздуха. Например, зная  $\varphi$  и  $t$ , быстро находят величины  $h$ ,  $d$  и  $P_n$ .

Точку росы также легко определить по  $h$ - $d$ -диаграмме. Для этого необходимо из точки, которая характеризует заданное состояние воздуха, провести вертикальную прямую до пересечения с линией насыщения. Тогда изотерма, проходящая через точку, лежащую на линии насыщения, даст температуру точки росы.

Основные процессы с влажным воздухом также удобно рассчитывать по  $hd$ -диаграмме. Так, процесс нагревания или охлаждения влажного воздуха изображается в  $hd$ -диаграмме как процесс, идущий при  $d=\text{const}$ . Процесс сушки изображается как процесс, протекающий при  $h=\text{const}$ .

### Примеры решения задач

77 Через воздухоохладитель пропускается  $100000 \text{ м}^3$  воздуха в 1 ч при абсолютном давлении  $P=740 \text{ мм рт. ст.}$ , температуре  $t=4^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi =80\%$ , при этом воздух охлаждается до  $0^\circ\text{C}$ . Определить количество отведенного тепла и количество влаги, выпадающей на поверхности охладителя.

Решение:

Для определения парциального давления водяного пара, находящегося в воздухе, по таблицам водяного насыщенного пара (приложение Д) находим давление насыщенного водяного пара при температуре смеси  $t = 4^\circ\text{C}$  –  $P_{\text{н.}}=6,1 \text{ мм рт. ст.}$  Тогда

$$P_{\text{в.}} = \varphi P_{\text{н.}} = 0,8 \cdot 6,1 = 4,88 \text{ мм рт. ст.,}$$

Влагосодержание влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (174)

$$d_1 = 0,622 \frac{4,88}{740 - 4,88} = \frac{0,622 \cdot 4,88}{735,12} = 0,00414 \text{ кг/кг.}$$

Энтальпию влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (185)

$$h_1 = 0,24 \cdot 4 + 0,00414 \cdot (597 + 0,46 \cdot 4) = 3,43 \text{ ккал/кг} = 14,35 \text{ кДж/кг.}$$

Определим парциальное давление водяного пара во влажном воздухе на выходе из охладителя при  $0^\circ\text{C}$ . Из таблицы (приложение

Д) находим, что при  $t = 0^\circ\text{C}$   $P_n = 4,6$  мм рт. ст. Тогда влагосодержание влажного воздуха на выходе из охладителя при  $t_2 = 0^\circ\text{C}$

$$d_1 = 0,622 \cdot \frac{3,68}{740 - 3,68} = 0,00311 \text{ кг/кг.}$$

Изменение влагосодержания 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 0,00414 - 0,00311 = 0,00103 \text{ кг/кг.}$$

Количество сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, определяем из уравнения (15):

$$G = \frac{P V}{R T} = \frac{(740 - 4,88) \cdot 133,3 \cdot 100000}{287 \cdot 277} = 123000 \text{ кг/ч} = 32,4 \text{ кг/с.}$$

Энтальпию влажного воздуха на выходе из охладителя при температуре  $0^\circ\text{C}$  определяем по уравнению (185):

$$h_2 = 0,24 \cdot 0 + 0,00311 \cdot (597 + 0,46 \cdot 0) = 1,86 \text{ ккал/кг} = 7,8 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 3,43 - 1,86 = 1,57 \text{ ккал/кг} = 6,55 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от всего воздуха, проходящего через охладитель в 1 ч,

$$Q = G (h_1 - h_2) = 32,4 \cdot 6,55 = 224 \text{ кДж/с.}$$

Количество влаги, выпавшей на поверхности охладителя,

$$G_w = \Delta d G = 0,00103 \cdot 123000 = 126 \text{ кг/ч.}$$

78 По техническим условиям производства в одном из цехов завода необходимо поддерживать следующие параметры воздуха: температуру  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  и относительную влажность  $\varphi_2 = 80\%$ . Для этой цели в цех непрерывно поступает свежий атмосферный воздух при

температуре  $t_1 = 18^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi_1 = 30\%$ . Барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 752$  мм рт. ст.

Определить: 1) количество добавляемой влаги на 1 кг поступающего воздуха ( $\Delta d$ ); 2) температуру  $t_3$ , до которой необходимо подогреть свежий воздух, если это увлажнение производить водой при температуре воды  $t_w = 12^\circ\text{C}$ ; 3) параметры водяного пара, если требуемое влагосодержание свежего воздуха поддерживать путем вдувания пара, не применяя в этом случае подогрева свежего воздуха.

Решение:

Влагосодержание поступающего свежего воздуха

$$d_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_{n1}}{P - \varphi_1 P_{n1}} = 0,622 \cdot \frac{0,3 \cdot 15,48}{752 - 0,3 \cdot 15,48} = 0,00386 \text{ кг/кг},$$

где  $P_{n1} = 15,48$  мм рт. ст., определяется при  $18^\circ\text{C}$  по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Влагосодержание при  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  и  $\varphi_2 = 80\%$

$$d_2 = 0,622 \frac{0,8 \cdot 19,83}{752 - 0,8 \cdot 19,83} = 0,01345 \text{ кг/кг},$$

где  $P_{n2} = 19,83$  мм рт. ст., определяется при  $22^\circ\text{C}$  по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Для определения температуры  $t_3$  найдем количество тепла, которое необходимо затратить при подогреве воздуха и воды, по уравнению

$$\begin{aligned} Q &= C_{pв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{pп} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = \\ &= 0,24 \cdot (22 - 18) + 0,00959 \cdot (597 - 12) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18) = \\ &= 6,65 \text{ ккал/кг} = 27,8 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Тогда

$$t_3 = t_1 + \frac{Q}{C_{pв} + d_1 C_{пн}} = 18 + \frac{6,65}{0,24 + 0,00368 \cdot 0,46} = 45,5^\circ \text{C}.$$

Тепло влажного воздуха

$$Q = C_{pв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = 0.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} h_d &= 597 + \frac{1}{\Delta d} [C_{pв} (t_2 - t_1) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1)] = \\ &= 597 + \frac{1}{0,00959} [0,24 \cdot (22 - 18) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18)] = \\ &= 708 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

Зная энтальпию пара  $h_n = 708$  ккал/кг, по паровым таблицам или по  $h_s$ -диаграмме определяем, что это перегретый пар; его абсолютное давление  $P_{2п} = 5$  бар и температура  $t_2 = 250^\circ \text{C}$ .

79 В камере смешения смешивается  $G_1 = 10000$  кг воздуха, параметры которого  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_1 = 60\%$ , и  $G_2 = 30000$  кг воздуха, параметры которого  $t_2 = 50^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_2 = 50\%$ . Определить параметры воздуха после смешения.

Решение:

По  $h_d$ -диаграмме находим:

при  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_1 = 60\%$  -  $h_1 = 42$  кДж/кг;  $d_1 = 9$  г/кг сухого воздуха;

при  $t_2 = 50^\circ \text{C}$ ,  $\Phi_2 = 50\%$  -  $h_2 = 160$  кДж/кг;  $d_2 = 42$  г/кг сухого воздуха.

По условиям задачи

$$a = \frac{G_2}{G_1} = \frac{30000}{10000} = 3.$$

Влагосодержание смеси по формуле (186)



$$d_{\text{см}} = \frac{9 + 3 \cdot 42}{1 + 3} = 33,8 \text{ г/кг},$$

энтальпия смеси

$$h_{\text{см}} = \frac{10 + 3 \cdot 160}{1 + 3} = 130 \text{ кДж/кг}.$$

По полученным данным находим на  $h$ -диаграмме (приложение Ж) параметры:

$$t_{\text{см}} = 42,5^\circ \text{С}; \quad \varphi = 60 \%. .$$

80 Состояние влажного воздуха характеризуется следующими параметрами: температура  $30^\circ\text{С}$  и относительная влажность 40%. Определить энтальпию влажного и сухого воздуха, а также энтальпию влаги, содержащейся в воздухе. Задачу решить, применяя  $h$ -диаграмму.

Решение:

По  $h$ -диаграмме (приложение Ж) находим точку пересечения изотермы  $t=30^\circ\text{С}$  и линии  $\varphi=40\%$ . Эта точка даст нам энтальпию 1 кг влажного воздуха  $h=56,5$  кДж/кг.

Энтальпия сухого воздуха

$$h_{\text{в}} = 0,24 t = 0,24 \cdot 30 = 7,2 \text{ ккал/кг} = 30,2 \text{ кДж/кг}.$$

Отсюда

$$h_{\text{воды}} = 56,5 - 30,2 = 26,3 \text{ кДж/кг}.$$

### Задачи

278 Относительная влажность воздуха, определенная по психрометру, составляет 40%, температура воздуха  $t=25^\circ\text{С}$ , барометри-

ческое давление 750 мм рт. ст. Определить влагосодержание воздуха и температуру точки росы.

Ответ:  $d = 0,00797$  кг/кг;  $t_p = 10,5^\circ\text{C}$ .

279 Установка для кондиционирования воздуха имеет камеру смешения. В эту камеру поступает воздух из цеха завода в количестве  $V_{ц}=6000\text{м}^3/\text{ч}$  с температурой  $t_{ц} = 20^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi_{ц}=40\%$  и свежий наружный воздух в количестве  $V_{с}=14000\text{м}^3/\text{ч}$  с температурой  $t_{с} = 5^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi_{с}=70\%$ . Полагая процесс смешения воздуха в камере адиабатным, определить: 1) влагосодержание  $d$ , 2) энтальпию  $h$ , 3) температуру  $t$  и 4) относительную влажность  $\varphi$  воздуха на выходе камеры смешения. Барометрическое давление равно 750 мм. рт. ст.

Ответ:  $d=0,0044$  кг/кг;  $h =20,4$  кДж/кг;  
 $t=9,32^\circ\text{C}$ ;  $\varphi=60\%$ .

280 Состояние атмосферного воздуха определяется следующими параметрами: барометрическое давление 750 мм рт. ст., температура  $15^\circ\text{C}$ , парциальное давление водяного пара по психрометру 9,5 мм рт. ст. Определить: относительную влажность, абсолютную влажность, плотность сухого воздуха, плотность пара, плотность смеси пара и воздуха, точку росы, газовую постоянную влажного воздуха, влагосодержание воздуха, энтальпию воздуха.

Ответ:  $\varphi=0,746$ ;  $\rho_{п}=9,9$  г/м<sup>3</sup>;  $\rho_{в}=1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 9,9$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho =1,2099$  кг/м<sup>3</sup>;  $t_p=10,5^\circ\text{C}$ ;  $R=289,4$  Дж/(кг·К);  
 $d = 0,00798$  кг/кг;  $h=35,1$  кДж/кг.

281 Температура влажного воздуха  $t = 25^\circ\text{C}$ , а температура точки росы  $t_p = 20^\circ\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха, энтальпию, абсолютную влажность воздуха, влагосодержание, парци-

альное давление водяного пара. При решении задачи использовать  $h$ - $d$ -диаграмму.

Ответ:  $\varphi = 75\%$ ;  $h = 62,8$  кДж/кг;

$\rho_n = 17,25$  г/м<sup>3</sup>;  $d=15$  г/кг;  $P_n = 18$  мм рт. ст.

282 Показания сухого и мокрого термометров:  $t_c=65^\circ\text{C}$  и  $t_m=50^\circ\text{C}$ . Определить состояние этого воздуха и его параметры. При решении использовать  $h$ - $d$ -диаграмму.

Ответ:  $\varphi = 53\%$ ;  $d = 81$  г/кг;  $h = 277$  кДж/кг;

$P_n = 85$  мм рт. ст.;  $t_p = 47,5^\circ\text{C}$ .

283 Воздух при начальной температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi_1 = 80\%$  подвергается охлаждению до температуры  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, которое надо отвести от воздуха на 1 кг выпавшей влаги. При решении использовать  $h$ - $d$ -диаграмму.

Ответ:  $q = 4550$  кДж/кг.

284 Состояние влажного воздуха задано следующими параметрами: температура  $25^\circ\text{C}$  и степень насыщения  $\psi = 0,7$ . При постоянном давлении  $755$  мм рт. ст. воздух подвергается охлаждению до конечной температуры  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Определить, сколько влаги выделится при охлаждении воздуха и сколько тепла необходимо отвести от 1 кг воздуха?

Ответ:  $6,5$  г/кг;  $q = - 31,4$  кДж/кг.

285 Определить количество силикагеля, служащего для поглощения паров воды из воздуха, которое необходимо загрузить в камеру сгорания, если объем камеры сгорания  $3$  м<sup>3</sup>. Консервация двигателя производилась при 60%-ной влажности и температуре окружающего воздуха  $30^\circ\text{C}$ .

Согласно техническим условиям двигатель должен храниться при 50%-ной влажности и температуре от - 20 до + 40° С. Поглощательная способность силикагеля 0,2 кг воды на 1 кг силикагеля.

Ответ:  $m = 0,263$  кг.

286 Газовый двигатель всасывает 500 м<sup>3</sup>/ч воздуха при температуре 25°С. Относительная влажность воздуха 0,4. Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

Ответ:  $G = 4,6$  кг/ч.

287 Наружный воздух, имеющий температуру 20°С и влагосодержание 6 г/кг, подогревается до температуры 45°С. Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ:  $\varphi_1 = 40\%$ ;  $\varphi_2 = 9,8\%$ .

288 Психрометр, установленный в сушильной камере, показывает температуру:  $t_c = 30^\circ\text{C}$  и  $t_m = 20^\circ\text{C}$ . Скорость движения воздуха 0,5 м/с. Определить состояние воздуха, если  $P_{\text{бар}} = 745$  мм рт. ст.

Ответ:  $\varphi = 40\%$ ;  $d = 11,5$  г/кг.

## 2 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Согласно 2-му закону термодинамики самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве возникает под действием разности температур и направлен в сторону уменьшения температуры. Закономерности переноса теплоты и количественные характеристики этого процесса являются предметом исследования теории теплообмена (теплопередачи). Теплопередача рассматривает процессы переноса теплоты в твердых, жидких и газообразных телах. Известно 3 способа переноса теплоты: теплопроводностью; конвекцией; излучением.

Часто перенос теплоты осуществляется одновременно различными способами – случай **сложного теплообмена**.

Сначала мы рассмотрим элементарные процессы теплообмена теплопроводностью, конвекцией и излучением, а затем - совместные процессы теплопередачи всеми видами теплообмена. Такое последовательное рассмотрение вопросов целесообразно и значительно упрощает изучение теории.

### 2.1 Теплопроводность

**Теплопроводность** – это процесс распространения теплоты между соприкасающимися телами или частями одного тела с различной температурой. Для осуществления теплопроводности необходимы два условия: контакт и разница температур.

Перенос теплоты теплопроводностью зависит от распределения температуры по объему тела. В общем виде температура зависит:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (187)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки;

$\tau$  – время.

Совокупность значений температуры во всех точках тела в данный момент времени называется **температурным полем**. Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется **изотермической**. Быстрее всего температура изменяется при движении в направлении, перпендикулярном изотермической поверхности. **Градиент температуры** – это векторная величина, направленная по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равная производной от температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} . \quad (188)$$

Количество теплоты ( $Q$ ), проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность ( $F$ ), называют **тепловым потоком**, обозначают  $Q^*$ , единицы измерения – ватт. Тепловой поток, приходящийся на  $1\text{ м}^2$  поверхности, называют удельным тепловым потоком (**плотностью теплового потока** или тепловой нагрузкой поверхности нагрева), обозначают  $q$ , единицы измерения – ватт на квадратный метр.

$$Q^* = \frac{Q}{\tau} \quad ; \quad q = \frac{Q}{\tau F} = \frac{Q^*}{\tau} . \quad (189)$$

Основной закон теплопроводности формулируется следующим образом: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры (закон Фурье):

$$q = - \lambda \text{ grad } t , \quad (190)$$

где  $\lambda$  - коэффициент пропорциональности, Вт/(м·К).

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называют **коэффициентом теплопроводности**. Он характеризует способность материала

проводить тепло. Значения коэффициентов приводятся в справочниках теплофизических свойств веществ (приложения К и Л). Величина коэффициента теплопроводности  $\lambda$  зависит от температуры, для большинства материалов эта зависимость линейная:

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + b t), \quad (191)$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_t$  – значение коэффициента теплопроводности соответственно при 0°С и при данной температуре  $t$ , Вт/(м·К);

$b$  – константа, определяемая экспериментально.

Зависимость изменения температуры тела от свойств тела и координат точки описывает **дифференциальное уравнение Фурье**:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (192)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\rho$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$c$ - теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Процесс теплоотдачи между поверхностью тела и окружающей средой описывается **уравнением Ньютона-Рихмана**:

$$q = \alpha (t_{cm} - t_j), \quad (193)$$

где  $q$  - плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{cm}$  – температура поверхности тела (стенки), К;

$t_j$  – температура окружающей среды (жидкости), К;

$\alpha$  - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Коэффициент теплоотдачи** характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он численно равен количеству теплоты, отдаваемой (или воспринимаемой) единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1 градус.

Различают **2 режима** распространения тепла в теле: установившийся (стационарный) режим – температурное поле тела не изменяется во времени и не установившийся (нестационарный) режим – температурное поле изменяется во времени.

Рассмотрим **частные случаи решения** дифференциального уравнения Фурье (192).

Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 1-го рода:

$$Q^* = \frac{\lambda}{\delta} F (t'_{ст} - t''_{ст}), \quad (194)$$

где  $\delta$  - толщина стенки, м;

$t'_{ст}$  и  $t''_{ст}$  – внутренняя и наружная температура поверхности стенки, град;

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Отношение  $\lambda/\delta$  называют тепловой проводимостью стенки, а обратную величину  $\delta/\lambda$  - тепловым или **внутренним термическим сопротивлением** стенки и обозначают  $R_{\lambda}$ .

Для любого числа слоев  $n$  формула (194) имеет вид

$$Q^* = \frac{F (t'_{ст} - t''_{ст})}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (195)$$

Величину  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  называют полным внутренним термическим сопротивлением многослойной стенки.

Теплопроводность через цилиндрическую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 1-го рода



$$Q^* = \frac{2\pi \lambda L (t_{ct}' - t_{ct}'')}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (196)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;

$L$  – длина трубы, м.

Для многослойной цилиндрической стенки уравнение для определения теплового потока будет иметь следующий вид:

$$Q^* = \frac{2\pi L (t_{ct}' - t_{ct}'')}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}. \quad (197)$$

Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 3-го рода

$$Q^* = \frac{F (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (198)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей, К.

**Коэффициент теплопередачи**  $k$  показывает количество теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю при разности температур между ними в 1 градус, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Уравнение для теплового потока (198) через произвольную плоскую стенку называют уравнением теплопередачи -

$$Q^* = F k (t_1 - t_2), \quad (199)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи произвольной плоской стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (200)$$

Теплопроводность через цилиндрическую стенку при стационарном режиме и граничных условиях 3-го рода

$$Q^* = \frac{\pi L (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (201)$$

Коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки или **линейный коэффициент теплопередачи**, Вт/(м·К),

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}.$$

В общем случае для многослойной цилиндрической стенки, имеющей  $n$  слоев,

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (202)$$

Уравнение для теплового потока -

$$Q^* = k_u \pi L (t_1 - t_2). \quad (203)$$

Величину, обратную линейному коэффициенту теплопередачи, называют **общим тепловым сопротивлением** цилиндрической стенки:

$$R_u = \frac{1}{k_u} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}.$$

Критический диаметр изоляции можно определить из уравнения

$$d_{кр} = d_{из} = \frac{2 \lambda_{из}}{\alpha_2}, \quad (204)$$

где  $\lambda_{кр}$  - коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К);

$\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d_{из}$  - наружный диаметр слоя изоляции, м.

Более точное выражение уравнения теплопередачи (199) имеет вид

$$Q^* = F k \Delta t_{CP}, \quad (205)$$

где  $\Delta t_{CP}$  - средняя разность температур между двумя теплоносителями или средний температурный напор, К.

Средний температурный напор определяется следующим образом:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (206)$$

где  $\Delta t_B$  и  $\Delta t_M$  - большая и меньшая разности температур на концах поверхности теплообмена.

Если отношение большей разности температур к меньшей не превышает двух, то с достаточной точностью вместо уравнения (206) можно применять приближенное уравнение

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2}.$$

Формулы (206) и (207) применяются при условии, что в теплообменнике значение коэффициента теплопередачи и произведение

массового расхода на теплоемкость для каждого теплоносителя можно считать постоянной по всей поверхности теплообмена.

При расчете теплообменного оборудования наряду с уравнением теплопередачи (205) используется уравнение теплового баланса:

$$G_1 C_1 \Delta t_1 = G_2 C_2 \Delta t_2 , \quad (207)$$

где  $G_1, G_2$  – массовый расход теплоносителей, кг/с;

$C_1, C_2$  – теплоемкость теплоносителей, Дж/(кг·К);

$\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  - перепад температуры теплоносителей, К.

Расчет процесса теплопроводности при нестационарном режиме мы не рассматриваем. Методики расчета приведены в специальной литературе [2, 3].

### Примеры решения задач

81 Определить толщину тепловой изоляции, выполненной из шлаковой ваты. Удельные потери теплоты через изоляционный слой составляют  $523 \text{ Вт/м}^2$ , температуры его поверхностей  $700$  и  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности шлаковой ваты

$$\lambda = 0,058 + 0,000145 t .$$

Решение:

Определим средний коэффициент теплопроводности шлаковой ваты:

$$\lambda_{\text{CP}} = 0,058 + 0,000145 \cdot \frac{700 + 40}{2} = 0,1102 \quad \text{Вт/(м} \cdot \text{К)} .$$

Из уравнения (194) определяем толщину слоя изоляции

$$\delta = \frac{\lambda_{\text{CP}} \Delta t}{q} = \frac{0,1102 \cdot (700 - 40)}{523} = 0,139 \text{ м} .$$

82 Определить тепловой поток, проходящий через единицу длины стенки камеры сгорания диаметром 180 мм, если толщина стенки 2,5 мм, коэффициент теплопроводности материала стенки 34,9 Вт/(м·К). Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равными соответственно 1200 и 600°С.

Решение:

Из условия задачи следует, что протекает процесс теплопроводности через цилиндрическую стенку, поэтому используем уравнение (196)

$$q_l = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,9 \cdot 1 \cdot (1200 - 600)}{\ln \frac{0,18 + 2 \cdot 0,0025}{0,18}} = 4,815 \cdot 10^6 \text{ Вт/м.}$$

83 Определить температуры на поверхностях соприкосновения слоев стенки камеры сгорания и на внешней поверхности, если диаметр камеры 190 мм, толщина защитного покрытия 1 мм и его коэффициент теплопроводности 1,15 Вт/(м·К), а толщина основной стенки 2 мм и ее коэффициент теплопроводности 372 Вт/(м·К). Тепловой поток, приходящийся на единицу длины, составляет 40750 Вт/м, температура на поверхности покрытия со стороны камеры 1200°С.

Решение:

Запишем уравнение для теплового потока через каждый слой двухслойной цилиндрической стенки (197):

$$Q^* = \frac{2 \pi L \lambda_{II} (t'_{CT} - t_{CII})}{\ln \frac{d + 2 \delta_{II}}{d}}; \quad Q^* = \frac{2 \pi L \lambda_{CT} (t_{CII} - t''_{CT})}{\ln \frac{d + 2 \delta_{II} + 2 \delta_{CT}}{d + 2 \delta_{II}}}.$$

Выразим из полученных уравнений температуры на поверхности соприкосновения слоев стенки камеры сгорания и на внешней поверхности

$$t_{\text{сн}} = t'_{\text{ст}} - \frac{q_l}{2 \pi \lambda_{\text{п}}} \ln \frac{d + 2 \delta_{\text{п}}}{d} = 1200 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,15} \ln \frac{0,19 + 2 \cdot 0,001}{0,19} = 609^\circ \text{C}.$$

$$\begin{aligned} t''_{\text{ст}} &= t_{\text{сн}} - \frac{q_l}{2 \pi \lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d + 2 \delta_{\text{п}} + 2 \delta_{\text{ст}}}{d + 2 \delta_{\text{п}}} = \\ &= 609 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 372} \ln \frac{0,192 + 2 \cdot 0,002}{0,192} = 608,6^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

84 По неизолированному трубопроводу диаметром 170/185 мм, проложенному на открытом воздухе, протекает вода со средней температурой 95°C, температура окружающего воздуха – 18°C. Определить потери теплоты с 1 м трубопровода и температуры внутренней и внешней поверхностей этого трубопровода, если коэффициент теплопроводности материала трубы равен 58,15 Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи воды стенке трубы - 1395 Вт/(м²·К) и трубы окружающему воздуху - 14 Вт/(м²·К).

Решение:

Тепловой поток рассчитаем по уравнению (201)

$$Q^* = \frac{3,14 \cdot 1 \cdot [95 - (-18)]}{\frac{1}{1395 \cdot 0,17} + \frac{1}{2 \cdot 58,15} \ln \frac{185}{170} + \frac{1}{14 \cdot 0,185}} = 907 \text{ Вт}.$$

Температуры внутренней и внешней поверхностей трубопровода определим из уравнений для теплового потока для каждой стадии теплопередачи:

$$t'_{\text{ст}} = t_1 - \frac{Q^*}{\pi L \alpha_1 d_1} = 95 - \frac{907}{3,14 \cdot 1 \cdot 1395 \cdot 0,17} = 93,8^\circ \text{C},$$

$$t''_{\text{ст}} = t_2 + \frac{Q^*}{\pi L \alpha_2 d_2} = -18 - \frac{907}{3,14 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 0,185} = 93,5^\circ \text{C}.$$

85 Алюминиевый провод диаметром 3 мм покрыт резиновой изоляцией толщиной 1,2 мм. Определить допустимую силу тока для этого провода при условии, что температура на внешней стороне изоляции 45°С, а максимальная температура на внутренней стороне изоляции не должна превышать 65°С. Коэффициент теплопроводности резины 0,175 Вт/(м·К); электрическое сопротивление алюминиевого провода составляет 0,00397 Ом/м.

Решение:

По формуле (197) определяем тепловой поток, проходящий через 1 м изоляции:

$$q_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (65 - 45)}{\frac{1}{0,175} \cdot \ln \frac{3 + 2 \cdot 1,2}{3}} = 37,3 \text{ Вт/м.}$$

Из формулы  $Q = I^2 R$  находим допустимую силу тока:

$$I = \sqrt{\frac{37,3}{0,00397}} = 96,95 \text{ А.}$$

86 Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду необходимо изолировать паропровод диаметром 44/50 мм. Целесообразно ли применять в качестве изоляции асбест, имеющий коэффициент теплопроводности 0,14 Вт/(м·К), если коэффициент теплоотдачи с внешней стороны изоляции в окружающую среду составляет 11,63 Вт/(м<sup>2</sup>·К)?

Решение:

По формуле (204) определим критический диаметр изоляции

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot 0,14}{11,63} = 0,024 \text{ м.}$$

Условие целесообразности применения изоляции при заданном диаметре трубы и заданном коэффициенте теплоотдачи

$$A_{\text{кр}} = \frac{d_{\text{кр}}}{d_2} \leq 1$$

в нашем случае выполняется, т.к.  $A_{\text{кр}}=0,48 < 1$ .

87 Выяснить ошибку в определении поверхности нагрева газо-водяного противоточного подогревателя от применения средней арифметической разности температур вместо более точной средней логарифмической. Газы в подогревателе охлаждаются от 500 до 200 °С, вода нагревается от 20 до 80 °С.

Решить ту же задачу для прямоточного подогревателя при тех же значениях температур газов и воды.

Решение:

Для противоточного подогревателя

$$\overset{\text{ГАЗЫ}}{500^\circ\text{C}} \rightarrow \overset{\text{ГАЗЫ}}{200^\circ\text{C}};$$

$$\overset{\text{ВОДА}}{80^\circ\text{C}} \leftarrow \overset{\text{ВОДА}}{20^\circ\text{C}}.$$

Определим разности температур на концах поверхности теплообмена:

$$\Delta t_{\text{Б}} = 420^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{\text{М}} = 180^\circ\text{C}.$$

Тогда среднеарифметический температурный напор

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{420 + 180}{2} = 300^\circ\text{C}.$$

Среднелогарифмический температурный напор (206):

$$\Delta t'_{\text{CP}} = \frac{420 - 180}{\ln \frac{420}{180}} = 283^\circ\text{C}.$$

При расчете по приближенной формуле поверхность подогревателя будет занижена на



$$1 - \frac{F}{F'} = 1 - \frac{\Delta t'_{CP}}{\Delta t_{CP}} = 1 - \frac{283}{300} = 0,056;$$

т. е. на 5,6%.

Для прямоточного подогревателя

$$500^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{ГАЗЫ}} 200^{\circ}\text{C};$$

$$20^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{ВОДА}} 80^{\circ}\text{C}.$$

Определим разности температур на концах поверхности теплообмена:

$$\Delta t_{\text{Б}} = 480^{\circ}\text{C}; \quad \Delta t_{\text{М}} = 120^{\circ}\text{C}.$$

Тогда среднеарифметический температурный напор:

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{480 + 120}{2} = 300^{\circ}\text{C}.$$

Среднелогарифмический температурный напор (206):

$$\Delta t'_{\text{CP}} = \frac{480 - 120}{\ln \frac{480}{120}} = 260^{\circ}\text{C}.$$

При расчете по приближенной формуле поверхность подогревателя будет занижена на

$$1 - \frac{F}{F'} = 1 - \frac{\Delta t'_{\text{CP}}}{\Delta t_{\text{CP}}} = 1 - \frac{260}{300} = 0,133;$$

т. е. на 13,3%.

### Задачи

289 Определить количество тепла, теряемое трубой за час, если внутри трубы протекает газ, а снаружи труба омывается воздухом. Средняя температура газа 800 °С, воздуха - 15 °С. Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубы 35 Вт/(м<sup>2</sup>·К), от стенки к воздуху -

5,8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Каковы температуры внутренней и наружной поверхности трубы, а также слоя, расположенного в 40 мм от оси трубы? Влиянием торцов трубы пренебречь. Труба стальная с коэффициентом теплопроводности 46,5 Вт/(м·К).

Ответ:  $Q = 2860$  Вт;

температуры: 591 °С, 590 °С, 585 °С.

290 Определить часовую потерю тепла паропроводом длиной 50 м. Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной 80 мм. По паропроводу протекает насыщенный пар, давление которого 30 ат. Внутренний диаметр паропровода 100 мм, наружный 108 мм. Температура окружающего воздуха 35 °С. Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке 465 Вт/(м<sup>2</sup>·К), от слоя изоляции к воздуху - 5,8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопроводности стали 52 Вт/(м·К), изоляции - 0,058 Вт/(м·К). Определить также температуру наружного слоя изоляции. Лучеиспусканием трубопровода пренебречь.

Ответ:  $Q = 3680$  Вт;  $t = 50$  °С.

291 Стальная труба диаметром 100/110 мм покрыта слоем асфальтовой изоляции. Найти критическую толщину слоя асфальта и соответствующую максимальную отдачу тепла с 3 погонных метров трубы, если по трубе протекает вода, температура 80 °С, коэффициент теплоотдачи 2093 Вт/(м<sup>2</sup>·К), снаружи труба омывается воздухом, температура 15 °С, коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к воздуху 10,5 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент теплопроводности стали 46,5 Вт/(м·К), асфальта - 0,66 Вт/(м·К).

Ответ:  $d_{кр} = 0,1265$  м;  $q_{max} = 710$  Вт.

292 Гладкая стальная труба воздухоподогревателя с внутренней стороны омывается дымовыми газами со средней температурой

320 °С, а снаружи - воздухом, причем он нагревается от 25 до 250 °С. Коэффициент теплопроводности стали 58 Вт/(м·К).

Определить: коэффициент теплопередачи, отнесенный к одному погонному и одному квадратному метру наружной поверхности трубы, и количество тепла, передаваемое трубой за 1 ч, если: наружный диаметр трубы 51 мм; внутренний диаметр трубы 48 мм; длина трубы 4 м; налет сажи внутри трубы  $\delta = 1$  мм, коэффициент теплопроводности стали 0,23 Вт/(м·К).

Ответ:  $k_T = 0,232$  Вт/(м·К);  $k = 9,15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q = 1069$  Вт.

293 Как велики будут ошибки в определении теплового потока, передаваемого трубой, и температуры наружного слоя трубы в задаче 292, если расчет проводить по формулам для плоской стенки, определяя ее поверхность по среднему диаметру?

Ответ: ошибки при определении: температуры - 1,93%, тепла - 1,74%.

294 Определить удельный тепловой поток, проходящий через стенку рабочей лопатки газовой турбины, если средние температуры поверхностей лопатки соответственно равны 650 и 630 °С, толщина стенки лопатки 2,5 мм, коэффициент теплопроводности 23,85 Вт/(м·К).

Ответ:  $q = 19070$  Вт/м<sup>2</sup>.

295 Определить тепловые потери на 1 м трубопровода, а также температуру внутренней и внешней поверхностей при условии, что трубопровод, рассматриваемый в примере 84, покрыт слоем изоляции толщиной 70 мм с коэффициентом теплопроводности 0,116 Вт/(м·К), а коэффициент теплоотдачи поверхности изоляции окружающей среде 9,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Ответ:  $q_1 = 162,5$  Вт/м;

$$t'_{\text{ст}}=94,3^{\circ}\text{C}; t''_{\text{ст}}= - 0,9^{\circ}\text{C}.$$

296 В трубчатом подогревателе требуется нагреть за 1 ч 1000 кг раствора с теплоемкостью 3,3 кДж/(кг·К). Нагрев ведется от 20 до 80° С конденсатом, поступающим в подогреватель, при температуре 120° С. Коэффициент теплопередачи равен 558 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Сравнить необходимые поверхности нагрева и найти часовой расход конденсата при устройстве подогревателя по прямоточной и противоточной схемам, считая, что тепловые потери отсутствуют. Конечная разность температур в подогревателе в обоих случаях должна быть 20° С.

Ответ: прямоточная схема:  $F = 2,01 \text{ м}^2$ ,  $G = 2400 \text{ кг/ч}$ ;

противоточная схема:  $F = 3,46 \text{ м}^2$ ,  $G=600 \text{ кг/ч}$ .

297 Во сколько раз увеличится термическое сопротивление стенки стального змеевика, свернутого из трубы диаметром 38 мм, толщиной 2,5 мм, если покрыть ее слоем эмали? Считать стенку плоской. Коэффициент теплопроводности эмали 1,05 Вт/(м·К).

Ответ: в 10 раз.

298 Паропровод длиной 40 м, диаметром 51 мм, толщиной 2,5 мм покрыт слоем изоляции толщиной 30 мм. Температура наружной поверхности изоляции 45°С, внутренней – 175°С. Определить количество тепла, теряемое паропроводом в час. Коэффициент теплопроводности изоляции 0,116 Вт/(м·К).

Ответ:  $Q^* = 48,6 \text{ кВт}$ .

299 Горячий раствор с температурой 106°С используется для подогрева холодного разбавленного раствора от 15 до 50°С. Концентрированный раствор охлаждается до 60°С. Определить температурный напор для: а) прямоточной и б) противоточной схем.

Ответ: а)  $\Delta t_{\text{CP}} = 50,5^{\circ}\text{C}$ ; б)  $\Delta t_{\text{CP}} = 36,8^{\circ}\text{C}$ .

300 Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорный кирпич -  $\delta=500$  мм,  $\lambda=1,16$  Вт/(м·К) и строительный кирпич -  $\delta=250$  мм,  $\lambda=0,58$  Вт/(м·К). Температура внутри печи  $1300^{\circ}\text{C}$ , температура окружающего пространства  $25^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от печных газов к стенке  $34,8$  Вт/( $\text{м}^2\cdot\text{K}$ ), коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху  $16,2$  Вт/( $\text{м}^2\cdot\text{K}$ ). Определить потери тепла с  $1$   $\text{м}^2$  поверхности стенки и температуру на грани между огнеупорным и строительным кирпичом.

Ответ:  $q=1340$  Вт/ $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{сл}}=684^{\circ}\text{C}$ .

301 Определить толщину тепловой изоляции, выполненной из: 1) альфоля и 2) шлаковой ваты. Удельные потери теплоты через изоляционный слой  $523$  Вт/ $\text{м}^2$ , температуры его поверхностей  $700$  и  $40^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности альфоля при толщине воздушных слоев  $10$  мм

$$\lambda = 0,0302 + 0,000085 t$$

и коэффициент теплопроводности шлаковой ваты

$$\lambda = 0,058 + 0,000145 t .$$

Ответ:  $\delta = 0,139$  м.

302 Определить тепловой поток через стенки картера авиадвигателя, если толщина стенок  $5,5$  мм, поверхность  $0,6$   $\text{м}^2$ , температура на внутренней поверхности картера  $75^{\circ}\text{C}$ , на наружной –  $68^{\circ}\text{C}$ , а средний коэффициент теплопроводности стенок  $175$  Вт/(м·К).

Ответ:  $Q^* = 133300$  Вт.

## 2.2 Конвективный теплообмен

Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется **конвективным теплообменом**. Естественная конвекция вызывается разностью удельных весов неравномерно нагретой среды, осуществляется за счет действия сил тяжести. Вынужденная конвекция осуществляется за счет перемещения жидкости или газа механическими устройствами.

Количество перенесенного тепла рассчитывается по формуле

$$Q = \alpha F \Delta t \tau = \alpha F (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) \tau, \quad (208)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  - температурный напор, К;

$t_{\text{ж}}$  – средняя температура жидкости или газа, °С;

$t_{\text{ст}}$  - средняя температура стенки, °С;

$\tau$  - время, с.

Одной из основных задач конвективного теплообмена является определение в конкретных условиях коэффициента теплоотдачи. Аналитическое определение коэффициента теплоотдачи, как правило, невозможно, т.к. его величина зависит от многих переменных: параметров процесса, физических констант, геометрических размеров и граничных условий. Коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам, которые составляются в критериальной форме по правилам теории подобия. Два процесса конвективного теплообмена считаются подобными, если подобны все параметры, характеризующие конвективный теплообмен.

Для упрощения процесса установления подобия используют безразмерные комплексы физических параметров - числа или **крите-**

**рии подобия.** Чисел подобия много. Для конвективного теплообмена используют следующие пять чисел подобия.

**Число Рейнольдса** характеризует режим течения жидкости или газа и выражает отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкостного трения:

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{w} \mathbf{l}}{\mathbf{\nu}}, \quad (209)$$

где  $w$  - средняя скорость жидкости или газа, м/с;

$l$  - характерный размер, м;

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

При числах Рейнольдса, меньших 2000, режим считается ламинарным, при значениях числа, больших 10000, – режим движения турбулентный; при значениях числа от 2000 до 10000 – режим переходный.

**Число Прандтля** устанавливает соотношение между толщиной динамического и теплового пограничных слоёв:

$$\mathbf{Pr} = \frac{\mathbf{\nu}}{\mathbf{a}}, \quad (210)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

**Число Нуссельта** характеризует интенсивность конвективного теплообмена между жидкостью (газом) и поверхностью твёрдого тела:

$$\mathbf{Nu} = \frac{\mathbf{\alpha} \mathbf{l}}{\mathbf{\lambda}}, \quad (211)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$l$  – характерный размер, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа или жидкости, Вт/(м·К).

**Число Грасгофа** характеризует интенсивность свободного конвективного теплообмена:

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (212)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  - коэффициент объемного расширения: для жидкостей  $\beta$  приведены в справочниках (приложение Л), для газов -  $\beta = 1/T$ ,  $1/ \text{К}$ ;

$l$  – характерный размер, м;

$\Delta t$  – разница температур частиц жидкости (газа);

$\nu$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

**Число Эйлера** характеризует отношение перепада давления к скоростному напору:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}, \quad (213)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на участке канала, Па;

$\rho$  - плотность жидкости (газа),  $\text{кг/м}^3$ ;

$w$  - скорость жидкости (газа), м/с.

При проектировании теплообменных аппаратов необходимо определить два параметра: коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и перепад давления  $\Delta P$ . Они входят в числа Нуссельта и Эйлера, т.е. это определяемые числа подобия. Числа Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля являются определяющими. **Уравнения подобия** – зависимость между определяемым числом подобия и определяющими числами подобия. Таким образом, при моделировании основной целью является нахождение уравнений:

$$Nu = f_1(Re, Pr, Gr); \quad Eu = f_2(Re, Pr, Gr). \quad (214)$$

Общее **уравнение подобия** для конвективного теплообмена имеет вид



$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{Pr}^m \text{Gr}^d \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (215)$$

где  $c$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $d$  – коэффициенты, которые определяются экспериментальными исследованиями.

В критериальных уравнениях множитель  $\left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}$  учитывает направление теплового потока отношением, при этом  $\text{Pr}$  – число Прандтля для жидкости (газа) при её температуре;  $\text{Pr}_{\text{CT}}$  – число Прандтля для жидкости (газа) при температуре стенки.

Физические параметры, входящие в формулы (209) – (213), должны быть взяты при определяющей температуре, которая указывается для каждого случая теплообмена, причем применяют следующие определяющие температуры:

$t_{\text{CT}}$  - средняя температура стенки;

$t_{\text{ж}}$  – средняя температура жидкости или газа;

$t_{\text{пл}}$  - средняя температура пограничного слоя (пленки), определяется, как среднее арифметическое между  $t_{\text{ж}}$  и  $t_{\text{CT}}$ .

Средняя температура жидкости (газа) приближенно может быть определена как среднее арифметическое между начальной и конечной температурой жидкости.

#### Теплообмен при течении теплоносителя в прямых трубах

При развитом **турбулентном режиме** ( $\text{Re} > 10000$ ) используют следующее уравнение:

$$\text{Nu} = 0,021 \varepsilon_1 \cdot \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (216)$$

где  $\varepsilon_1$  - поправочный коэффициент, учитывающий влияние отношения длины трубы  $L$  к ее диаметру  $d$  (табл. 2).

Таблица 2 - Поправочный коэффициент, учитывающий влияние отношения длины трубы L к ее диаметру d, при турбулентном режиме

Re	Отношение L/d				
	10	20	30	40	50 и более
10000	1,23	1,13	1,07	1,03	1
20000	1,18	1,10	1,05	1,02	1
50000	1,13	1,08	1,04	1,02	1
100000	1,10	1,06	1,03	1,02	1
100000	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Определяющей температурой является средняя температура жидкости или газа. Характерным размером l является: для круглой трубы – внутренний диаметр трубы d; для трубы произвольной формы – эквивалентный диаметр  $d_{\text{экв}}$ ,

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 F}{\Pi}; \quad (217)$$

F – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;

Π – полный периметр сечения, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене, м.

Для газов формула (216) упрощается, т.к. в этом случае критерий Pr является практически постоянной величиной, не зависящей от температуры, Pr = 0,67...1,0 (определяется количеством атомов в молекуле):

$$Nu = 0,018 \varepsilon_1 Re^{0,8}. \quad (218)$$

При теплообмене в **изогнутых трубах** (змеевиках) вследствие центробежного эффекта в поперечном сечении трубы возникает вторичная циркуляция, наличие которой приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. Поэтому коэффициент теплоотдачи, полученный

по уравнениям (216) или (218), следует умножить на поправочный коэффициент  $\epsilon_{3M}$  :

$$\epsilon_{3M} = 1 + 3,54 \frac{d}{D}, \quad (219)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;

$D$  – диаметр спирали змеевика, м.

При **ламинарном режиме течения** теплоносителя ( $Re < 2000$ ) в прямых трубах используют следующее уравнение:

$$Nu = 0,15 \epsilon_1 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (220)$$

Поправочный коэффициент  $\epsilon_1$ , учитывающий влияние отношения длины трубы  $L$  к ее диаметру  $d$ , определяют по табл. 3.

Таблица 3 - Поправочный коэффициент для расчета теплообмена в трубах длиной менее 50 диаметров

L/d	1	4	5	10	15	20	30	40	50
$\epsilon_1$	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02	1

При расчете критерия  $Gr$  по формуле (220) величина  $\Delta t$  характеризует разность температур жидкости (газа) и стенки.

Если теплоносителем является газ, формула (220) упрощается:

$$Nu = 0,13 \epsilon_1 Re^{0,33} Gr^{0,1}. \quad (221)$$

При вертикальном расположении трубы вводится поправка 0,85 при совпадении свободного и вынужденного движений и поправка 1,15 - при противоположном направлении.

Если теплоносителем является жидкость с большим коэффициентом вязкости, то свободная конвекция не оказывает влияния на теплообмен. Уравнение подобия для вязкостного режима –

$$\text{Nu} = 0,15 \epsilon_1 \text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}. \quad (222)$$

Формула справедлива при отношении  $L/d > 50$ . Для труб, имеющих длину  $L < 50d$ , значение коэффициента теплоотдачи, полученное из данной формулы, следует умножить на поправочный коэффициент  $\epsilon_1$  (табл. 3).

Теплоотдача при **переходном режиме движения** ( $2000 < \text{Re} < 10000$ ) зависит от большого количества величин, трудно поддающихся учёту, и поэтому не может быть надёжно описана одним уравнением подобия. В этом случае используют комплекс  $K_o$ :

$$K_o = \text{Nu} \text{Pr}^{-0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{-0,25}. \quad (223)$$

Расчет рекомендуется производить по графику (рис. 16).

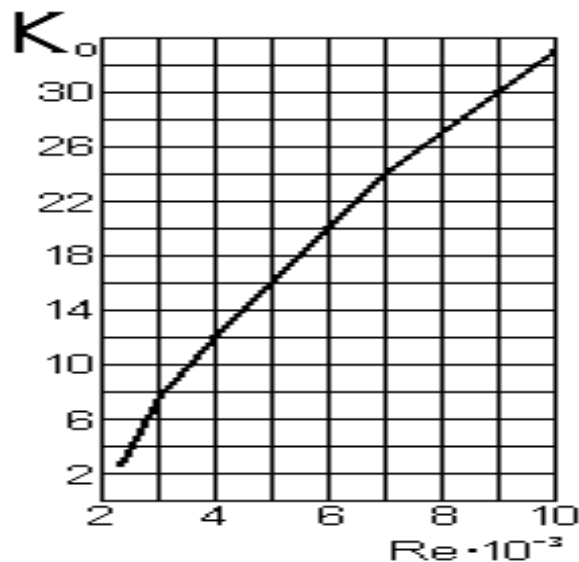


Рисунок 16 – Зависимость величины комплекса  $K_o$  от критерия Рейнольдса при переходном режиме

Теплоотдача при поперечном обтекании потоком одиночной гладкой трубы описывается следующими уравнениями:

при  $Re = 5 \dots 1000$  –

$$Nu = 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (224)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$Nu = 0,43 Re^{0,5}, \quad (225)$$

при  $Re = 1000 \dots 200000$  -

$$Nu = 0,25 Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (226)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$Nu = 0,216 Re^{0,6}, \quad (227)$$

В формулах (224) – (227) характерным размером является наружный диаметр трубы, определяющей температурой – средняя температура жидкости (газа).

Теплоотдача при поперечном обтекании потоком коридорного пучка труб для третьего и последующих рядов описывается следующим уравнением:

$$Nu = 0,23 \epsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (228)$$

При поперечном обтекании потоком шахматного пучка труб для третьего и последующих рядов уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,41 \epsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (229)$$

Значение коэффициента  $\epsilon_{\varphi}$ , учитывающего влияние угла атаки  $\varphi$ , (угол между направлением основного потока и радиусом, который соединяет точку на поверхности трубы с центром трубы) приведено в табл. 4.

Таблица 4 - Поправочный коэффициент  $\epsilon_{\varphi}$  для расчета теплообмена при поперечном обтекании пучка труб

$\varphi$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\epsilon_{\varphi}$	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Формулы (228) – (229) справедливы для любых жидкостей и газов при значениях  $Re = 200...200000$ .

Значение коэффициента теплоотдачи для труб первого ряда пучка находится путем умножения коэффициента теплоотдачи, полученного по уравнениям (228) – (229), на коэффициент  $k=0,6$ . Для труб второго ряда пучка при коридорном их расположении  $k=0,9$ ; а при шахматном расположении -  $k=0,7$ . Средняя величина коэффициента теплоотдачи определяется с учетом вклада каждого ряда труб, т.е. с учетом поверхности теплообмена. При достаточно большом числе рядов коэффициент теплоотдачи пучка труб равен коэффициенту теплоотдачи для третьего и последующих рядов - (228), (229).

При **вынужденном движении потока вдоль плоской стенки** коэффициент теплоотдачи определяют по следующим уравнениям:

при  $Re > 100000$  –

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (230)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$\text{Nu} = 0,032 \text{ Re}^{0,8}, \quad (231)$$

при  $\text{Re} < 100000$  -

$$\text{Nu} = 0,76 \text{ Re}^{0,5} \text{ Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{CT}}} \right)^{0,25}, \quad (232)$$

если теплоноситель - воздух (газ) -

$$\text{Nu} = 0,66 \text{ Re}^{0,5}. \quad (233)$$

В формулах (230) – (233) характерным размером является размер теплоотдающей стенки по направлению движения потока, определяющей температурой – начальная температура потока. Если направление потока - под углом к поверхности стенки, вводится коэффициент  $\epsilon_{\varphi}$ , учитывающий влияние угла атаки  $\Phi$  (табл. 4).

**Теплообмен при свободном движении** в неограниченном объеме может быть рассчитан двумя способами.

**1-й способ** не учитывает направление теплового потока. Уравнение подобия имеет следующий вид:

$$\text{Nu} = C (\text{Gr Pr})^n, \quad (234)$$

где  $C$ ,  $n$  – коэффициенты, зависящие от величины комплекса  $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$  (табл. 5).

Таблица 5 -Значения коэффициентов в уравнении (234)

Gr·Pr	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	$> 2 \cdot 10^7$
C	1,18	0,54	0,135
n	0,125	0,25	0,33

Физические константы, входящие в состав чисел подобия, определяют по средней температуре пленки  $t = 0,5 (t_{\text{ж}} + t_{\text{CT}})$ . В качестве

определяющего размера приняты: для горизонтальных труб и шаров - их диаметр, для плит, пластин, вертикальных труб – высота, для горизонтальных плит – размер меньшей стороны.

При значении  $(Gr \cdot Pr) < 1$  критерий Нуссельта практически остается неизменным и равным 0,5.

Для расчета теплообмена от горизонтальной плиты, обращенной греющей стороной вверх, значение коэффициента теплоотдачи увеличивают на 30%, если греющая сторона обращена вниз, то уменьшают на 30%.

Теплоотдача наклонных плит рассчитывается по той же формуле (234) с введением поправки  $(\cos \varphi)^{\pm 0,25}$ . За определяющий принимается размер стороны плиты, ориентированный под углом  $\varphi$  к нормали.

**2-й способ** учитывает направление теплового потока. Уравнение подобия имеет следующий вид:

$$Nu = C' (Gr Pr)^{n'} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (235)$$

где  $c'$ ,  $n'$  – коэффициенты, зависящие от величины комплекса  $Gr \cdot Pr$  и типа теплоотдающей поверхности.

Определяющей температурой является средняя температура окружающей среды.

При ламинарном движении около горизонтальных труб (при  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$ ) рекомендуется формула

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (236)$$

Характерным размером является диаметр трубы.



Для вертикальных поверхностей высотой  $h$  (трубы, пластины) формула (235) имеет вид:

при ламинарном режиме –  $10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$ ,

$$Nu = 0,76 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (236a)$$

при турбулентном режиме –  $(Gr \cdot Pr) > 10^9$ ,

$$Nu = 0,15 (Gr \cdot Pr)^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}. \quad (236b)$$

Характерным размером в данном случае является высота.

Естественный теплообмен может происходить и в ограниченном объеме. В этом случае среднюю плотность теплового потока  $q$  между поверхностями, разделенными прослойкой газа или жидкости толщиной  $\delta$ , можно рассчитать, как в случае переноса тепла теплопроводностью через плоскую стенку [см. формулу (194)]:

$$q = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (237)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий конвективный перенос;

$t_1$  и  $t_2$  – большая и меньшая температуры ограждающих поверхностей.

При  $(Gr \cdot Pr) < 10^3$  естественную конвекцию можно не учитывать, считая  $\lambda_{\text{э}} = \lambda$ . При  $(Gr \cdot Pr) > 10^3$  эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле  $\lambda_{\text{э}} = \epsilon_K \lambda$ . Величину поправки на конвекцию  $\epsilon_K$  определяют в зависимости от величины  $(Gr \cdot Pr)$ :

$$\text{при } 10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^6 - \quad \epsilon_K = 0,105 (Gr \cdot Pr)^{0,3}; \quad (238)$$

$$\text{при } 10^6 < (Gr \cdot Pr) < 10^{10} - \quad \epsilon_K = 0,40 (Gr \cdot Pr)^{0,2}. \quad (239)$$

Приближенно вместо формул (238), (239) можно пользоваться зависимостью

$$\epsilon_K = 0,18 (Gr Pr)^{0,25}. \quad (240)$$

Определяющий размер при расчете числа Gr – толщина прослойки  $\delta$ , определяющая температура – средняя температура поверхностей.

Расчет процесса теплоотдачи с изменением агрегатного состояния более сложен, рекомендуемые методы расчета приведены в специальной литературе [1-3].

### Примеры решения задач

88 В вертикальной трубе квадратного сечения ( $a=50$  мм), высотой 6 м движется снизу вверх воздух. Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубы, если средняя скорость воздуха 1,0 м/с, температура воздуха на входе  $190^\circ\text{C}$ , на выходе -  $50^\circ\text{C}$ , средняя температура стенки  $40^\circ\text{C}$ .

Решение:

Режим движения определяем по величине числа Рейнольдса – уравнение (209). Коэффициент кинематической вязкости воздуха находим при определяющей температуре, равной средней температуре воздуха (приложение К). Эквивалентный диаметр определяем по уравнению (217):

$$t_B = \frac{190 + 50}{2} = 120^\circ\text{C}; \quad \nu = 25,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 a^2}{4 a} = a = 0,05 \text{ м};$$

$$Re = \frac{1,0 \cdot 0,05}{25,45 \cdot 10^{-6}} = 1965.$$

Режим движения воздуха ламинарный. Для расчета выбираем формулу (221) - процесс теплообмена при ламинарном движении воздуха в трубе. При этом необходимо учесть поправку на относительную длину трубы и на вертикальное расположение трубы. Первая поправка (берется по табл. 3 при  $L/d=6/0,05=120$ ) равна 1. Вторая поправка равна 1,15, так как воздух движется снизу вверх и при этом охлаждается.

Критерий Грасгофа рассчитываем по уравнению (212):

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{120 + 273} \cdot 0,05^3 \cdot (120 - 40)}{(25,45 \cdot 10^{-6})^2} = 3,8 \cdot 10^5.$$

По формуле (221) для горизонтальной трубы рассчитаем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,13 \cdot 1 \cdot 1965^{0,33} \cdot (3,8 \cdot 10^5)^{0,1} = 5,74.$$

Коэффициент теплопроводности воздуха находим при определяющей температуре (приложение К). Тогда коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_3} = \frac{5,74 \cdot 3,338 \cdot 10^{-2}}{0,05} = 3,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для вертикальной трубы с учетом поправки

$$\alpha = 1,15 \cdot 3,87 = 4,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

89 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при течении воды в трубе диаметром 40 мм, длиной 3 м со скоростью 1 м/с, если средняя температура воды 80°C, а температура стенки 65°C.

Решение:

Определим режим течения воды в трубе.

Физические параметры воды при определяющей температуре, равной 80°C (приложение Л):

$$\lambda = 67,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \text{Pr} = 2,21.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки 65°C -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 2,74$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209)

$$\text{Re} = \frac{1 \cdot 0,04}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1,095 \cdot 10^5 > 10^4.$$

Режим движения турбулентный, поэтому выбираем критериальное уравнение (216):

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot (1,095 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 2,21^{0,43} \cdot \left(\frac{2,21}{2,74}\right)^{0,25} = 616.$$

Определяем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d} = \frac{616 \cdot 67,5 \cdot 10^{-2}}{0,04} = 10400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Так как отношение  $L/d = 3/0,04 = 75$ , то поправка по табл. 2 равна 1.

Тепловой поток определяем по уравнению (208):

$$Q^* = 10400 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3 \cdot (80 - 65) = 58800 \text{ Вт}.$$

90 Как изменятся значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока, если труба изогнута в виде змеевика диаметром 1000 мм, а остальные условия, как в задаче 89.

Решение:

Для изогнутых труб коэффициент теплоотдачи, полученный для прямых труб, умножают на поправочный коэффициент – уравнение (219):

$$\alpha_{\text{зм}} = \alpha \varepsilon_{\text{зм}} = 10400 \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{0,04}{1}\right) = 11880 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Тепловой поток соответственно равен

$$Q^* = 11880 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3 \cdot (80 - 65) = 67200 \text{ Вт.}$$

91 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на единицу длины в поперечном потоке воздуха для трубы диаметром 30 мм, если температура ее поверхности 80°C, температура воздуха 20°C и скорость 5 м/с.

Решение:

Физические параметры воздуха при определяющей температуре, равной 20°C (приложение К):

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}; \quad \text{Pr} = 0,703.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки 80°C -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 0,692$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209):

$$\text{Re} = \frac{5 \cdot 0,03}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 9,96 \cdot 10^3.$$

Для расчета выбираем формулу (227) - процесс теплообмена при поперечном обтекании одиночной трубы при  $\text{Re} > 10^3$ :

$$\text{Nu} = 0,216 \cdot (9,96 \cdot 10^3)^{0,6} = 55,2.$$

Коэффициент теплоотдачи соответственно равен:

$$\alpha = \frac{55,2 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{0,03} = 47,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловой поток на единицу длины трубы

$$q_1 = 47,7 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot (80 - 20) = 270 \text{ Вт/м.}$$

92 Определить средний коэффициент теплоотдачи для десятирядного коридорного пучка, обтекаемого поперечным потоком воды,

если внешний диаметр труб в пучке 25 мм, средняя скорость в узком сечении 0,7 м/с; средняя температура воды 50°C и средняя температура поверхности труб 85°C.

Решение:

При коридорной схеме расположения труб используем уравнение (228). Физические параметры воды при определяющей температуре, равной 50°C (приложение Л):

$$\lambda = 64,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 3,54.$$

Критерий  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  находим по тому же приложению, но при температуре стенки 85°C -  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 2,13$ .

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209)

$$\text{Re} = \frac{0,7 \cdot 0,025}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 31475.$$

Коэффициент, учитывающий влияние угла атаки в соответствии с табл. 4, равен 1. Тогда критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,23 \cdot 31475^{0,65} \cdot 3,54^{0,33} \cdot \left(\frac{3,54}{2,13}\right)^{0,25} = 332.$$

Коэффициент теплоотдачи для третьего и последующих рядов труб

$$\alpha_3 = \frac{332 \cdot 64,8 \cdot 10^{-2}}{0,025} = 8605 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Средний коэффициент теплоотдачи для всего пучка труб

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot (0,6 \alpha_3 + 0,9 \alpha_3 + (n - 2) \alpha_3) = 8175 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

93 Гладкая плита длиной 1,5 м и шириной 1 м обдувается продольным потоком воздуха со скоростью 5 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отданный плитой воздуху, если

температура поверхности плиты 110°C, а температура обдувающего потока воздуха 20°C.

Решение:

Физические параметры воздуха при температуре 20°C (приложение К):

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,703.$$

Значение критерия Рейнольдса находим по уравнению (209):

$$\text{Re} = \frac{5 \cdot 1,5}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 4,98 \cdot 10^5.$$

Так как  $\text{Re} > 10^5$  выбираем уравнение (231):

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot (4,98 \cdot 10^5)^{0,8} = 1155.$$

Коэффициент теплоотдачи и тепловой поток соответственно равны:

$$\alpha = \frac{1155 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad Q^* = 20 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot (110 - 20) = 2700 \text{ Вт}.$$

94 Определить коэффициент теплоотдачи вертикальной стенки высотой 2 м воздуху, если средняя температура стенки 120°C, а температура воздуха вдали от стенки 20°C.

Решение:

Теплоотдача при свободном движении рассчитывается по формуле (234). Определяющая температура равна

$$t = \frac{120 + 20}{2} = 70^\circ \text{C}.$$

Физические параметры воздуха при определяющей температуре 70°C (приложение К):

$$\lambda = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 20,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,694; \quad \beta = \frac{1}{70 + 273} = \frac{1}{343}.$$

Определим значение произведения критерия Грасгофа и Прандтля

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{9,81 \cdot 2^3 \cdot (120 - 20)}{343 \cdot (20,02 \cdot 10^{-6})^2} 0,694 = 39,55 \cdot 10^9.$$

При таком значении комплекса коэффициенты в уравнении (234) равны – табл. 5:  $C=0,135$ ;  $n=0,33$ .

Таким образом,

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (39,55 \cdot 10^9)^{0,33} = 460; \quad \alpha = \frac{460 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2}}{2} = 6,82 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

### Задачи

303 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при движении воздуха в трубе диаметром 56 мм длиной 2 м со скоростью 5 м/с, если средняя температура воздуха 120°C, а средняя температура стенки трубы 100°C.

Ответ:  $\alpha = 19,14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 135 \text{ Вт}$ .

304 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при движении воды в трубе диаметром 8 мм длиной 360 мм, если расход воды составляет 108 л/ч, средняя температура воды 50°C, а средняя температура стенки трубы 30°C.

Ответ:  $\alpha = 3660 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 663 \text{ Вт}$ .

305 Как изменится значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном и ламинарном течениях жидкости в трубе, если диаметр трубы увеличить соответственно в 2, 3 и 4 раза, сохраняя температуры и скорости движения постоянными?



Ответ: при турбулентном режиме  $\alpha$  уменьшится соответственно в 1,15; 1,25 и 1,32 раза; при ламинарном режиме – в 1,595; 2,08 и 2,56 раза.

306 Как изменится значение коэффициента теплоотдачи при турбулентном и ламинарном течениях жидкости в трубе, если скорости движения увеличить соответственно в 2, 3 и 4 раза, сохраняя диаметры и температуры постоянными?

Ответ: при турбулентном режиме  $\alpha$  увеличится соответственно в 1,74; 2,41 и 3,03 раза; при ламинарном режиме – в 1,257; 1,437 и 1,58 раза.

307 По щелевому каналу 3 x 90 мм длиной 3 м протекает вода со скоростью 2 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки канала к воде, если средняя температура воды по длине канала 50°C, а средняя температура стенки по длине канала 110°C.

Ответ:  $\alpha = 14000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 4,68 \cdot 10^5 \text{ Вт}$ .

308 По индукционной катушке радиоэлектронного устройства, выполненного в виде змеевика из трубки с внутренним диаметром трубки 10 мм, протекает охлаждающая вода со скоростью 0,8 м/с. Определить температуру воды на выходе из трубки змеевика, если температуру воды на входе в змеевик 16°C, средняя температура стенки змеевика 70°C, число витков 45, диаметр витков 250 мм. Потери теплоты в окружающую среду не учитывать.

Ответ:  $t = 81^\circ\text{C}$ .

309 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенок канала атомного реактора, охлаждаемого водой, если диаметр канала 9 мм, его длина 1,6 м, средняя скорость воды 4 м/с, тем-

пература воды на входе в канал  $155^{\circ}\text{C}$ , на выходе -  $265^{\circ}\text{C}$ , а средняя температура стенки трубы  $270^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 31100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 8450 \text{ Вт}$ .

310 Плоская тонкая пластина длиной  $l = 2,5 \text{ м}$  омывается потоком воздуха (вдоль длины) со скоростью  $3 \text{ м/с}$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Определить характер пограничного слоя и его толщину на расстоянии от передней кромки пластины  $x=0,2 l$ ;  $x=0,5l$ ;  $x=l$ .

Ответ:

311 Плоская стенка длиной  $1,5 \text{ м}$  и шириной  $1 \text{ м}$  омывается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока соответственно равны  $4 \text{ м/с}$  и  $20^{\circ}\text{C}$ ; температура поверхности пластины  $50^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный пластиной воздуху.

Ответ:  $\alpha = 6,47 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 291 \text{ Вт}$ .

312 Тонкая пластина длиной  $2 \text{ м}$  и шириной  $0,5 \text{ м}$  с обеих сторон омывается продольным потоком воды со скоростью  $5 \text{ м/с}$ , температура набегающего потока  $10^{\circ}\text{C}$ ; средняя температура поверхности пластины  $50^{\circ}\text{C}$ . Определить средний по длине коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, переданный пластиной воде.

Ответ:  $\alpha = 1840 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 147200 \text{ Вт}$ .

313 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в условиях примера 91, если скорость воздуха увеличить в 3 и 5 раз?

Ответ: увеличится в 1,93 и 2,637 раз.

314 Железный электропровод диаметром  $10 \text{ мм}$  охлаждается поперечным потоком воздуха, скорость и средняя температура которого соответственно равны  $2 \text{ м/с}$  и  $15^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи поверхности провода воздуху и допустимую силу тока в электропроводе при условии, что температура провода не должна

превышать 95°C. Удельное электрическое сопротивление провода  $\rho = 0,098 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Ответ:  $\alpha = 42,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 294 \text{ А}$ .

315 Решить задачу 314 при условии, что скорость воздуха уменьшится в 2 раза, а другие величины останутся без изменения.

Ответ:  $\alpha = 28,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 238,5 \text{ А}$ .

316 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и допустимая сила тока в условиях задачи 314, если воздух омывает электропровод под углом атаки 50°, а все другие параметры останутся без изменения.

Ответ:  $\alpha = 37,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 276 \text{ А}$ .

317 Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на 1 м трубы, омываемой поперечным потоком воды, если наружный диаметр трубы 20 мм, температура ее поверхности 60°C, температура воды 20°C и ее скорость 0,8 м/с.

Ответ:  $\alpha = 6500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q = 16350 \text{ Вт}/\text{м}$ .

318 Определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в воздухонагревателе, состоящем из 11 рядов с числом труб 83, расположенных в шахматном порядке. Поток воздуха омывает этот пучок под углом атаки 70° со скоростью в наиболее узком месте 8 м/с. Диаметр и длина труб соответственно равны 33 мм и 3 м; средняя температура поверхности труб 430°C, средняя температура воздуха 350°C.

Ответ:  $\alpha = 75,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Вт}$ .

319 Как изменится коэффициент теплоотдачи для условий примера 92, если трубы в пучке расположены в шахматном порядке?

Ответ:  $\alpha = 1005 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

320 Определить коэффициент теплоотдачи от горизонтальной плиты шириной 1 м длиной 3 м, если теплоотдающая поверхность обращена вниз и температура ее  $125^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха вдали от плиты  $15^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 4,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

321 Определить коэффициент теплоотдачи для условий задачи 320, если теплоотдающая поверхность плиты обращена вверх.

Ответ:  $\alpha = 9,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

322 Витковый электронагреватель из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм имеет температуру  $500^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи на поверхности проволоки и силу тока, проходящую через электронагреватель, если температура окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ , а удельное сопротивление проволоки  $\rho = 1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Ответ:  $\alpha = 63,46 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $I = 2,92 \text{ А}$ .

323 Определить коэффициенты теплоотдачи и удельные потери теплоты с двух горизонтально расположенных паропроводов диаметрами 200 и 100 мм, если температуры их стенок одинаковы и равны  $310^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха вдали от паропровода  $26^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha_1 = 8,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q_1 = 2340 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $\alpha_2 = 9,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $q_2 = 2610 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

324 Определить тепловые потери от стенки размером 1 х 2 м, установленной по большему размеру под углом  $60^{\circ}$  к вертикали, если температура теплоотдающей поверхности, обращенной вверх,  $80^{\circ}\text{C}$ , а температура воздуха  $10^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha_{\varphi} = 7,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $Q^* = 1075 \text{ Вт}$ .

325 Как изменятся коэффициент теплоотдачи и тепловые потери, если для условий задачи 324 теплоотдающая поверхность об-

ращена вниз под тем же углом к вертикали, а все другие параметры остаются без изменения?

Ответ:  $\alpha_{\phi} = 5,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 758 \text{ Вт}$ .

326 Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и тепловой поток на единицу длины цилиндрической воздушной прослойки толщиной 20 мм, если температура горячей и холодной поверхностей соответственно равны 80 и 20°C, а средний диаметр прослойки 100 мм.

Ответ:  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = 9,64 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $q_l = 90,7 \text{ Вт}/\text{м}$ .

327 Определить, при какой толщине водяной прослойки в ограниченном пространстве влиянием конвекции можно пренебречь, т.е. передача теплоты от горячей стенки к холодной будет обуславливаться только теплопроводностью жидкости. Температура горячей поверхности 14°C, температура холодной поверхности 6°C.

Ответ:  $\delta = 0,15 \text{ мм}$ .

328 Для условий задачи 327 определить толщину воздушной прослойки.

Ответ:  $\delta = 10,1 \text{ мм}$ .

329 Для обогрева используют горизонтальную трубу, в которой протекает горячая вода. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если диаметр трубы 0,1 м, длина 10 м, температура поверхности трубы 85°C, температура воздуха 20°C.

Ответ:  $\alpha = 6,93 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q^* = 1414 \text{ Вт}$ .

## 2.3 Лучистый теплообмен

Теплообмен **излучением** (лучистый теплообмен) свойственен всем телам, температура которых не равна абсолютному нулю.

Энергия, излучаемая всем телом по всем направлениям и длинам волн в единицу времени, называется **интегральным излучением**, обозначается  $Q^*$  и измеряется в ваттах.

Интегральное излучение, приходящееся **на единицу поверхности**, называется **плотностью** интегрального излучения, обозначается  $E$  и измеряется в ваттах на квадратный метр.

**Интенсивность интегрального излучения** – это отношение плотности интегрального излучения к длине волны, Вт/м<sup>3</sup>:

$$I = \frac{Q}{F \lambda} = \frac{E}{\lambda}. \quad (241)$$

Все тела не только излучают энергию, но и поглощают, отражают и пропускают через себя падающие лучи от другого тела:

$$A + R + D = 1, \quad (242)$$

где  $A$  - поглотительная способность тела, это отношение энергии, поглощенной телом, ко всей падающей энергии, величину  $A$  называют коэффициентом поглощения;

$R$  - отражательная способность тела, это отношение энергии, отраженной телом, ко всей падающей энергии, величину  $R$  называют коэффициентом отражения;

$D$  - коэффициент пропускания, характеризует способность тела пропускать энергию излучения.

**Закон Планка:** интенсивность излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависит от температуры и длины волны:

$$I_{s\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (243)$$

где  $I_{s\lambda}$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>3</sup>;

$C_1, C_2$  – постоянные Планка;

$\lambda$  – длина волны, м;

$T$  – абсолютная температура, К;

$e$  – основание натурального логарифма.

Длина волны  $\lambda$  в микрометрах, отвечающая максимальному значению интенсивности излучения, определяется **законом смещения Вина**:

$$\lambda_{\max} = 2,9 / T, \quad (244)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К.

**Закон Стефана – Больцмана**: плотность интенсивности излучения абсолютно черного тела ( $E_s$ ) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_s = \sigma T^4, \quad (245)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>).

Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана обычно записывают в виде

$$E_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (246)$$

где  $C_s = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана – Больцмана для реальных тел имеет следующий вид:

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 = C_s \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (247)$$

где  $C$  – коэффициент излучения реального тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\epsilon$  - степень черноты реального тела (приложение Н).

**Закон Кирхгофа:** отношение энергии излучения к коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и равно энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

**Закон Ламберта:** максимальное излучение  $E_n$  имеет место в направлении нормали к поверхности; количество энергии, излучаемой под углом  $\varphi$  к нормали,  $E_\varphi$  пропорционально косинусу угла  $\varphi$ :

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi. \quad (248)$$

При расчете лучистого теплообмена обычно рассматривается 2 случая: теплообмен между двумя параллельными поверхностями и теплообмен между телами, когда одно из них находится внутри другого.

Плотность лучистого потока между параллельными поверхностями, Вт/м<sup>2</sup>,

$$q = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \epsilon_{\text{пр}} C_s \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (249)$$

где  $C_{\text{пр}}$  - приведенный коэффициент излучения системы тел;

$\epsilon_{\text{пр}}$  - приведенный коэффициент черноты системы тел.

Приведенный коэффициент излучения рассчитывают по формуле

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 - 1/C_s}, \quad (250)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_s$ - коэффициенты излучения 1-го, 2-го и абсолютно черного тела.

Приведенный коэффициент черноты системы тел



$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (251)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - коэффициенты черноты 1-го, 2-го тел.

Тепловой поток между телами, когда одно из них (площадь поверхности  $F_1$ ) находится внутри другого (площадь поверхности  $F_2$ ), определяют по формуле

$$Q^{\bullet} = \frac{F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1/C_1 + F_1 (1/C_2 - 1/C_s)/F_2} = \frac{C_s F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1/\varepsilon_1 + F_1 (1/\varepsilon_1 - 1)/F_2}. \quad (252)$$

В этом случае приведенная степень черноты системы тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + F_1 (1/\varepsilon_2 - 1)/F_2} \quad (253)$$

или приведенный коэффициент излучения системы тел

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{1/C_1 + F_1 (1/C_2 - 1/C_s)/F_2}. \quad (254)$$

Если 1-я поверхность мала по сравнению со 2-й поверхностью, то выражение  $F_1/F_2$  приближается к нулю, а уравнение теплообмена принимает вид:

$$Q = C_1 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (255)$$

Теплообмен между двумя произвольно расположенными телами может быть рассчитан по формуле

$$Q = \varphi \varepsilon_{\text{пр}} C_s F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (256)$$

где  $\varphi$  - коэффициент облученности тела, учитывающий долю излучения первого тела, которая воспринимается вторым; приводится в

справочниках или рассчитывается, например для круглых пластин (диаметром  $d$ , расположенных на расстоянии  $h$ ), по формуле

$$\varphi = \left[ \frac{h}{d} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right]^2. \quad (257)$$

В приближенных расчетах величину приведенного коэффициента степени черноты ( $\epsilon_{пр}$ ) допустимо рассчитывать по формуле

$$\epsilon_{пр} = \epsilon_1 \epsilon_2. \quad (258)$$

Для уменьшения передачи теплоты излучением используют установку **экранов**. Защитное действие экрана, установленного между двумя параллельными поверхностями (при условии, что площади и коэффициенты излучения поверхностей и экрана одинаковы), состоит в уменьшении передачи теплоты излучением в 2 раза. Температуру экрана можно определить из выражения

$$\left(\frac{T_{ЭК}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]. \quad (259)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{изл} = \frac{q_{изл}}{T_{г} - T_{ст}}, \quad (260)$$

где  $T_{г}$  и  $T_{ст}$  – абсолютная температура газа и стенки, К.

При расчете сложного теплообмена, когда теплота передается двумя или даже всеми тремя способами одновременно, рассчитывают суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{изл}. \quad (261)$$

## Примеры решения задач

95 Определить собственную излучательную способность стенки летательного аппарата с коэффициентом излучения  $4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , если температура поверхности стенки  $1027^\circ\text{C}$ . Определить также степень черноты стенки и длину волны, отвечающей максимуму интенсивности излучения.

Решение:

Излучательную способность стенки летательного аппарата определяем по формуле (247):

$$E = 4,53 \cdot \left( \frac{1300}{100} \right)^4 = 1,256 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Степень черноты определяем из равенства  $\epsilon C_s = C$ ,

Откуда 
$$\epsilon = \frac{C}{C_s} = \frac{4,53}{5,77} = 0,785 \approx 0,8.$$

Длину волны, отвечающую максимуму интенсивности излучения, определяем из закона Вина (244):

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9}{T} = \frac{2,9}{1300} = 0,00223 \text{ мм} = 2,23 \text{ мкм}.$$

96 Определить лучистый теплообмен между стенками сосуда Дьюара, внутри которого хранится жидкий кислород, если на наружной поверхности внутренней стенки температура  $t_1 = -183^\circ\text{C}$ , а на внутренней поверхности наружной стенки  $t_2 = 17^\circ\text{C}$ . Стенки сосуда покрыты слоем серебра, степень черноты которого равна  $0,02$ ; площади поверхностей стенок  $F_1 \approx F_2 \approx 0,1 \text{ м}^2$ .

Решение:

Количество лучистой энергии между параллельными поверхностями можно определить по формуле (259).

Вначале вычислим приведенную степень черноты данной системы тел (251):

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{1/0,02 + 1/0,02 - 1} = \frac{1}{99}.$$

Тогда количество лучистой энергии

$$Q^* = 0,1 \cdot \frac{1}{99} \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{17 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{-183 + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,396 \text{ Вт.}$$

97 Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 300 и 100°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 300 мм, расстояние между ними  $h=500$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 0,24$ .

Решение:

Определим коэффициент облученности (257):

$$\Phi_{1-2} = \left[ \frac{0,5}{0,3} - \sqrt{1 + \left( \frac{0,5}{0,3} \right)^2} \right]^2 = 0,077.$$

Площадь поверхности пластины составляет:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2.$$

Определим приведенную степень черноты (251):

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{1/0,24 + 1/0,24 - 1} = 0,136.$$

Тепловой поток между пластинами определяем по формуле (256):

$$Q = \varphi \epsilon_{\text{пр}} C_s \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,077 \cdot 0,136 \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{573}{100} \right)^4 - \left( \frac{373}{100} \right)^4 \right] = 53,4 \text{ Вт.}$$

98 Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром 200 мм, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны 467°С и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°С.

Решение:

Паропровод охлаждается за счет излучения и свободной конвекции, следовательно, тепловой поток с единицы площади паропровода определяется уравнением

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{СТ}} - t),$$

где  $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$  - коэффициент лучисто-конвективного теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем исходя из формул (249) и (260):

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{0,79 \cdot 5,77 \cdot \left[ \left( \frac{740}{100} \right)^4 - \left( \frac{300}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{СТ}} - t} = 30,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (234). Находим по таблице приложения К параметры теплоносителя при определяющей температуре:

$$t = 0,5 (t_{\text{В}} + t_{\text{СТ}}) = 0,5 \cdot (467 + 27) = 245^\circ \text{С};$$

$$\lambda = 4,23 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 40,04 \text{ м}_2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,667; \quad \beta = \frac{1}{518}; \quad \Delta t = 440^\circ \text{С}.$$

Рассчитываем комплекс (Pr·Gr):

$$(\text{Pr} \cdot \text{Gr}) = 0,667 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,2^3 \cdot 440}{518 \cdot (40,04 \cdot 10^{-6})^2} = 2,78 \cdot 10^7.$$

При таком значении комплекса  $C=0,135$  и  $n=0,33$ . Определяем критерий Нуссельта:

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (2,78 \cdot 10^7)^{1/3} = 40,9.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (211):

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{40,9 \cdot 4,23 \cdot 10^{-2}}{0,2} = 8,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент лучисто-конвективного теплообмена

$$\alpha = 30,7 + 8,67 = 39,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определяем потери теплоты с 1 м длины паропровода:

$$q_1 = \alpha \pi d l \Delta t = 39,37 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 440 = 10880 \text{ кВт}/\text{м}.$$

99 Для измерения температуры горячего газа, движущегося по каналу, установлена термопара, показания которой  $400^\circ\text{C}$ , степень черноты горячего спая термопары и стенок канала одинаковы:  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,78$ , а температура стенки канала при стационарном режиме  $300^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи потока газа поверхности спая  $65,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить ошибку в показании термопары, которая возникает вследствие лучистого теплообмена между спаем и стенками, и истинную температуру газа.

Решение:

Составим уравнение теплового баланса для стационарного теплового состояния горячего спая:

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{л}} \quad \text{или} \quad \alpha (t_{\text{г}} - t_1) F = \epsilon_{\text{сп}} C_s F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где  $F$  – площадь поверхности горячего спая.

Из этой формулы ошибка в показаниях термопары составляет:

$$t_f - t_1 = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} C_s}{\alpha} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{0,78 \cdot 5,77}{65,1} \cdot \left[ \left( \frac{673}{100} \right)^4 - \left( \frac{573}{100} \right)^4 \right] = 66^\circ \text{C}.$$

Истинная температура газа

$$t_f = 400 + 66 = 466^\circ \text{C}.$$

100 Определить допустимую силу тока для горизонтально расположенной нихромовой проволоки диаметром 1,5 мм при условии непревышения ее температуры  $400^\circ\text{C}$ . Температура воздуха  $30^\circ\text{C}$ , удельное электрическое сопротивление провода  $1,2$  (Ом·мм<sup>2</sup>)/м, степень черноты  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,96$ ; провод охлаждается вследствие излучения и свободной конвекции.

Решение:

Отводимая от проволоки теплота определяется уравнением

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}}.$$

Потери за счет излучения

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_s \pi d \left( \frac{T}{100} \right)^4 = 0,96 \cdot 5,77 \cdot 3,14 \cdot 0,0015 \left( \frac{673}{100} \right)^4 = 52,8 \text{ Вт/м}.$$

Определим потери за счет свободной конвекции. Находим по таблице приложения К параметры теплоносителя при определяющей температуре:

$$t = 0,5 (t_{\text{в}} + t_{\text{ст}}) = 0,5 \cdot (400 + 30) = 215^\circ \text{C};$$

$$\lambda = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad \nu = 36,58 \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,68; \quad \beta = \frac{1}{488}; \quad \Delta t = 370^\circ \text{C}.$$

Рассчитываем комплекс (Pr·Gr):

$$(\text{Pr} \cdot \text{Gr}) = 0,68 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,0015^3 \cdot 370}{488 \cdot (36,58 \cdot 10^{-6})^2} = 12,8.$$

При таком значении комплекса  $C=1,18$  и  $n=0,125$ . Определяем критерий Нуссельта:

$$Nu = 1,18 \cdot (12,8)^{1/8} = 1,625 .$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяем по формуле (211):

$$\alpha_K = \frac{1,625 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2}}{0,0015} = 43,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) .$$

Потери тепла за счет конвекции

$$q_K = \alpha \pi d \Delta t = 43,3 \cdot 3,14 \cdot 0,0015 \cdot 370 = 75,6 \text{ Вт}/\text{м} .$$

Общие потери теплоты с 1 м длины провода составляют:

$$q_l = q_{л} + q_K = 128,4 \text{ Вт}/\text{м} .$$

Допустимую силу тока для нихромовой проволоки определяем из уравнения

$$q_l = I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{\pi d^2 / 4} = I^2 \cdot \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 4}{3,14 \cdot 1,5^2} = 0,679 \cdot I^2 ,$$

откуда

$$I = \sqrt{\frac{q_l}{0,679}} = \sqrt{\frac{128,4}{0,679}} = 13,42 \text{ А} .$$

### Задачи

330 Стальная заготовка с начальной температурой  $27^\circ\text{C}$  поставлена в муфельную печь, температура стенок которой  $927^\circ\text{C}$ . Определить, какой тепловой поток воспринимается заготовкой (в начальный период) за счет лучистой энергии, если отношение поверхностей заготовки и муфельной печи  $F_1/F_2=1/30$ , а степень черноты заготовки и стенок печи соответственно равны 0,7 и 0,85.

Ответ:  $q=81750 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .



331 Каким будет тепловой поток излучением и какова погрешность расчета, если в условии задачи 325 принять отношение поверхностей заготовки и муфельной печи  $F_1/F_2=0$ ?

Ответ:  $q=82600$  Вт/м<sup>2</sup>, погрешность составляет +1,14%.

332 Определить коэффициент облученности и лучистый тепловой поток между двумя стальными параллельно расположенными дисками с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 300 и 100°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 300 мм, расстояние между ними  $h=250$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 0,24$ . Как изменятся эти величины при уменьшении расстояния между дисками в 5 раз?

Ответ: а)  $\varphi_{1-2} = 0,204$ ;  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,436$ ;  $Q = 31,6$  Вт.

б)  $\varphi_{1-2} = 0,52$ ;  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,234$ ;  $Q = 43,5$  Вт.

333 Определить лучистый тепловой поток между двумя равными круглыми стальными параллельно расположенными пластинами с центрами на общей нормали. Температуры поверхностей дисков 400 и 1000°C; диски имеют одинаковые диаметры, равные 750 мм, расстояние между ними  $h=2000$  мм. Степень черноты дисков  $\epsilon_1 = 0,55$ ;  $\epsilon_2 = 0,15$ .

Ответ:  $Q= 165$  Вт.

334 Определить коэффициент лучисто-конвективного теплообмена и потери теплоты с единицы длины паропровода диаметром 200 мм, если температура и степень черноты его поверхности соответственно равны 467°C и 0,79, а температура окружающего воздуха 27°C. Паропровод помещен в кирпичный канал диаметром 1 м с температурой стенки канала 27°C, . степень черноты его поверхности равна 0,81.

Ответ:  $\alpha = 29,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $q_1 = 9350 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

335 Как изменится ошибка в показаниях термопары газового потока, если в условии примера 99 температуру стенки трубы повысить до  $360^\circ\text{C}$ , улучшив теплоизоляцию газопровода?

Ответ:  $\delta t = 30,6$ ;  $t_f = 430,6^\circ\text{C}$ .

336 Между двумя параллельными кругами с центрами на общей нормали к их плоскостям происходит лучистый теплообмен. Среда между кругами прозрачна. Определить величину результирующего теплового потока, если известно:

$$\begin{aligned}d_1 &= 0,5 \text{ м}, & t_1 &= 727^\circ\text{C}, & h &= 2,0 \text{ м}; \\d_2 &= 1,0 \text{ м}, & t_2 &= 227^\circ\text{C};\end{aligned}$$

а) верхний круг выполнен из листовой шлифованной стали ( $\epsilon_1 = 0,61$ ), нижний — из шамотного кирпича ( $\epsilon_2 = 0,75$ );

б) верхний круг выполнен из вольфрама ( $\epsilon_1 = 0,16$ ), нижний — из шамотного кирпича ( $\epsilon_2 = 0,75$ ).

Ответ: а)  $Q_{1-2} = 280 \text{ Вт}$ ; б)  $Q_{1-2} = 72,5 \text{ Вт}$ .

337 Определить часовое количество тепла, теряемого за счет лучеиспускания паропроводом без тепловой изоляции, проложенным внутри большого цехового помещения. Наружный диаметр паропровода 150 мм, длина 200 м. По паропроводу течет насыщенный пар давлением 10 ат, температура наружной поверхности труб паропровода на  $20^\circ\text{C}$  ниже температуры насыщения, температура воздуха в помещении  $25^\circ\text{C}$ . Коэффициент поглощения материала труб  $A = 0,45$ .

Ответ:  $Q = 66 \text{ кВт}$ .

338 На сколько процентов изменится тепловая потеря паропровода в задаче 337, если учесть излучение паропровода? Степень черноты материала труб 0,82.

Ответ: на 321%.

339 Найти потери тепла на излучение 1 погонного метра паропровода диаметром  $d = 300$  мм, наружная температура которого равна  $t_{\text{тр}} = 567^\circ\text{C}$ , степень черноты  $\epsilon_{\text{тр}} = 0,93$  для случаев:

а) обратным излучением среды на паропровод можно пренебречь;

б) паропровод находится в канале прямоугольного сечения размером  $600 \times 700$  мм, стенки канала выложены сильно излучающим огнеупорным кирпичом ( $\epsilon_{\text{ст}} = 0,8$ );  $t_{\text{ст}} = 117^\circ\text{C}$ .

Ответ: а)  $Q = 24,8$  кВт/м; б)  $Q = 21,8$  кВт/м.

340 По условиям эксплуатации температура горизонтального нихромового неизолированного провода,  $d = 1$  мм, не должна превышать  $600^\circ\text{C}$ . Определить максимально допустимую силу тока, если температура воздуха  $30^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1,2$  Ом·мм<sup>2</sup>/м,  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,95$ .

Ответ:  $I = 11,5$  А.

341 Определить потери тепла излучением поверхностью стального аппарата цилиндрической формы, находящегося в помещении, стены которого выкрашены масляной краской. Размеры аппарата: высота – 2 м, диаметр – 1 м. Размеры помещения: высота – 4 м, длина – 10 м, ширина – 6 м. Температура стенки аппарата  $70^\circ\text{C}$ , температура воздуха в помещении  $20^\circ\text{C}$ . Определить общую потерю тепла аппаратом путем излучения и конвекции.

Ответ:  $Q^* = 5200$  Вт.

342 В помещении установлен цилиндрический подогреватель (длина 4 м, диаметр 1 м). Температура поверхности подогревателя  $280^\circ\text{C}$ , коэффициент излучения  $4,9$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Размеры помещения: длина 8 м, ширина 4 м, высота 3 м, температура в помещении  $22^\circ\text{C}$ , коэффициент излучения стен  $3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Определить тепловой поток между подогревателем и стенами.

Ответ:  $Q^*=51740$  Вт.

343 Между двумя параллельными поверхностями установлен экран. Температура поверхностей  $367$  и  $32^\circ\text{C}$ . Степень черноты поверхностей и экрана одинаковы и равны  $0,83$ . Определить плотность теплового потока между поверхностями до и после установки экрана, а также температуру экрана.

Ответ:  $q_0=6510$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{эк}}=3255$  Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\text{эк}}=545$  К.

344 Определить тепловой поток излучением от стальной окисленной трубы (диаметр  $0,1$  м; длина  $10$  м),используемой для отопления гаража. Температура поверхности трубы  $85^\circ\text{C}$ , температура стен  $15^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $Q^*=1360$  Вт.

## Приложение А

### Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Относительная молекулярная масса, кг/кмоль	Газовая постоянная, Дж/кг	Плотность газа при н.у., кг/м <sup>3</sup>
Кислород	O <sub>2</sub>	32	259,8	1,429
Водород	H <sub>2</sub>	2	4124,3	0,090
Азот	N <sub>2</sub>	28	296,8	1,250
Оксид углерода	CO	28	296,8	1,250
Воздух	—	28,96	287	1,293
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44	189	1,977
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18	481,6	0,804
Гелий	He	4	2077,2	0,178
Аргон	Ar	40	208,2	1,784
Аммиак	N H <sub>3</sub>	17	488,2	0,771
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	320	1,171
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,1	106	-
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1	143	2,673
Оксид азота	NO <sub>2</sub>	46	181	-
Оксид серы	SO <sub>2</sub>	64,1	130	2,93
Метан	CH <sub>4</sub>	16	519	0,72
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1	189	2,02
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,1	198	1,91
Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,1	244	1,54
Хлор	Cl <sub>2</sub>	70,9	117	3,22
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,1	297	1,26
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,1	277	1,36

## Приложение Б

Средняя теплоемкость газов в интервале температур от 0 до t

Таблица Б.1 - Средняя молярная теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(кмоль·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	29,274	29,019	29,123	35,86	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,4	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,5	29,789	43,25	35,09	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,63	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,15	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,07	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,74	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	-	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	-	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	-	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,8	42,056	-	32,967
1700	34,67	32,93	33,27	53,50	42,20	-	33,17
1800	34,834	33,10	33,44	53,91	42,67	-	33,35
1900	35,02	33,26	33,69	54,29	43,12	-	33,51
2000	35,17	33,42	33,75	54,64	43,56	-	33,66
2200	35,50	33,70	34,02	55,27	44,37	-	33,95
2400	35,80	33,95	34,26	55,85	45,13	-	34,21
2600	36,09	34,18	34,48	56,35	45,81	-	34,45
2800	36,36	34,39	34,68	56,82	-	-	34,67
3000	36,61	34,58	34,86	57,23	-	-	34,87

Таблица Б.2 - Средняя молярная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кмоль·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,8	20,988	31,744	25,803	34	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,44	26,26	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,935	26,775	36,89	21,474
500	23,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,78
600	23,446	21,729	22,11	37,438	27,88	39,02	22,09
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,9	22,408
800	24,187	22,32	22,755	39,448	29,077	40,61	22,713
900	24,51	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,35	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,14	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,51	42,75	23,794
1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	-	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	-	24,25
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,21	-	24,459
1600	26,159	24,25	24,736	44,485	33,741	-	24,652
1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	-	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	-	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	-	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,68	-	25,326

Таблица Б.3 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(кг·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9282	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,95	1,04	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,071
900	1,0258	1,0982	1,12	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,035	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,117	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,153	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,058	1,1342	1,1577	1,166	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,138
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,363	-	1,1443
1800	1,0886	1,169	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,094	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,156
2000	1,099	1,191	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,161
2100	1,104	1,197	1,208	1,240	2,466	-	1,166
2200	1,109	1,201	1,213	1,247	2,490	-	1,171
2300	1,114	1,206	1,218	1,253	2,512	-	1,176
2400	1,118	1,210	1,222	1,259	2,533	-	1,180
2500	1,123	1,214	1,226	1,264	2,554	-	1,185
2600	1,127	1,216	1,231	1,271	2,574	-	1,189
2700	1,131	1,222	1,235	1,275	2,594	-	1,103
2800	1,135	1,226	1,238	1,284	2,612	-	1,197
2900	1,139	1,231	1,242	1,288	2,630	-	1,201
3000	1,143	1,235	1,245	1,292	-	-	1,206



Таблица Б.4 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кг·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,398	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,677	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,69	0,7448	0,757	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,824	1,516	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,614	0,632	0,7842
900	0,7658	0,803	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,775	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,839	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,847	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,883	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,857
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,834	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,839	0,884	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742
2100	0,844	0,900	0,912	1,052	2,005	-	0,879
2200	0,849	0,905	0,916	1,058	2,028	-	0,884
2300	0,854	0,909	0,921	1,064	2,050	-	0,889
2400	0,858	0,914	0,925	1,070	2,072	-	0,893
2500	0,863	0,918	0,929	1,075	2,093	-	0,897
2600	0,868	0,920	0,931	1,080	2,113	-	0,900
2700	0,872	0,923	0,934	1,084	2,132	-	0,903
2800	0,875	0,926	0,936	1,089	2,151	-	0,906
2900	0,878	0,929	0,939	1,093	2,168	-	0,908
3000	0,881	0,931	0,941	1,097	-	-	0,911

Таблица Б.5 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,398	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,372	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,367	1,3862	2,1311	1,668	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,828	-	1,4528
1500	1,5294	1,444	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,462
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,501

Таблица Б.6 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,44	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,027	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,7	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,996	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,864	1,3791	1,888	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	-	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,457	-	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	-	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	-	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	-	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	-	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	-	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	-	1,1296

## Приложение В

Средняя теплоемкость газов (линейная зависимость)

Таблица В.1 — Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

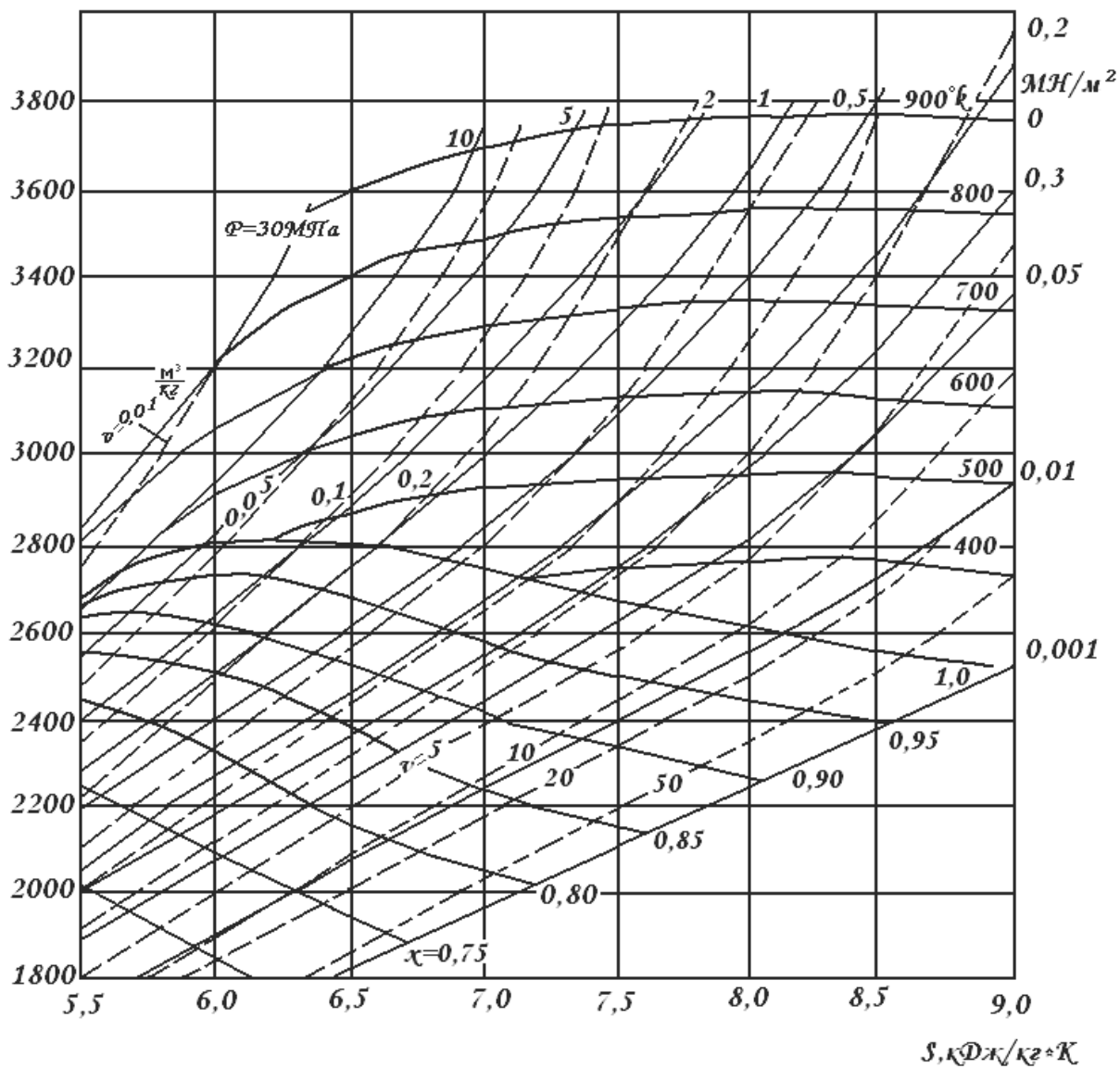
Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
В пределах от 0 до 1000°С		
O <sub>2</sub>	$C_p = 0,9127 + 0,00012724 t$	$C'_p = 1,3046 + 0,00018183 t$
	$C_v = 0,6527 + 0,00012724 t$	$C'_v = 0,9337 + 0,00018183 t$
N <sub>2</sub>	$C_p = 1,0258 + 0,00008382 t$	$C'_p = 1,2833 + 0,00010492 t$
	$C_v = 0,7289 + 0,00008382 t$	$C'_v = 0,9123 + 0,00010492 t$
CO	$C_p = 1,0304 + 0,00009575 t$	$C'_p = 1,2883 + 0,00011966 t$
	$C_v = 0,7335 + 0,00009575 t$	$C'_v = 0,9173 + 0,00011966 t$
Воздух	$C_p = 0,9952 + 0,00009349 t$	$C'_p = 1,2870 + 0,00012091 t$
	$C_v = 0,7084 + 0,00009349 t$	$C'_v = 0,9161 + 0,00012091 t$
H <sub>2</sub> O	$C_p = 1,8401 + 0,00029278 t$	$C'_p = 1,4800 + 0,00023551 t$
	$C_v = 1,3783 + 0,00029278 t$	$C'_v = 1,1091 + 0,00023551 t$
SO <sub>2</sub>	$C_p = 0,6314 + 0,00015541 t$	$C'_p = 1,8472 + 0,00004547 t$
	$C_v = 0,5016 + 0,00015541 t$	$C'_v = 1,4763 + 0,00004547 t$
В пределах от 0 до 1500°С		
H <sub>2</sub>	$C_p = 14,2494 + 0,00059574 t$	$C'_p = 1,2803 + 0,00005355 t$
	$C_v = 10,1241 + 0,00059574 t$	$C'_v = 0,9094 + 0,00005355 t$
CO <sub>2</sub>	$C_p = 0,8725 + 0,00024053 t$	$C'_p = 1,7250 + 0,00004756 t$
	$C_v = 0,6837 + 0,00024053 t$	$C'_v = 1,3540 + 0,00004756 t$

Таблица В.2 — Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов

Газ	Истинная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)	Средняя теплоемкость, кДж/(кмоль·К)
В пределах от 0 до 1000°С		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5802 + 0,0069706 t$	$C_{\mu p} = 29,2080 + 0,0040717 t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5372 + 0,0053905 t$	$C_{\mu p} = 28,7340 + 0,0023488 t$
CO	$C_{\mu p} = 28,7395 + 0,0058862 t$	$C_{\mu p} = 28,8563 + 0,0026808 t$
Воздух	$C_{\mu p} = 28,7558 + 0,0057208 t$	$C_{\mu p} = 28,8270 + 0,0027080 t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 32,8367 + 0,0116611 t$	$C_{\mu p} = 33,1494 + 0,0052749 t$
SO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 42,8728 + 0,0132043 t$	$C_{\mu p} = 40,4386 + 0,0099562 t$
В пределах от 0 до 1500°С		
H <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 28,3446 + 0,0031518 t$	$C_{\mu p} = 28,7210 + 0,0012008 t$
CO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 41,3597 + 0,0144985 t$	$C_{\mu p} = 38,3955 + 0,0105838 t$
В пределах от 1000 до 2700°С		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 33,8603 + 0,021951 t$	$C_{\mu p} = 31,5731 + 0,0017572 t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 32,7466 + 0,0016517 t$	$C_{\mu p} = 29,7815 + 0,0016835 t$
CO	$C_{\mu p} = 33,6991 + 0,0013406 t$	$C_{\mu p} = 30,4242 + 0,0015579 t$
Воздух	$C_{\mu p} = 32,9564 + 0,0017800 t$	$C_{\mu p} = 30,1533 + 0,0016973 t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 40,2393 + 0,0059854 t$	$C_{\mu p} = 34,5118 + 0,0045979 t$

hs-диаграмма водяного пара

$h$ , кДж/кг



## Приложение Д

### Физические свойства воды и водяного пара

Таблица Д.1 - Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (в зависимости от температуры)

t, °C	P <sub>n</sub> , МПа	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2500,8	2500,8	0	9,1644
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,9	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,256
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358	0,8311	7,9084
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,955	7,7544
80	0,4736	0,001029	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734	2144,9	1,7392	6,9304

Продолжение таблицы Д.1

t, °C	P <sub>n</sub> , МПа	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
160	0,618	0,0011021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
200	1,555	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793	1940,6	2,3308	6,4318
220	2,3202	0,00119	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
240	3,348	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
320	11,28	0,001499	0,01545	64,74	1462	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,008805	113,6	1671,4	2564,6	893	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,006943	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,053
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
474	22,087	0,0028	0,00347	288	2031,9	2147	114,7	4,3258	4,5029



Таблица Д.2 - Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (в зависимости от давления)

Р, МПа	tн, °С	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
0,002	17,486	0,001	67,24	0,0149	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,004	29,95	0,001	34,93	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,006	36,17	0,001	23,77	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,008	41,53	0,001	18,13	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,010	45,82	0,001	14,7	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,001	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,03	69,12	0,001	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,001	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,05	81,33	0,001	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,001	2,734	0,3658	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,08	93,5	0,001	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,001	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,8	0,001	1,43	0,6992	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
0,16	113,31	0,0011	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
0,2	120,23	0,0011	0,886	1,129	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0011	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,4	143,62	0,0011	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,5	151,84	0,0011	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609

Продолжение таблицы Д.2

Р, МПа	tн, °С	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	ρ, кг/м <sup>3</sup>	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
1	179,88	0,0011	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
2	212,36	0,0012	0,0996	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
3	233,83	0,0012	0,0666	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
4	250,33	0,0013	0,0498	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5	263,91	0,0013	0,0394	25,39	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
6	275,56	0,0013	0,0324	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7	285,8	0,0014	0,0274	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8	294,98	0,0014	0,0235	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9	303,31	0,0014	0,0205	48,8	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10	310,96	0,0015	0,018	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11	318,04	0,0015	0,016	62,62	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
12	324,64	0,0015	0,0143	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
13	330,81	0,0016	0,0128	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14	330,63	0,0016	0,0115	87,04	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
16	347,32	0,0017	0,0093	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18	356,96	0,0018	0,0075	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20	365,71	0,002	0,0059	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
22	373,7	0,0027	0,0037	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

## Приложение Е

### Термодинамические свойства воды и перегретого пара

(числа над ступенчатой линией относятся к воде)

P, кПа	5			10			20		
t, °C	t <sub>H</sub> =32,55 °C; h''=2562,2; v''=28,73; s''=8,407			t <sub>H</sub> =45,45 °C; h''=2585,6; v''=14,95; s''=8,162			t <sub>H</sub> =59,67 °C; h''=2610; v''=7,789; s''=7,919		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0
50	30,36	2595	8,51	15,15	2594	8,19	0,001	209,5	0,70
100	35,09	2689	8,78	17,53	2688	8,46	8,75	2687	8,14
200	44,52	2881	9,24	22,25	2881	8,92	11,12	2881	8,60
300	53,93	3078	9,62	26,96	3078	9,30	13,48	3078	8,97
400	63,34	3282	9,94	31,67	3282	9,62	15,83	3282	9,30
500	72,76	3492	10,23	36,38	3492	9,91	18,19	3492	9,60
600	82,17	3709	10,50	41,08	3709	10,18	20,54	3709	9,86

P, кПа	50			100			200		
t, °C	t <sub>H</sub> =80,86 °C; h''=2646; v''=3,299; s''=7,606			t <sub>H</sub> =99,09 °C; h''=2676; v''=1,725; s''=7,371			t <sub>H</sub> =119,62 °C; h''=2708; v''=0,902; s''=7,139		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0
50	0,001	209,5	0,70	0,001	209,5	0,70	0,001	209,5	0,70
100	3,485	2684	7,71	1,729	2677	7,37	0,001	419,8	1,31
200	4,441	2879	8,17	2,215	2877	7,85	1,102	2872	7,52
300	5,388	3077	8,55	2,690	3076	8,23	1,342	3074	7,91
400	6,331	3282	8,88	3,163	3280	8,56	1,579	3279	8,24
500	7,273	3491	9,17	3,635	3491	8,85	1,816	3490	8,53
600	8,215	3709	9,43	4,106	3708	9,11	2,052	3708	8,79

P, кПа	500			1000			2000		
t, °C	t <sub>H</sub> =151,11 °C; h''=2750; v''=0,3818; s''=6,83			t <sub>H</sub> =179,04 °C; h''=2779; v''=0,198; s''=6,599			t <sub>H</sub> =211,38 °C; h''=2801; v''=0,1016; s''=6,352		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	0,4	0	0,001	0,8	0	0,001	2,1	0
50	0,001	209,5	0,70	0,001	210,3	0,70	0,001	211,2	0,70
100	0,001	419,8	1,31	0,001	420,3	1,31	0,001	421,1	1,31
200	0,437	2858	7,07	0,210	2831	6,71	0,001	853,1	2,33
300	0,533	3067	7,47	0,263	3054	7,14	0,128	3027	6,78
400	0,629	3274	7,81	0,312	3266	7,48	0,154	3251	7,14
500	0,725	3487	8,10	0,361	3482	7,78	0,179	3471	7,45
600	0,820	3705	8,37	0,409	3702	8,04	0,203	3694	7,72

P, кПа	5000			10000			20000		
t, °C	t <sub>H</sub> =262,7 °C; h''=2797; v''=0,0403; s''=5,987			t <sub>H</sub> =309,53 °C; h''=2731; v''=0,01846; s''=5,63			t <sub>H</sub> =363,4 °C; h''=2435; v''=0,00618; s''=4,97		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	5,03	0	0,001	10,06	0	0,001	19,69	0
50	0,001	213,7	0,70	0,001	217,9	0,70	0,001	226,3	0,69
100	0,001	423,2	1,30	0,001	427,0	1,30	0,001	434,5	1,29
200	0,001	854,3	2,33	0,001	855,6	2,32	0,001	860,6	2,30
300	0,046	2932	6,23	0,001	1345	3,25	0,001	1335	3,21
400	0,059	3200	6,66	0,027	3103	6,23	0,010	2830	5,58
500	0,070	3439	6,99	0,033	3382	6,62	0,015	3255	6,17
600	0,080	3672	7,28	0,039	3635	6,93	0,018	3555	6,54

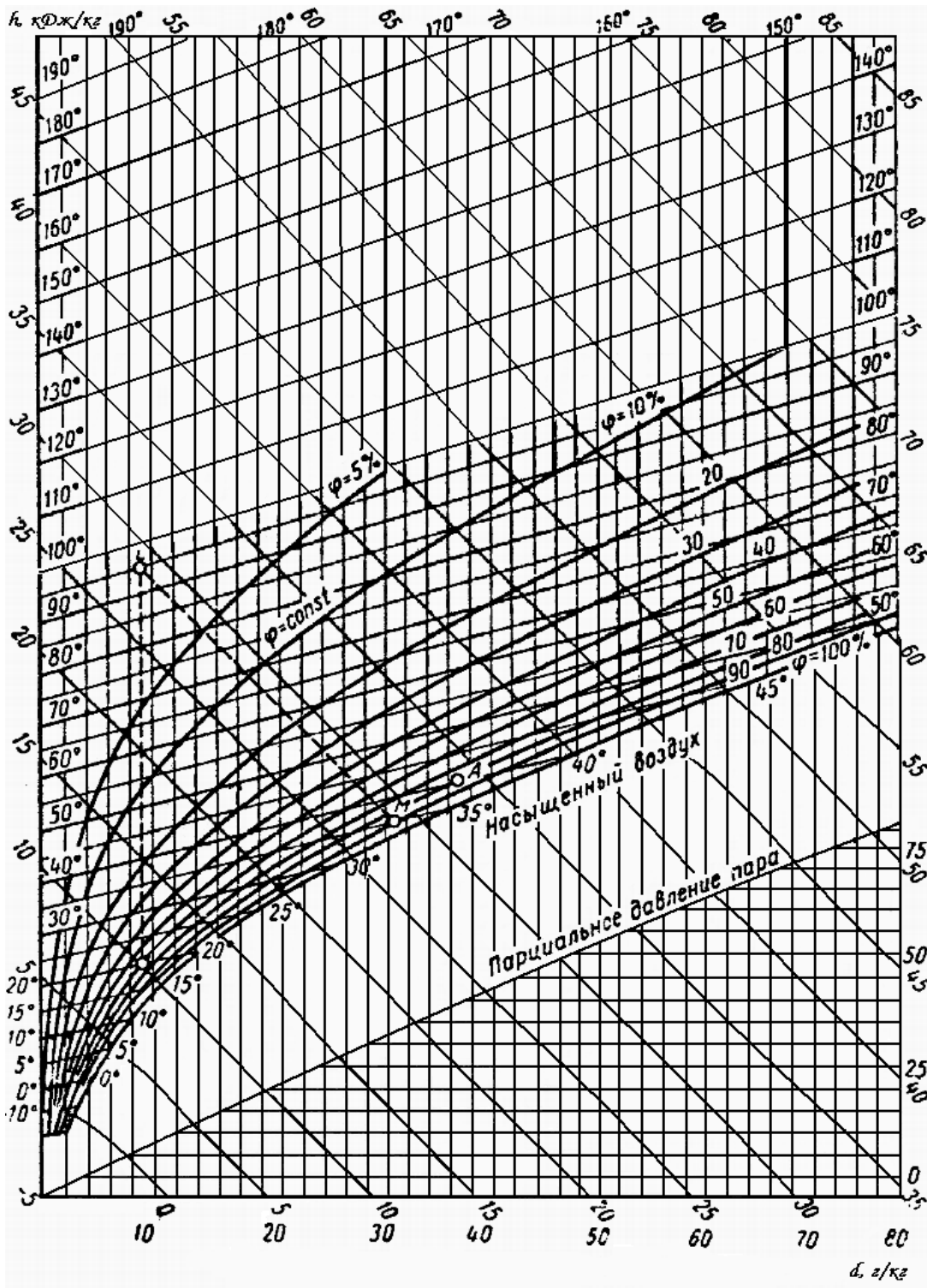
Примечание. В таблице использованы следующие обозначения:

v'', v – удельный объем сухого насыщенного и перегретого пара, м<sup>3</sup>/кг;

h'', h – энтальпия сухого насыщенного и перегретого пара, кДж/кг;

s'', s – энтропия сухого насыщенного и перегретого пара, кДж/(кг·К).

Приложение Ж  
 h-d-диаграмма атмосферного воздуха



## Приложение К

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
223	1,584	1,013	2,04	9,23	0,728
233	1,515	1,013	2,12	10,04	0,728
243	1,453	1,013	2,20	10,80	0,723
253	1,395	1,009	2,28	12,79	0,716
263	1,342	1,009	2,36	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701
313	1,128	1,005	2,76	16,96	0,699
323	1,093	1,005	2,83	17,95	0,698
333	1,060	1,005	2,90	18,97	0,696
343	1,029	1,009	2,97	20,02	0,694
353	1,000	1,009	2,05	21,09	0,692
363	0,972	1,009	3,13	22,10	0,690
373	0,946	1,009	3,21	23,13	0,688
393	0,898	1,009	3,34	25,45	0,686
413	0,854	1,013	3,49	27,80	0,684
433	0,815	1,017	3,64	30,09	0,682
453	0,779	1,021	3,78	32,49	0,681
473	0,746	1,026	3,93	34,85	0,680
523	0,674	1,038	4,27	40,61	0,677
573	0,615	1,047	4,61	48,33	0,674

Продолжение приложения К

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda \cdot 10^2</math>, Вт/(м<sup>2</sup>·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>
623	0,566	1,059	4,91	55,46	0,676
673	0,524	1,068	5,21	63,09	0,678
773	0,456	1,093	5,74	79,38	0,687
873	0,404	1,114	6,22	96,89	0,699
973	0,362	1,135	6,71	115,4	0,706
1073	0,329	1,156	7,18	134,8	0,713
1173	0,301	1,172	7,63	155,1	0,717
1273	0,277	1,185	8,07	177,1	0,719
1373	0,257	1,198	8,50	199,3	0,722
1473	0,239	1,210	9,15	223,7	0,724

## Приложение Л

### Физические параметры воды на линии насыщения

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>	<b><math>\beta \cdot 10^4</math>, К<sup>-1</sup></b>
273	999,9	4,212	0,551	1,789	13,67	- 0,63
283	999,7	4,191	0,575	1,306	9,52	+ 0,70
293	998,2	4,183	0,599	1,006	7,02	1,82
303	995,7	4,174	0,618	0,805	5,42	3,21
313	992,2	4,174	0,634	0,659	4,31	3,87
323	988,1	4,174	0,648	0,556	3,54	4,49
333	983,2	4,178	0,659	0,478	2,98	5,11
343	977,8	4,187	0,668	0,415	2,55	5,70
353	971,8	4,195	0,675	0,365	2,21	6,32
363	965,3	4,208	0,680	0,326	1,95	6,95
373	958,4	4,220	0,683	0,295	1,75	7,52
383	951,0	4,233	0,685	0,272	1,60	8,08
393	943,1	4,250	0,686	0,252	1,47	8,64
403	934,8	4,266	0,686	0,233	1,36	9,19
413	926,1	4,287	0,685	0,217	1,26	9,72
423	917,0	4,313	0,684	0,203	1,17	10,3
433	907,4	4,346	0,683	0,191	1,10	10,7
443	897,3	4,380	0,679	0,181	1,05	11,3
453	886,9	4,417	0,675	0,173	1,00	11,9
463	876,0	4,459	0,670	0,165	0,96	12,6
473	863,0	4,505	0,663	0,158	0,93	13,3
483	852,8	4,556	0,655	0,153	0,91	14,1
493	840,3	4,614	0,645	0,148	0,89	14,8



Продолжение приложения Л

<b>T, К</b>	<b><math>\rho</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b><math>C_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\lambda</math>, Вт/(м·К)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math>, м<sup>2</sup>/с</b>	<b>Pr</b>	<b><math>\beta \cdot 10^4</math>, К<sup>-1</sup></b>
503	827,3	4,681	0,637	0,145	0,88	15,9
513	813,6	4,756	0,628	0,141	0,87	16,8
523	799,0	4,844	0,618	0,0,137	0,86	18,1
533	784,0	4,949	0,605	0,135	0,87	19,6
543	767,9	5,070	0,590	0,133	0,88	21,6
553	750,7	5,229	0,575	0,131	0,90	23,7
563	732,3	5,485	0,558	0,129	0,93	26,2
573	712,5	5,736	0,540	0,128	0,97	29,2
583	691,1	6,071	0,523	0,128	1,03	32,9
593	667,1	6,473	0,506	0,128	1,11	38,2
603	640,2	7,244	0,484	0,127	1,22	43,3
613	610,1	8,163	0,457	0,127	1,39	53,4
623	574,4	9,50	0,430	0,127	1,60	66,8
633	528,0	13,984	0,395	0,126	2,35	109
643	450,5	40,32	0,337	0,126	6,79	264

## Приложение М

### Теплофизические свойства некоторых металлов и материалов

Материал	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Алюминий 98,5%	0	2,70	0,879	201,2
	100	2,69	0,942	204,7
	300	2,65	1,038	230,3
	400	2,62	1,059	318,7
	500	2,58	1,101	374,5
А12 Al+12%Si	20	2,70	0,879	176,0
	100	2,69	0,942	196,5
	200	-	-	210,5
	300	2,65	1,038	245,4
	400	2,62	1,059	289,6
Сталь 08	100	-	-	80,2
	300	-	-	60,7
	600	-	-	37,9
Сталь 10	100	7,86	0,465	69,2
	400	-	0,511	51,6
	600	-	0,565	45,7
Сталь 15	100	7,86	-	65,8
	400	-	-	48,5
1X18H9T	100	7,9	0,502	16,0
	400	-	-	20,8
	800	-	-	27,6
Медь	20	8,93	0,381	395
	900	8,62	0,482	321
Асбест	0	0,1	0,837	0,060
Стекловата	30	0,14	0,670	0,049
Минеральная вата	30	0,14	0,837	0,054

## Приложение Н

### Степень черноты для различных материалов

Наименование материала	t°С	Степень черноты
Алюминий полированный	50 — 500	0,04 – 0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20 — 50	0,06 – 0,07
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая шероховатая	50 — 150	0,55
Вольфрам	1500 — 2200	0,24 – 0,31
Железо оцинкованное листовое блестящее	30	0,23
Жесть белая старая	20	0,28
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Медь полированная	50 — 100	0,02
Медь окисленная	500	0,88
Молибден	1500 — 2200	0,19 – 0,26
Никелевая проволока	200 — 1000	0,1 - 0,2
Нихромовая проволока чистая	50	0,65
Платиновая проволока	50 - 200	0,06 – 0,07
Платиновая проволока	1400	0,18
Серебро чистое полированное	200 - 600	0,02 – 0,03
Сталь листовая шлифованная	950 - 1100	0,55 – 0,61
Стальное литье полированное	750 - 1050	0,52 – 0,56
Сталь с шероховатой поверхностью	50	0,56
Хром полированный	500 - 1000	0,28 – 0,38
Цинк листовой	50	0,2
Чугун жидкий	1300	0,28

Продолжение приложения Н

Наименование материала	t°С	Степень черноты
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовый картон	20	0,96
Асбошифер	20	0,96
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Смоченная металлическая поверхность	20	0,98
Кирпич огнеупорный	500 - 1000	0,8 – 0,9
Кирпич шамотный	1000	0,75
Кирпич шамотный	1200	0,59
Кирпич огнеупорный динасовый	1000	0,66
Кирпич огнеупорный корундовый	1000	0,46
Кирпич красный шероховатый	20	0,88 – 0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Лак черный матовый	40 - 100	0,96 – 0,98
Лак белый	40 - 100	0,8 – 0,95
Мрамор сероватый полированный	20	0,93
Резина мягкая серая шероховатая	20	0,86
Сажа ламповая	20 - 400	0,95
Сажа с жидким стеклом	20 - 200	0,96
Стекло	250 - 1000	0,87 – 0,72
Стекло	1100 - 1500	0,7 – 0,67
Снег	-	0,96
Толь	20	0,91 – 0,93
Шлаки котельные	200 - 500	0,89 – 0,78
Эмаль белая	20	0,9

## Литература

1 Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под ред. Б.Н. Юдаева. – М.: Высш. школа, 1964. – 372 с.

2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 376 с.

3 Кириллин В.А., Шейндмин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Задачник по технической термодинамике. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 256 с.

4 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1970. – 624 с.

5 Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идиатуллин Н.С., Толкачев Д.Ф. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче. – М.: Высш. школа, 1972.- 304 с.

## Содержание

1	Техническая термодинамика . . . . .	3
1.1	Параметры состояния рабочего тела . . . . .	3
1.2	Основные газовые законы . . . . .	12
1.3	Смеси идеальных газов . . . . .	24
1.4	Теплоемкость газов . . . . .	31
1.5	Первый закон термодинамики . . . . .	43
1.6	Основные термодинамические процессы . . . . .	55
1.7	Второй закон термодинамики . . . . .	86
1.8	Круговые процессы . . . . .	96
1.9	Истечение газов и паров. Дросселирование . . . . .	118
1.10	Пары. Водяной пар . . . . .	133
1.11	Влажный воздух . . . . .	164
2	Теплопередача . . . . .	177
2.1	Теплопроводность . . . . .	177
2.2	Конвективный теплообмен . . . . .	194
2.3	Лучистый теплообмен . . . . .	218
	Приложение А. Физические постоянные некоторых газов . . . . .	233
	Приложение Б. Средняя теплоемкость газов в интервале температур от 0 до $t$ . . . . .	234
	Приложение В. Средняя теплоемкость газов (линейная зависимость) . . . . .	240
	Приложение Г. $h_s$ -диаграмма водяного пара . . . . .	242
	Приложение Д. Физические свойства воды и водяного пара . . . . .	243

Приложение Е. Термодинамические свойства воды и перегретого пара . . . . .	247
Приложение Ж. $h$ -диаграмма атмосферного воздуха . . . . .	249
Приложение К . Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па . . . . .	250
Приложение Л. Физические параметры воды на линии насыщения . . . . .	252
Приложение М. Теплофизические свойства некоторых металлов и материалов . . . . .	254
Приложение Н. Степень черноты для различных материалов . . . . .	255
Литература . . . . .	257

**Учебное издание**

**Л.В. ДЕМЕНТИЙ, А.А. КУЗНЕЦОВ, Ю.В. МЕНАФОВА**

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ  
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

Редактор Хахина Нелли Александровна

138 / 2002

Подп. в печ.

Формат 60x90 1 / 16.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 16,25

Уч.-изд. л. 11,82

Тираж 100 экз. Заказ №

---

ДГМА. 84313, Краматорск, ул. Шкадинова, 72



Приложение А

Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Относительная молекулярная масса, кг/кмоль	Газовая постоянная, Дж/кг	Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>
Кислород	O <sub>2</sub>	32	259,8	1,429
Водород	H <sub>2</sub>	2	4124,3	0,090
Азот	N <sub>2</sub>	28	296,8	1,250
Оксид углерода	CO	28	296,8	1,250
Воздух	—	28,96	287	1,293
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44	189	1,977
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18	481,6	0,804
Гелий	He	4	2077,2	0,178
Аргон	Ar	40	208,2	1,784
Аммиак	N H <sub>3</sub>	17	488,2	0,771
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	320	1,171
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,1	106	-
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,1	143	2,673
Оксид азота	NO <sub>2</sub>	46	181	-
Оксид серы	SO <sub>2</sub>	64,1	130	2,93
Метан	CH <sub>4</sub>	16	519	0,72
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1	189	2,02
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,1	198	1,91
Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,1	244	1,54
Хлор	Cl <sub>2</sub>	70,9	117	3,22
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,1	297	1,26
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,1	277	1,36

Приложение Б

Таблица Б.1 - Средняя молярная теплоемкость газов при постоянном давлении, кДж/(кмоль·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (абсолютно сухой)
0	29,274	29,019	29,123	35,86	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,4	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,5	29,789	43,25	35,09	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,63	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,15	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,07	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,74	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	-	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	-	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	-	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,8	42,056	-	32,967
1700	34,67	32,93	33,27	53,50	42,20	-	33,17
1800	34,834	33,10	33,44	53,91	42,67	-	33,35
1900	35,02	33,26	33,69	54,29	43,12	-	33,51
2000	35,17	33,42	33,75	54,64	43,56	-	33,66
2100	35,35	33,56	33,89	54,97	43,97	-	33,81
2200	35,50	33,70	34,02	55,27	44,37	-	33,95
2300	35,66	33,83	34,15	55,67	44,76	-	34,09
2400	35,80	33,95	34,26	55,85	45,13	-	34,21
2500	35,95	34,09	34,38	56,11	45,48	-	34,34
2600	36,09	34,18	34,48	56,35	45,81	-	34,45
2700	36,22	34,29	34,58	56,58	46,14	-	34,56
2800	36,36	34,39	34,68	56,82	-	-	34,67
2900	36,48	34,49	34,77	57,04	-	-	34,77
3000	36,61	34,58	34,86	57,23	-	-	34,87

Таблица Б.2 - Средняя молярная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кмоль·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух (абсолютно су- хой)
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,8	20,988	31,744	25,803	34	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,44	26,26	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,935	26,775	36,89	21,474
500	23,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,78
600	23,446	21,729	22,11	37,438	27,88	39,02	22,09
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,9	22,408
800	24,187	22,32	22,755	39,448	29,077	40,61	22,713
900	24,51	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,35	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,14	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,51	42,75	23,794
1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	-	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	-	24,25
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,21	-	24,459
1600	26,159	24,25	24,736	44,485	33,741	-	24,652
1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	-	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	-	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	-	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,68	-	25,326

Таблица Б.3 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(кг·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9282	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,95	1,04	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,071
900	1,0258	1,0982	1,12	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,035	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,117	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,153	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,058	1,1342	1,1577	1,166	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,138
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,363	-	1,1443
1800	1,0886	1,169	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,094	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,156
2000	1,099	1,191	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,161
2100	1,104	1,197	1,208	1,240	2,466	-	1,166
2200	1,109	1,201	1,213	1,247	2,490	-	1,171
2300	1,114	1,206	1,218	1,253	2,512	-	1,176
2400	1,118	1,210	1,222	1,259	2,533	-	1,180
2500	1,123	1,214	1,226	1,264	2,554	-	1,185
2600	1,127	1,216	1,231	1,271	2,574	-	1,189
2700	1,131	1,222	1,235	1,275	2,594	-	1,103
2800	1,135	1,226	1,238	1,284	2,612	-	1,197
2900	1,139	1,231	1,242	1,288	2,630	-	1,201
3000	1,143	1,235	1,245	1,292	-	-	1,206

Таблица Б.4 - Средняя массовая теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(кг·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,398	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,677	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,69	0,7448	0,757	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,824	1,516	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,614	0,632	0,7842
900	0,7658	0,803	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,775	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,839	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,847	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,883	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,857
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,834	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,839	0,894	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742
2100	0,844	0,900	0,912	1,052	2,005	-	0,879
2200	0,849	0,905	0,916	1,058	2,028	-	0,884
2300	0,854	0,909	0,921	1,064	2,050	-	0,889
2400	0,858	0,914	0,925	1,070	2,072	-	0,893
2500	0,863	0,918	0,929	1,075	2,093	-	0,897
2600	0,868	0,920	0,931	1,080	2,113	-	0,900
2700	0,872	0,923	0,934	1,084	2,132	-	0,903
2800	0,875	0,926	0,936	1,089	2,151	-	0,906
2900	0,878	0,929	0,939	1,093	2,168	-	0,908
3000	0,881	0,931	0,941	1,097	-	-	0,911

Таблица Б.5 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном давлении, кДж/(м<sup>3</sup>·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,398	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,372	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,367	1,3862	2,1311	1,668	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,828	-	1,4528
1500	1,5294	1,444	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,462
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,501

Таблица Б.6 - Средняя объемная теплоемкость газов  
при постоянном объеме, кДж/(м<sup>3</sup>·град)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Воздух
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,44	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,027	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,7	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,996	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,864	1,3791	1,888	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	-	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,457	-	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	-	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	-	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	-	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	-	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	-	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	-	1,1296

Таблица В.1 — Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Массовая теплоемкость в кДж/(кг·град)	Объемная теплоемкость в кДж/(м <sup>3</sup> ·град)
В пределах от 0 до 1000°С		
O <sub>2</sub>	$C_p = 0,9127 + 0,00012724 \cdot t$	$C'_p = 1,3046 + 0,00018183 \cdot t$
	$C_v = 0,6527 + 0,00012724 \cdot t$	$C'_v = 0,9337 + 0,00018183 \cdot t$
N <sub>2</sub>	$C_p = 1,0258 + 0,00008382 \cdot t$	$C'_p = 1,2833 + 0,00010492 \cdot t$
	$C_v = 0,7289 + 0,00008382 \cdot t$	$C'_v = 0,9123 + 0,00010492 \cdot t$
CO	$C_p = 1,0304 + 0,00009575 \cdot t$	$C'_p = 1,2883 + 0,00011966 \cdot t$
	$C_v = 0,7335 + 0,00009575 \cdot t$	$C'_v = 0,9173 + 0,00011966 \cdot t$
Воздух	$C_p = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t$	$C'_p = 1,2870 + 0,00012091 \cdot t$
	$C_v = 0,7084 + 0,00009349 \cdot t$	$C'_v = 0,9161 + 0,00012091 \cdot t$
H <sub>2</sub> O	$C_p = 1,8401 + 0,00029278 \cdot t$	$C'_p = 1,4800 + 0,00023551 \cdot t$
	$C_v = 1,3783 + 0,00029278 \cdot t$	$C'_v = 1,1091 + 0,00023551 \cdot t$
SO <sub>2</sub>	$C_p = 0,6314 + 0,00015541 \cdot t$	$C'_p = 1,8472 + 0,00004547 \cdot t$
	$C_v = 0,5016 + 0,00015541 \cdot t$	$C'_v = 1,4763 + 0,00004547 \cdot t$
В пределах от 0 до 1500°С		
H <sub>2</sub>	$C_p = 14,2494 + 0,00059574 \cdot t$	$C'_p = 1,2803 + 0,00005355 \cdot t$
	$C_v = 10,1241 + 0,00059574 \cdot t$	$C'_v = 0,9094 + 0,00005355 \cdot t$
CO <sub>2</sub>	$C_p = 0,8725 + 0,00024053 \cdot t$	$C'_p = 1,7250 + 0,00004756 \cdot t$
	$C_v = 0,6837 + 0,00024053 \cdot t$	$C'_v = 1,3540 + 0,00004756 \cdot t$



Таблица В.2 — Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов

Газ	Истинная теплоемкость в кДж/(кмоль·град)	Средняя теплоемкость в кДж/(кмоль·град)
В пределах от 0 до 1000°C		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5802 + 0,0069706 \cdot t$	$C_{\mu p} = 29,2080 + 0,0040717 \cdot t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 29,5372 + 0,0053905 \cdot t$	$C_{\mu p} = 28,7340 + 0,0023488 \cdot t$
CO	$C_{\mu p} = 28,7395 + 0,0058862 \cdot t$	$C_{\mu p} = 28,8563 + 0,0026808 \cdot t$
Воздух	$C_{\mu p} = 28,7558 + 0,0057208 \cdot t$	$C_{\mu p} = 28,8270 + 0,0027080 \cdot t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 32,8367 + 0,0116611 \cdot t$	$C_{\mu p} = 33,1494 + 0,0052749 \cdot t$
SO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 42,8728 + 0,0132043 \cdot t$	$C_{\mu p} = 40,4386 + 0,0099562 \cdot t$
В пределах от 0 до 1500°C		
H <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 28,3446 + 0,0031518 \cdot t$	$C_{\mu p} = 28,7210 + 0,0012008 \cdot t$
CO <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 41,3597 + 0,0144985 \cdot t$	$C_{\mu p} = 38,3955 + 0,0105838 \cdot t$
В пределах от 1000 до 2700°C		
O <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 33,8603 + 0,021951 \cdot t$	$C_{\mu p} = 31,5731 + 0,0017572 \cdot t$
N <sub>2</sub>	$C_{\mu p} = 32,7466 + 0,0016517 \cdot t$	$C_{\mu p} = 29,7815 + 0,0016835 \cdot t$
CO	$C_{\mu p} = 33,6991 + 0,0013406 \cdot t$	$C_{\mu p} = 30,4242 + 0,0015579 \cdot t$
Воздух	$C_{\mu p} = 32,9564 + 0,0017800 \cdot t$	$C_{\mu p} = 30,1533 + 0,0016973 \cdot t$
H <sub>2</sub> O	$C_{\mu p} = 40,2393 + 0,0059854 \cdot t$	$C_{\mu p} = 34,5118 + 0,0045979 \cdot t$

hs-диаграмма водяного пара

