

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский государственный аграрный университет»

**Л. А. Новопашин, Л. В. Денежко,  
В. А. Скоморохов, Ю. В. Панков, А. А. Садов**

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ  
В ПРИМЕРАХ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Учебное пособие**

Екатеринбург  
Издательство Уральского ГАУ  
2022

УДК 662.75  
ББК 31.6  
С23

*Утверждено и рекомендовано к печати  
учебно-методической комиссией факультета инженерных технологий  
Уральского государственного аграрного университета  
(протокол № 8 от 5 апреля 2021 г.)*

Рецензенты:

**Ю. Н. Строганов**, кандидат технических наук, доцент Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Е. Е. Баженов**, доктор технических наук, доцент Уральского государственного аграрного университета

**С23 Сборник задач по теплотехнике: учебное пособие для аграрных вузов /**  
Л. А. Новопашин, Л. В. Денежко, В. А. Скоморохов, В. А. Панков, А. А. Садов. –  
Екатеринбург: Издательство Уральского ГАУ, 2022. – 140 с.

ISBN 978-5-87203-502-2

В учебном пособии представлены методы решения задач и задачи для самостоятельного решения.

Каждый раздел учебного пособия содержит краткую теоретическую часть, основные формулы, примеры решения задач и задачи, требующие решения, с правильными ответами.

Учебное пособие предназначено для студентов аграрных вузов (очная и заочная формы), обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

ISBN 978-5-87203-502-2

УДК 662.75  
ББК 31.6

© Л. А. Новопашин, 2022  
© Л. В. Денежко, 2022  
© В. А. Скоморохов, 2022  
© Ю. В. Панков, 2022  
© А. А. Садов, 2022  
© Уральский ГАУ, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Система единиц измерения.....	4
Глава 2. Газовые смеси.....	8
Глава 3. Теплоемкости газов.....	13
Глава 4. Термодинамические процессы.....	22
Глава 5. Второй закон термодинамики. Энтропия идеального газа.....	55
Глава 6. Круговые процессы.....	61
Глава 7. Водяной пар.....	76
Глава 8. Истечение газов и пара.....	87
Глава 9. Влажный воздух.....	96
Глава 10. Теплопередача в теплообменных аппаратах.....	103
Глава 11. Расчет характеристик топлив.....	110
Библиографический список.....	120
Приложение .....	121

## Глава 1. Система единиц измерения

С 1 января 1963 г. введена международная система единиц – СИ (SI), в которой в качестве основных единиц приняты:

единица длины – метр (м);

единица массы – килограмм (кг);

единица температуры – градус Кельвина (К);

единица времени – секунда (с).

В таблице 1 находятся наиболее часто применяемые единицы и их размер.

Таблица 1

Единицы измерения наиболее распространенных величин

Наименование величин	Буквенные обозначения	Сокращенные обозначения	Размер единиц
Ускорение	$a, g$	м/с <sup>2</sup>	(1 м/с):(1 с)
Сила	$P$	Н	(1 кг):(1 м/с <sup>2</sup> )
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	(1 кг):(1 м <sup>3</sup> )
Удельный объем	$v$	м <sup>3</sup> /кг	(1 м <sup>3</sup> ):(1 кг)
Давление	$p$	Н/м <sup>2</sup>	(1 Н):(1 м <sup>2</sup> )
Работа, тепло, энергия	$I, L, q, Q$	Дж	(1 Н):(1 м)
Мощность	$N$	Вт	(1 Дж):(1 с)

На практике применяют единицы физических величин: мощность – киловатт (1 кВт = 1000 Вт), работа, тепло, энергия – килоджоуль (1 кДж = 1000 Дж), сила в 1 Н (1 ньютон) по второму закону Ньютона определяется как сила, сообщающая телу с массой 1 кг ускорение, равное 1 м/с<sup>2</sup>.

Внесистемные единицы, применяемые на практике:

*давления:*

$$1 \text{ бар} = 100\,000 \text{ Н/м}^2 = 750 \text{ мм рт. ст.} = 1,02 \text{ кгс/см}^2 = 1,02 \text{ атм};$$

$$1 \text{ атм (физическая атмосфера)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ Н/м}^2 = 1,0332 \text{ кг/см}^2 = 10\,332 \text{ кг/м}^2 = 10\,332 \text{ мм вод. ст.};$$

$$1 \text{ ат (техническая атмосфера)} = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 98\,100 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2 = 10\,000 \text{ мм вод. ст.};$$

$$1 \text{ ккал} = 4,1868 \text{ кДж};$$

*работы:*

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Дж}.$$

Широко применяют в теплотехнических расчетах киломоль (кмоль) вещества, т. е.  $\mu$  кг вещества, где  $\mu$  – молекулярный вес.

Во всех термодинамических уравнениях используют абсолютное давление:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{изб}} + p_{\text{бар}} = p_{\text{ман}} + p_{\text{бар}},$$

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}$$

и абсолютную температуру, °К

$$T = t + 273,15,$$

где  $p_{\text{изб}}$ ,  $p_{\text{бар}}$ ,  $p_{\text{вак}}$  – давления, измеренные манометром, барометром, вакуумметром,  $t$  – температура, °С.

### Уравнение состояния газа

Уравнение состояния идеального газа может быть представлено следующим уравнением:

для 1 кг газа

$$pv = RT, \quad (1)$$

для  $M$  кг газа

$$pV = M RT, \quad (2)$$

для киломоля газа

$$pV\mu = \mu RT, \quad (3)$$

где  $p$  – давление газа в Н/м<sup>2</sup>;

$V$  – объем газа в м<sup>3</sup>;

$M$  – масса газа в кг;

$v$  – удельный объем газа в м<sup>3</sup>/кг;

$V\mu$  – объем 1 кмоль газа в м<sup>3</sup>/кмоль;

$R$  – газовая постоянная для 1 кг газа в Дж/(кг·град);

$\mu R$  – универсальная газовая постоянная 1 кмоль газа в Дж/(кмоль·град), равная 8314,3 Дж/(кмоль·град).

Значения газовой постоянной могут быть вычислены из уравнения

$$R = \frac{8314,3}{\mu} \text{ Дж/кг·град}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – молекулярный вес газа.

В расчете часто используются уравнения для определения плотности и удельного объема:

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T}$$

$$v = v_0 \frac{p_0T}{pT_0}$$

где величина с индексом «0» представляет собой параметры газов при нормальном физическом состоянии (за нормальное физическое принимают состояние газов при давлении 760 мм рт. ст и температуре 0 °С = 273 °К).

Плотность и удельный объем при этих условиях можно определить следующими зависимостями:

$$\rho_0 = \frac{\mu}{22,4} \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

$$v_0 = \frac{22,4}{\mu} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (6)$$

### Задачи

1. Определить абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает  $\rho = 1,3$  бар, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $B = 680$  мм при  $t = 25$  °С.

Решение

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B.$$

Показания барометра получены при температуре ртути  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это показание необходимо привести к  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$B_0 = 680 - \frac{4,31 \cdot 680}{1000} = 680 - 2,93 = 67,077 \text{ мм рт. ст.}$$

Тот же результат будем иметь, если воспользуемся другим уравнением:

$$B_0 = B(1 - 0,000172t) = 680 \cdot 0,9957 = 677,08 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление пара в котле

$$p_{\text{абс}} = 1,3 + \frac{677,07}{750} = 1,3 + 0,9 = 2,2 \text{ бар.}$$

2. Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выразить это давление в барах и  $\text{Н/м}^2$ .

Решение

$$1 \text{ бар} = 750 \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно,

$$770 \text{ мм рт. ст.} = \frac{770}{750} \text{ бар} = 1,027 \text{ бар} = 102700 \text{ Н/м}^2.$$

3. Масса  $1 \text{ м}^3$  метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

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

4. Газовая постоянная этана  $\text{C}_2\text{H}_6$  в СИ равна 277,6 кДж/(кг·град). Определить молекулярный вес газа, его плотность и удельный объем при нормальных физических условиях.

Ответ:  $\mu = 30,00$ ;  $\rho_0 = 1,343 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_0 = 0,745 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

5. В резервуаре емкостью  $12 \text{ м}^3$ , содержащем в себе воздух для пневматических работ, давление равно 8 ат по манометру при температуре воздуха  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ . После использования части воздуха для работ давление его упало до 4 ат, а температура до  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить, сколько воздуха израсходовано, если барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 1 \text{ атм}$ .

Ответ:  $M_1 = 124,9 \text{ кг}$ ;  $M_2 = 70,6 \text{ кг}$ ; израсходовано 54,3 кг.

6. Баллон, содержащий в себе кислород при давлении 118 ат по манометру и температуре  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ , перенесен в помещение с температурой  $+28 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Какое давление будет в баллоне, если газ нагреется до этой температуры? Атмосферное давление равно  $1 \text{ кгс/см}^2$ .

Ответ: 134 ат по манометру.

7. Предельно допустимое давление газа в баллоне во избежание взрыва равно  $150 \text{ кгс/см}^2$  по манометру. В этом баллоне находится газ при давлении  $135 \text{ кгс/см}^2$  и температуре  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

До какой температуры допустим нагрев газа?

Ответ: до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

8. Определить диаметр воздуховода для подачи 8000 кг/ч воздуха при абсолютном давлении 1,15 бар, если температура этого воздуха 22 °С. Скорость воздуха в воздуховоде равна 8 м/с.

*Ответ:* 510 мм.

9. Определить температуру газа, если при абсолютном давлении 5 кгс/см<sup>2</sup> объем 1 кмоль равен 15 м<sup>3</sup>.

*Ответ:* 611 °С.

10. Для измерения уровня жидкости в сосуде иногда используется устройство, схема которого изображена на рис. 1.

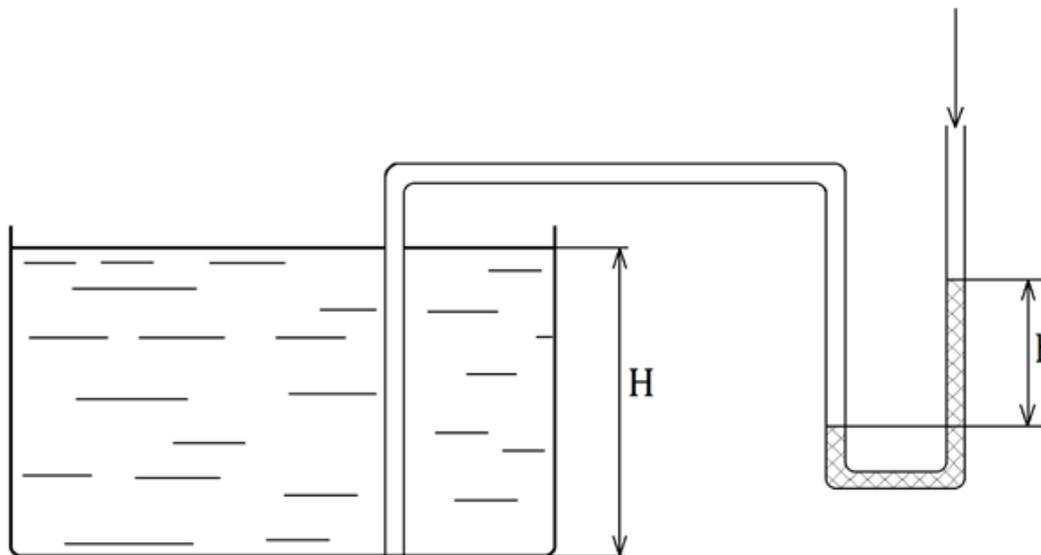


Рис. 1. Схема для решения задачи 10

Определить уровень бензина в баке, если  $h = 220$  мм рт. ст., а плотность бензина  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup>.

*Ответ:* 3,56 м.

## Глава 2. Газовые смеси

Давление газовой смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений компонентов, а массовый состав ее определяется массовыми долями каждого компонента. Для любого  $i$ -го газа массовая доля равна

$$m_i = \frac{M_i}{M}, \quad (7)$$

где  $M_i$  – масса  $i$ -го газа,

$M$  – общая масса всей смеси, равна  $\sum M_i$ .

Всегда  $\sum m_i = 1$ .

Если газы в смеси приведены к давлению смеси, т. е. каждый газ в смеси как бы сжат до давления смеси при постоянной температуре (изотермически), то новый предполагаемый объем  $i$ -го компонента будет определяться по формуле

$$V_i = V \frac{p_i}{p},$$

где  $V_i$  – парциальный объем  $i$ -го компонента,

$$V = \sum V_i.$$

Объемный состав смеси, наиболее часто используемый на практике и в расчетах, будет определяться объемными долями компонентов, т. е. для  $i$ -го компонента

$$r_i = \frac{V_i}{V}. \quad (8)$$

Всегда  $\sum r_i = 1$ .

Так как при одинаковых давлениях и температурах объемы молей любых газов одинаковы, то мольный состав одинаков с объемным.

Если задан объем или мольный состав смеси, то кажущийся молекулярный вес ее определяется по формуле

$$\mu_{см} = \sum r_i \mu_i. \quad (9)$$

Так же определяется плотность смеси:

$$\rho = r_i p_i.$$

После этого можно определить газовую постоянную смеси, а именно:

$$R_{см} = \frac{8314,3}{\mu_{см}} = \frac{8314,3}{\sum_1^n r_i \mu_i}. \quad (10)$$

Парциальные давления определяются уравнением

$$p_i = r_i p. \quad (11)$$

Если смесь задана массовым составом, то газовая постоянная смеси определяется так:

$$R_{см} = \sum_1^T m_i R_{i}, \quad (12)$$

а после найти кажущийся молекулярный вес можно по уравнению

$$\mu_{см} = \frac{8314,3}{R_{см}}. \quad (13)$$

Парциальное давление компонентов определяется по формуле

$$p_i = m_i \frac{R_i}{R_{см}} p. \quad (14)$$

В случае необходимости пересчет газовой смеси из объемного состава в массовый и обратно ведется по формулам:

$$r_i = \frac{m_i \mu_i}{\sum_1^n m_i}; m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i} = \frac{r_i \mu_i}{\mu_{см}} \quad (15)$$

### Задачи

**11.** Массовый состав газовой смеси следующий: водорода  $H_2$  – 4 %, метана  $CH_4$  – 40 %, этилена  $C_2H_2$  – 20 %, углекислоты  $CO_2$  – 12 %, азота  $N_2$  – 24 %.

Определить газовую постоянную, молекулярный вес, плотность, удельный объем смеси и парциальные давления компонентов. Давление смеси равно 1,5 бар, температура 27 °С.

### Решение

Так как дан массовый состав смеси, то прежде определяется газовая постоянная по уравнению (12). Но для большинства компонентов газовая постоянная нам не дана, поэтому она вычисляется по зависимости (4); молекулярный вес компонентов находится по атомным весам элементов. Расчетная формула получает вид:

$$R_{см} = 8314,3 \sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i} = 8314,3 \left( \frac{0,04}{2} + \frac{0,4}{16} + \frac{0,2}{28} + \frac{0,12}{44} + \frac{0,24}{28} \right) =$$

$$= 166,3 + 208 + 59,5 + 22,7 + 71,4 = 528 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$$

$$\mu = 15,75.$$

Плотность смеси при нормальных физических условиях

$$\rho_0 = \frac{15,75}{22,4} = 0,703 \text{ кг/м}^3,$$

при заданных условиях

$$\rho = 0,703 \frac{1,5 \cdot 27,3}{1,013 \cdot 300}$$

$$\rho = 0,95 \text{ кг/м}^3,$$

$$v = 1,055 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Парциальные давления определяют по формуле (14). В этой формуле произведение  $m_i R_i$  найдено выше при определении значения газовой постоянной, следовательно:

$$p_{H_2} = \frac{166,3}{528} \cdot 1,5 = 0,4724 \text{ бар}; p_{CH_4} = \frac{208}{528} \cdot 1,5 = 0,5905 \text{ бар};$$

$$p_{C_2H_2} = \frac{59,5}{528} \cdot 1,5 = 0,1701 \text{ бар}; p_{CO_2} = \frac{22,7}{528} \cdot 1,5 = 0,0639 \text{ бар};$$

$$p_{N_2} = \frac{71,4}{528} \cdot 1,5 = 0,2031 \text{ бар}; p = 1,5000 \text{ бар}.$$

*Ответ:*  $\mu = 15,75$ ;  $\rho_0 = 0,703 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho = 0,95 \text{ кг/м}^3$ ;  $v = 1,055 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $R_{см} = 528 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$

**12.** Природный газ «Грознефти» имеет следующий объемный состав: метан  $CH_4$  – 49,0 %; этан  $C_2H_6$  – 11,0 %; пропан  $C_3H_8$  – 17,0 %; бутан  $C_4H_{10}$  – 15,0 %; пентан  $C_5H_{12}$  – 4,0 %; углекислота  $CO_2$  – 1,0 %; азот  $N_2$  – 3,0 %. Этот газ смешивается с воздухом в пропорции 1 кг газа на 15 кг воздуха, имеющего массовый состав кислорода  $O_2$  – 23,2 % и азота  $N_2$  – 76,8 %.

Определить молекулярный вес, газовую постоянную полученной смеси, а также плотность ее при давлении 780 мм рт. ст. и температуре 37 °С.

*Решение*

Определяем молекулярный вес по формуле (9):

$$\mu_{\text{см}} = 0,49 \cdot 16 + 0,11 \cdot 30 + 0,17 \cdot 44 + 0,15 \cdot 58 + 0,04 \cdot 72 + 0,01 \cdot 44 + 0,03 \cdot 28 = 7,84 + 3,3 + 7,48 + 8,70 + 2,88 + 0,44 + 0,84 = 31,84.$$

По формуле (7) определяется массовый состав смеси:

$$m_{\text{CH}_4} = \frac{7,84}{31,48} = 0,249.$$

$$m_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{3,3}{31,48} = 0,105.$$

$$m_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{7,48}{31,48} = 0,238.$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{8,70}{31,48} = 0,276.$$

$$m_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = \frac{2,88}{31,48} = 0,091.$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{0,44}{31,48} = 0,014.$$

$$m_{\text{N}_2} = \frac{0,84}{31,48} = 0,027.$$

$$\Sigma = 1,000.$$

1 кг этого газа смешивается с 15 кг воздуха, массовый состав которого дан в задании; получается 16 кг смеси с массовым составом:

$$m_{\text{CH}_4} = \frac{0,249}{16} = 0,0156.$$

$$m_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{0,105}{16} = 0,0066.$$

$$m_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{0,238}{16} = 0,0147.$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \frac{0,276}{16} = 0,0172.$$

$$m_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = \frac{0,091}{16} = 0,0057.$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{0,014}{16} = 0,0009.$$

$$m_{\text{N}_2} = \frac{0,027}{16} + \frac{15}{16} \cdot 0,768 = 0,7218.$$

$$m_{\text{O}_2} = \frac{15}{16} \cdot 0,232 = 0,2175.$$

$$\Sigma = 1,000.$$

Найденный массовый состав смеси позволяет определить газовую постоянную по формулам (4) и (12).

$$R_{\text{см}} = 8314,3 \left( \frac{0,0156}{16} + \frac{0,0066}{30} + \frac{0,0147}{44} + \frac{0,0172}{58} + \frac{0,0057}{72} + \frac{0,0009}{44} + \frac{0,7218}{28} + \frac{0,2175}{32} \right) \\ = 286,90 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{град}.$$

Молекулярный вес и плотность смеси равны:

$$\mu = 28,98; \rho_0 = 1,294 \text{ кг/м}^3; \rho_r = 1,17 \text{ кг/м}^3.$$

*Ответ:*

$$\mu = 28,98; \rho_0 = 1,294 \text{ кг/м}^3; \rho_r = 1,17 \text{ кг/м}^3; R_{\text{см}} = 286,90 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

13. В резервуаре емкостью  $10 \text{ м}^3$  под давлением  $1,6 \text{ бар}$  находится газовая смесь, состоящая из  $8 \text{ кг}$  азота,  $6 \text{ кг}$  кислорода и некоторого количества углекислоты; температура смеси  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить количество углекислоты, парциальные давления компонентов, объемный состав смеси, средний молекулярный вес и газовую постоянную.

*Решение*

Применяя для компонентов смеси уравнение состояния (3), определяем парциальные давления:

$$\text{азота } p_{N_2} \cdot 10 = 8 \cdot 297 \cdot 300; p_{N_2} = 71\,280 \text{ Н/м}^2;$$

$$\text{кислорода } p_{O_2} \cdot 10 = 6 \cdot 260 \cdot 300; p_{O_2} = 46\,800 \text{ Н/м}^2;$$

$$\text{углекислоты } p_{CO_2} = 1,6 \cdot 100\,000 - 71\,280 - 46\,800 = 41\,920 \text{ Н/м}^2.$$

Из уравнения состояния для углекислоты находим:

$$M_{CO_2} = \frac{41920 \cdot 10}{189 \cdot 300} = 7,39 \text{ кг};$$

$$\text{масса смеси } M_{\text{см}} = 21,39 \text{ кг}.$$

Массовые доли определяем по уравнению (7):

$$m_{N_2} = 0,374; m_{O_2} = 0,281; m_{CO_2} = 0,345.$$

По формуле (12) определяется газовая постоянная:

$$R_{\text{см}} = 0,374 \cdot 297 + 0,281 \cdot 260 + 0,345 \cdot 189 = 294,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

Объемные доли находят по уравнениям (8) и (15):

$$r_{N_2} = 0,4455; r_{O_2} = 0,2925; r_{CO_2} = 0,262.$$

Молекулярный вес и газовую постоянную – по уравнениям (9) и (10):

$$\mu_{\text{см}} = 0,4455 \cdot 28 + 0,2925 \cdot 32 + 0,262 \cdot 44 = 33,6;$$

$$R_{\text{см}} = \frac{8314,3}{33,6} = 249,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}.$$

14. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий:  $CO_2 = 12,3 \%$ ;  $O_2 = 7,2 \%$ ;  $N_2 = 80,5 \%$ .

Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при  $V = 750 \text{ мм рт. ст.}$  и  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\text{Ответ: } \mu_{\text{см}} = 30,3; R_{\text{см}} = 274 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{град}; v_{\text{см}} = 2,94 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг/м}^3.$$

15. В  $1 \text{ м}^3$  воздуха содержится примерно  $0,21 \text{ м}^3$  кислорода и  $0,79 \text{ м}^3$  азота.

Определить массовый состав воздуха, его газовую постоянную и парциальные давления кислорода и азота.

Ответ:  $m_{\text{O}_2} = 0,232$ ;  $m_{\text{N}_2} = 0,768$ ;  $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ ;

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

16. В смеси окиси углерода CO и углекислоты CO<sub>2</sub> находится 12 кг окиси углерода; молекулярный вес смеси равен 41.

Определить массу смеси.

Ответ:  $R = 202,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{град}$ ;  $m_{\text{CO}} = 0,128$ ;  $m_{\text{CO}_2} = 0,872$ .

Масса смеси находится из пропорции:

$$\frac{M}{12} = \frac{1}{0,128}; M = 93,75 \text{ кг.}$$

17. В резервуаре емкостью  $125 \text{ м}^3$  находится коксовый газ при давлении  $p = 5$  бар и температуре  $t = 18$  °С. Объемный состав газа следующий:  $r_{\text{H}_2} = 0,46$ ;  $r_{\text{CH}_4} = 0,32$ ;  $r_{\text{CO}} = 0,15$ ;  $r_{\text{N}_2} = 0,07$ . При израсходовании некоторого количества газа давление его понизилось до 3 бар, а температура упала до 12 °С.

Определить массу израсходованного коксового газа.

Ответ:  $M = 2167$  кг.

18. Массовый состав смеси следующий: CO<sub>2</sub> = 18 %; O<sub>2</sub> = 12 %; N<sub>2</sub> = 70 %.

До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при  $t = 180$  °С 8 кг ее занимало объем, равный  $4 \text{ м}^3$ ?

Ответ:  $p = 0,24 \text{ МНм/м}^2$ .

19. Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа  $p_{\text{CO}_2} = 1,2$  бар, а давление смеси  $p_{\text{см}} = 3$  бар.

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

20. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящей из  $1 \text{ м}^3$  генераторного газа и  $1,5 \text{ м}^3$  воздуха, взятых при нормальных условиях. Найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа  $\rho$  принять равной  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ:  $R_{\text{см}} = 295 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ ;  $p_{\text{г.г.}} = 0,4 \cdot p_{\text{см}}$ ;  $p_{\text{возд}} = 0,6 \cdot p_{\text{см}}$ .

21. Для продуктов сгорания 1 кг бензина в моторе, имеющем состав в кмольях CO<sub>2</sub> – 0,07125; H<sub>2</sub>O – 0,0725; N<sub>2</sub> – 0,4476, O<sub>2</sub> – 0,01075, определить молекулярный вес, плотность, газовую постоянную и парциальные давления компонентов.

На выхлопе эти газы имеют давление 1,8 бар и температуру 900 °С.

Ответ:  $\mu = 28,72$ ;  $R_{\text{см}} = 289 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ ;  $\rho_{\text{см}} = 0,533 \text{ кг/м}^3$ ;

$p_{\text{CO}_2} = 0,213$  бар;  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,217$  бар;  $p_{\text{O}_2} = 0,032$  бар;  $p_{\text{N}_2} = 1,338$  бар.

### Глава 3. Теплоемкости газов

Теплоемкость газа зависит от процесса, который происходит с газом. Основные обозначения теплоемкостей в процессе:

при постоянном объеме газа –  $c_v$ ;

при постоянном давлении газа –  $c_p$ .

Зависимость между ними выражают формулами:

$$c_p - c_v = R; \quad (16)$$

$$\frac{c_p}{c_v} = k, \quad (17)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Теплоемкость может быть отнесена:

к 1 кмоль газа:  $\mu c_v$  и  $\mu c_p$  – мольные теплоемкости;

к 1 кг газа:  $c_v$  и  $c_p$  – массовые теплоемкости;

к 1 м<sup>3</sup> газа, взятом при нормальных физических условиях состояния (273 °К и давлении 760 мм рт. ст.):  $c'_v$  и  $c'_p$  – объемные теплоемкости.

Зависимость между ними такова:

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}; \quad c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}, \quad (18)$$

$$c'_v = \frac{\mu c_v}{22,4} \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град}; \quad c'_p = \frac{\mu c_p}{22,4} \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град}. \quad (19)$$

Объемная и массовая теплоемкости связаны между собой зависимостью

$$c = c \cdot \rho_H, \quad (20)$$

где  $\rho_H$  – плотность газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газа зависит от его температуры.

По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкости. Истинную теплоемкость для технических расчетов определяют по линейной зависимости

$$c = c_0 + a \cdot t. \quad (21)$$

Среднюю теплоемкость в пределах температур  $t_1$  и  $t_2$  вычисляют по формуле

$$|c|_{t_1}^{t_2} = c_0 + \frac{a}{2} \cdot (t_1 + t_2), \quad (22)$$

где  $c_0$  – теплоемкость при 0 °С;  $a$  – постоянная для данного газа;  $t_1$  и  $t_2$  – интервал температур.

Для точных расчетов используются табличные данные (приложение). Расчет ведется по формуле

$$|c|_{t_1}^{t_2} = \frac{|c|_0^{t_2} \cdot t_2 - |c|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}. \quad (23)$$

Для приближенных расчетов и при невысоких температурах можно принимать следующее значение мольных теплоемкостей (см. табл. 2).

Таблица 2

Приближенные значения мольных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении ( $c = const$ )

Газы	$\mu c_v$	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_p$
	в кДж/(кмоль·град)		в ккал/(кмоль·град)	
Одноатомные	12,56	20,93	3	5
Двухатомные	20,93	29,31	5	7
Трех- и многоатомные	29,31	37,68	7	9

В технической термодинамике большое значение имеет отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме:

$$k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}.$$

Если принять теплоемкость величиной постоянной, то на основании таблицы 2 получаем:

для одноатомных газов  $k = 1,67$ ;

для двухатомных газов  $k = 1,4$ ;

для трех- и многоатомных газов  $k = 1,29$ .

Теплоемкость газовой смеси определяется по формулам:

мольная теплоемкость:

$$\mu c_{см} = \sum_1^n r_i \cdot \mu c_i; \quad (24)$$

массовая теплоемкость:

$$c_{см} = \sum_1^n m_i \cdot c_i; \quad (25)$$

объемная теплоемкость:

$$c'_{см} = \sum_1^n r_i \cdot c'_i. \quad (26)$$

### Задачи

**23.** Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $c = const$ .

*Решение*

По таблице 2 для двухатомных газов:

$$\mu c_v = 20,93 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град};$$

$$\mu c_p = 29,31 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град}.$$

Следовательно, для кислорода (и любого двухатомного газа):

$$c'_v = \frac{\mu c_v}{22,4} = \frac{20,93}{22,4} = 0,934 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град};$$

$$c'_p = \frac{\mu c_p}{22,4} = \frac{29,31}{22,4} = 1,308 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град.}$$

24. Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах 200–800 °С (в кДж/(кг·град)), считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

*Решение*

По уравнению (23)

$$|c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{|c_{pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - |c_{pm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь таблицей XI, получаем для воздуха

$$|c_{pm}|_0^{800} = 1,0710 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$|c_{pm}|_0^{200} = 1,0115 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Отсюда

$$|c_{pm}|_{200}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

25. Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении для кислорода в пределах от 350 до 1000 °С:

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

*Решение*

а) из формулы (23)

$$|c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{|c_{pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - |c_{pm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь таблицей IV, получаем, что для кислорода

$$|c_{pm}|_0^{350} = \frac{0,9500 + 0,9651}{2} = 0,9576 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$|c_{pm}|_0^{1000} = 1,0350 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Отсюда

$$|c_{pm}|_{350}^{1000} = \frac{1,0350 \cdot 1000 - 0,9576 \cdot 350}{1000 - 350} = 1,077 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

б) пользуясь таблицей 3 и формулой (22), получаем

$$|c_{pm}|_0^{350} = 0,9127 + 0,00012724 \cdot t;$$

$$|c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = 0,9127 + 0,00012724(350 + 1000) = 1,085 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

26. Воздух в количестве 6 м<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 3$  бар и температуре  $t_1 = 25$  °С нагревается при постоянном давлении до  $t_2 = 130$  °С.

Определить количество подведенного к воздуху тепла (в ккал), считая  $c = const$ .

*Решение*

Количество тепла определяется по формуле

$$Q_p = M \cdot c_p(t_2 - t_1) = V_H \cdot c'_p(t_2 - t_1).$$

Масса газа определяется из уравнения (2):

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6}{287 \cdot 298} = 21 \text{ кг},$$

а объем газа при нормальных условиях – по уравнению

$$V_H = \frac{P_1 V_1 T_H}{P_H T_1} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 298} = 16,3 \text{ м}^3.$$

На основании формул (18) и (19) и таблицы 2 определяем

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{7}{28,96} = 0,242 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$c'_p = \frac{\mu c_p}{22,4} = \frac{7}{22,4} = 0,312 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

Следовательно,

$$Q_p = M \cdot c_p (t_2 - t_1) = 21 \cdot 0,242 \cdot 105 = 534 \text{ ккал};$$

$$Q_p = V_H \cdot c'_p (t_2 - t_1) = 16,3 \cdot 0,312 \cdot 105 = 534 \text{ ккал}.$$

27. В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении  $p_1 = 2$  бар и температуре  $t_1 = 20$  °С.

Какое количество тепла необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до  $t_2 = 300$  °С? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

*Решение*

Количество тепла, сообщаемое газу при  $v = const$ , можно определить по формуле

$$Q_v = V_H (c'_{vm_2} \cdot t_2 - c'_{vm_1} \cdot t_1),$$

где  $V_H$  – объем газа, заключенного в сосуде, приведенного к нормальным условиям. Величина  $V_H$  определяется по уравнению

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_H V_H}{T_H}.$$

Следовательно,

$$V_H = \frac{p \cdot V \cdot T_H}{p_H \cdot T} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 273}{1,013 \cdot 293} = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значение теплоемкости определяем по таблице IV, и, следовательно,

$$Q_v = 0,552(0,9852 \cdot 300 - 0,9374 \cdot 20) = 0,552 \cdot 276,8 = 152,8 \text{ кДж}.$$

Конечное давление можно определить, если воспользоваться характеристическим уравнением для начального и конечного состояния кислорода:

$$p_1 v = RT_1, p_2 v = RT_2.$$

Следовательно,

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1};$$

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \frac{573}{293} = 3,9 \text{ бар}.$$

**28.** Найти количество тепла, необходимое для нагрева  $1 \text{ м}^3$  (при нормальных условиях) газовой смеси состава  $r_{\text{CO}_2} = 14,5 \%$ ;  $r_{\text{O}_2} = 6,5 \%$ ;  $r_{\text{N}_2} = 79,0 \%$ ; от  $200$  до  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $p = \text{const}$  и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

*Решение*

Количество тепла определим по формуле

$$q_p = c'_{pm2см} \cdot t_2 - c'_{pm1см} = \sum_1^n c'_{pm2i} \cdot r_i \cdot t_2 - \sum_1^n c'_{pm1i} \cdot r_i \cdot t_1 =$$

$$= (c'_{pm2\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + c'_{pm2\text{O}_2} \cdot r_{\text{O}_2} + c'_{pm2\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2}) \cdot t_2 -$$

$$- (c'_{pm1\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + c'_{pm1\text{O}_2} \cdot r_{\text{O}_2} + c'_{pm1\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2}) \cdot t_1.$$

Подставляем значения соответствующих теплоемкостей из таблицы IV, находим

$$q_p = (2,2638 \cdot 0,145 + 1,5005 \cdot 0,065 + 1,4202 \cdot 0,79) \cdot 1200 -$$

$$- (1,7873 \cdot 0,145 + 1,3352 \cdot 0,065 + 1,3038 \cdot 0,79) \cdot 200 = 1582,2 \text{ кДж/м}^3.$$

**29.** Баллон емкостью  $100 \text{ л}$  заполнен окисью углерода под абсолютным давлением  $50 \text{ ат}$  и при температуре  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; после внесения его в теплое помещение температура газа поднялась до  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить количество теплоты, приобретенное газом, и давление в баллоне после нагревания.

*Ответ:* газ в баллоне имеет массу  $M = 6,65 \text{ кг}$ ;  $p_k = 50 \frac{293}{248} = 59 \text{ ат}$ ;  
 $c_v = 0,742 + 0,0001007t$ ;  $Q_v = 6,65 [0,742 + 0,0001007(-5)] \cdot 45 = 221,6 \text{ кДж}$ .

Интерполяционные формулы для истинных  
и средних молярных теплоемкостей газов

Газ	Истинная молярная теплоемкость $\mu_{C_p}$ при $p = const$ , кДж/ (кмоль·град)	Средняя молярная теплоемкость $\mu_{C_{pm}}$ при $p = const$ , кДж/(кмоль·град)	Истинная молярная теплоемкость $\mu_{C_p}$ при $p = const$ , ккал/(кмоль·град)	Средняя молярная теплоемкость $\mu_{C_{pm}}$ при $p = const$ , ккал/(кмоль·град)
<b>В пределах от 0 до 1000 °С</b>				
O <sub>2</sub>	29,582 + 0,0069706 t	29,2080 + 0,0040717 t	7,0651 + 0,016649 t	6,9762 + 0,0009725 t
N <sub>2</sub>	28,5372 + 0,0053905 t	28,7340 + 0,0023488 t	6,8160 + 0,0012875 t	6,8630 + 0,0005610 t
CO	28,7395 + 0,0058862 t	28,8563 + 0,0026808 t	6,8643 + 0,0014059 t	6,8922 + 0,0006403 t
Воздух	28,7558 + 0,0057208 t	28,8270 + 0,0027080 t	6,8682 + 0,0069706 t	6,8852 + 0,0006468 t
H <sub>2</sub> O	32,8367 + 0,0116611 t	33,1494 + 0,0052749 t	7,8429 + 0,0027852 t	7,9176 + 0,0012599 t
SO <sub>4</sub>	42,8728 + 0,0132043 t	40,4386 + 0,0099562 t	10,2400 + 0,00315318 t	9,6585 + 0,0023780 t
<b>В пределах от 0 до 1500 °С</b>				
H <sub>2</sub>	28,3446 + 0,0031518 t	28,7210 + 0,0012008 t	6,7700 + 0,0007528 t	6,8599 + 0,0002868 t
CO <sub>2</sub>	41,3597 + 0,0144985 t	38,3955 + 0,0105838 t	9,8786 + 0,0034629 t	9,1706 + 0,0025279 t
<b>В пределах от 1000 до 2700 °С</b>				
O <sub>2</sub>	33,8603 + 0,021951 t	31,5731 + 0,0017572 t	8,0874 + 0,0005243 t	7,5411 + 0,0004197 t
N <sub>2</sub>	32,7466 + 0,0016517 t	29,7815 + 0,0016835 t	7,8214 + 0,0003945 t	7,1132 + 0,0004021 t
CO	33,6991 + 0,0013406 t	30,4242 + 0,0015579 t	8,0489 + 0,0003202 t	7,2667 + 0,0003721 t
Воздух	32,9564 + 0,0017806 t	30,1533 + 0,0016973 t	7,8715 + 0,0004253 t	7,2020 + 0,0004054 t
H <sub>2</sub> O	40,2393 + 0,0059854 t	34,5118 + 0,0045979 t	9,6110 + 0,0014296 t	8,2430 + 0,0010982 t
<b>В пределах от 1500 до 3000 °С</b>				
H <sub>2</sub>	31,0079 + 0,0020243 t	28,6344 + 0,0014821 t	7,4061 + 0,0004835 t	6,8392 + 0,0003540 t
CO <sub>2</sub>	56,87678 + 0,0021738 t	48,4534 + 0,0030032 t	13,5848 + 0,0005192 t	11,5729 + 0,0007173 t

Продолжение таблицы 3

Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов при постоянном давлении и при постоянном объеме

Газ	Массовая теплоемкость $c_{pm}$ , кДж/(кг·град)	Объемная теплоемкость $c'_{pm}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	Массовая теплоемкость $c_{pm}$ , ккал/(кг·град)	Объемная теплоемкость $c'_{pm}$ , ккал/(м <sup>3</sup> ·град)	Объемная теплоемкость $c'_{pm}$ , ккал/(м <sup>3</sup> ·град)
O <sub>2</sub>	0,9127 + 0,00012724 t 0,6527 + 0,00012724 t	1,3046 + 0,00018183 t 0,9337 + 0,00018183 t	0,2180 + 0,00003039 t 0,1559 + 0,00003039 t	0,2180 + 0,00003039 t 0,1559 + 0,00003039 t	0,3116 + 0,0004343 t 0,2230 + 0,0004343 t
N <sub>2</sub>	1,0258 + 0,00008382 t 0,7289 + 0,00008382 t	1,2833 + 0,00010492 t 0,9123 + 0,00010492 t	0,2450 + 0,00002002 t 0,1741 + 0,00002002 t	0,2450 + 0,00002002 t 0,1741 + 0,00002002 t	0,3065 + 0,00002506 t 0,2179 + 0,00002506 t
CO	1,0304 + 0,00009575 t 0,7335 + 0,00009575 t	1,2833 + 0,00011966 t 0,9173 + 0,00011966 t	0,2461 + 0,00002287 t 0,1752 + 0,00002287 t	0,2461 + 0,00002287 t 0,1752 + 0,00002287 t	0,3077 + 0,00002858 t 0,2191 + 0,00002858 t
Воздух	0,9952 + 0,00009349 t 0,7084 + 0,00009349 t	1,2870 + 0,00012091 t 0,9161 + 0,00012091 t	0,2377 + 0,00002233 t 0,1692 + 0,00002233 t	0,2377 + 0,00002233 t 0,1692 + 0,00002233 t	0,3074 + 0,00002888 t 0,2188 + 0,00002888 t
H <sub>2</sub> O	1,8401 + 0,00029278 t 1,3783 + 0,00029278 t	1,4800 + 0,00023551 t 1,1091 + 0,00023551 t	0,4395 + 0,00006993 t 0,3292 + 0,00006993 t	0,4395 + 0,00006993 t 0,3292 + 0,00006993 t	0,3535 + 0,00005625 t 0,2649 + 0,00005625 t
SO <sub>2</sub>	0,6314 + 0,00015541 t 0,5016 + 0,00015541 t	1,8472 + 0,00004547 t 1,4763 + 0,00004547 t	0,1508 + 0,00003712 t 0,1198 + 0,00003712 t	0,1508 + 0,00003712 t 0,1198 + 0,00003712 t	0,4412 + 0,00001086 t 0,3526 + 0,00001086 t
В пределах от 0 до 1500 °С					
H <sub>2</sub>	14,2494 + 0,00059574 t 10,1241 + 0,00059574 t	1,2803 + 0,00005355 t 0,9094 + 0,00005355 t	3,4034 + 0,00014229 t 2,4181 + 0,00014229 t	3,4034 + 0,00014229 t 2,4181 + 0,00014229 t	0,3058 + 0,00001279 t 0,2172 + 0,00001279 t
CO <sub>2</sub>	0,8725 + 0,00024053 t 0,6837 + 0,00024053 t	1,7250 + 0,00004756 t 1,3540 + 0,00004756 t	0,2084 + 0,00005745 t 0,1633 + 0,00005745 t	0,2084 + 0,00005745 t 0,1633 + 0,00005745 t	0,4120 + 0,00001136 t 0,3234 + 0,00001136 t

30. Воздух в количестве  $800 \text{ м}^3$  при температуре  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  охлаждается до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  при постоянном давлении, равном  $1,5 \text{ бар}$ .

Определить среднюю теплоемкость и количество теплоты, выделенной при охлаждении.

$$\text{Ответ: } M = 183,9 \text{ кг; } \mu c_p = \frac{33,66 \cdot 2000 - 29,29 \cdot 200}{1800} = 34,12 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град};$$

$$c_p = \frac{34,12}{29} = 1,176 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}; Q = 183,9 \cdot 1,176(2000 - 200) = 389280 \text{ кДж.}$$

31. Найти среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  и  $c'_{vm}$  в пределах от  $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  для  $\text{CO}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ дать в  $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$  и  $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

Ответ:

$$c_{pm} = 1,1262 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 0,2692 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град};$$

$$c'_{vm} = 1,0371 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град} = 0,2479 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}.$$

32. Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах  $200\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ дать в  $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$  и  $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$ .

$$\text{Ответ: } c_{vm} = 0,8164 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = 0,195 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$$

33. Баллон, в котором находится азот, представляет собой цилиндр длиной  $4 \text{ м}$  и диаметром  $1,2 \text{ м}$ . Абсолютное давление газа в баллоне  $8 \text{ бар}$ , а начальная температура  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вследствие разности температур азота и окружающего воздуха азот охлаждается.

Определить, на сколько градусов понизится температура азота через  $2 \text{ часа}$ , если  $1 \text{ м}^2$  поверхности баллона теряет в окружающее пространство  $12 \text{ кДж}$  теплоты в течение часа.

Ответ: газ охладится на  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

34. Вентиляционная система помещения с внутренним объемом, равным  $4000 \text{ м}^3$ , осуществляет четырехкратный обмен воздуха в час.

Определить часовой расход горючего газа на нагрев наружного воздуха в калориферной камере от  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры внутри помещения  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ , если давление воздуха равно  $780 \text{ мм рт. ст.}$ , теплотворная способность газа  $35\,300 \text{ кДж/м}^3$ , а КПД калориферной камеры  $80 \%$ .

Ответ: часовой расход воздуха можно рассчитать так:

$$V = 16000 \text{ м}^3/\text{ч}, V_0 = 17380 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$c'_p = 1,2987 + 0,000108t \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град};$$

$$Q_p = \frac{903000}{353000 \cdot 0,8} = 32 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ (при } 760 \text{ мм рт. ст. и } 0 \text{ }^\circ\text{C}).$$

35. Мольный состав продуктов сгорания  $1 \text{ кг}$  бензина в моторе следующий:  $\text{CO}_2 - 0,07125$ ,  $\text{H}_2\text{O} - 0,0725$ ,  $\text{O}_2 - 0,0215$ ,  $\text{N}_2 - 0,4883$ ; температура этих газов на выходе равна  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить процент тепловых потерь с уходящими газами; теплотворная способность бензина равна 43 950 кДж/кг.

Ответ:  $Q_p = 19\,919$  кДж.

Потери: 
$$\frac{19\,919}{43\,950} \cdot 100\% = 45,4\%$$

**36.** Продукты сгорания топлива поступают в газоход парового котла при температуре газов  $t'_2 = 1100^\circ\text{C}$  и покидают газоход при температуре  $t''_2 = 700^\circ\text{C}$ . Состав газов по объему:  $r_{\text{CO}_2} = 11\%$ ;  $r_{\text{O}_2} = 6\%$ ;  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 8\%$ ;  $r_{\text{N}_2} = 75\%$ .

Определить, какое количество тепла теряет 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, взятой при нормальных условиях.

Ответ:  $Q_p = 697,5$  кДж/м<sup>3</sup> = 166,7 ккал/м<sup>3</sup>.

**37.** Воздух в количестве 800 м<sup>3</sup> при температуре 2000 °С охлаждается до 200 °С при постоянном давлении, равном 1,5 бар.

Определить среднюю теплоемкость и количество теплоты, выделенной при охлаждении.

Ответ:  $\mu c_p = \frac{33,66 \cdot 2000 - 29,29 \cdot 200}{1800} = 34,12$  кДж/кмоль · град;

$$c_p = \frac{34,12}{29} = 1,176 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$Q = 183,9 \cdot 1,176(2000 - 200) = 389280 \text{ кДж.}$$

**38.** Смесь азота и водорода в массовом отношении 4:1 нагреется при  $p = \text{const}$  от 200 до 1200 °С.

Найти среднюю теплоемкость в пределах этих температур и расход теплоты для нагревания 100 кг смеси.

Ответ: массовый состав смеси:  $r_{\text{N}_2} = 0,8$ ;  $r_{\text{H}_2} = 0,2$ .

Пересчет на объемный состав дает:

$$r_{\text{N}_2} = 0,2224; r_{\text{H}_2} = 0,7776;$$

$$\mu = 0,2224 \cdot 28 + 0,7776 \cdot 2 = 7,782.$$

Число киломолей нагреваемой смеси:

$$M = \frac{100}{7,782} = 12,85 \text{ кмоль.}$$

Средняя теплоемкость смеси:

$$\mu c_p = 28,82 + 0,00144t = 30,836 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град};$$

$$Q_p = 396240 \text{ кДж.}$$

## Глава 4. Термодинамические процессы

Основное уравнение для термодинамических процессов представляет собой математическую зависимость между тремя величинами: внешняя теплота (подводимая или отводимая от работающего тела), изменение внутренней энергии и внешняя работа газа

$$dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv, \quad (27)$$

или

$$q = \Delta u + \ell,$$

где  $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$  – изменение внутренней энергии;

$\ell = \int_1^2 p \cdot dv$  – внешняя работа.

Уравнение политропного процесса имеет вид  $pv^n = const$ , и зависимость между параметрами газа в процессе следующая:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (28)$$

Теплота, участвующая в процесс при  $c = const$ , определяется по формуле

$$q = c(T_2 - T_1) \text{ Дж/кг},$$

или

$$Q = M \cdot c_v \frac{n - k}{n - 1} (t_2 - t_1) \text{ Дж},$$

где

$$c = c_v \frac{n - k}{n - 1} \text{ – теплоемкость;} \quad (29)$$

$$n = \frac{k\varphi - 1}{\varphi - 1} \text{ – показатель политропы;} \quad (30)$$

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q} \text{ – распределение энергии в процессе,} \quad (31)$$

которая может быть определена из выражения

$$\varphi = \frac{n - 1}{n - k'} \quad (32)$$

где  $n$  – показатель политропы, а  $k' = \frac{c_p}{c_v}$ .

Работа 1 кг газа в политропном процессе выражается формулой

$$\ell = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n - 1} = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n - 1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (33)$$

Задавая определенные значения показателя  $n$ , получим частные случаи политропного процесса:

а) изохорный процесс:

$$n = \infty; c = c_v; \ell = 0; q = c_v(T_2 - T_1); \quad (34)$$

б) изобарный процесс:

$$n = 0; c = c_p; \ell = R(T_2 - T_1) = p(v_2 - v_1); \quad (35)$$

$$q = c_p(T_2 - T_1); \quad (36)$$

в) изотермический процесс:

$$n = 1; c = \infty; \ell = q = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (37)$$

г) адиабатный процесс:

$$n = k; c = 0; \ell = -\Delta U = c_v(T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (38)$$

### Задачи

**39.** В закрытом сосуде заключен газ при разрежении  $p_1 = 50$  мм рт. ст. и температуре  $t_1 = 70$  °С. Показание барометра – 760 мм рт. ст.

До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало равным  $p_2 = 100$  мм рт. ст.?

#### Решение

Так как процесс происходит при  $v = const$ , то соотношение параметров следующее:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Подставляя значения, получаем

$$\frac{760 - 50}{760 - 100} = \frac{273 + 70}{T_2},$$

отсюда 
$$T_2 = \frac{660 \cdot 343}{710} = 318,8 \text{ °K}; t_2 = 45,8 \text{ °C}.$$

**40.** В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,6$  м<sup>3</sup> содержится воздух при давлении  $p_1 = 5$  бар и температуре  $t_1 = 20$  °С. 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, определяем массу воздуха в сосуде:

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,6}{287 \cdot 293} = 3,57 \text{ кг}.$$

Количество тепла, отводимого от воздуха в процессе, определяется уравнением (34):

$$Q = M \cdot c_{vm}(t_2 - t_1),$$

откуда

$$t_2 = \frac{Q}{M \cdot c_{vm}} + t_1 = \frac{-105}{3,57 \cdot 0,723} + 20 = -40,7 + 20 = -20,7 \text{ °C}.$$

Значение  $c_{vm} = 0,723$  кДж/кг·град получено из выражения

$$c_{vm} = \frac{\mu c_{vm}}{\mu} = \frac{20,93}{28,96} \text{ (для двухатомных газов)}.$$

Из соотношения параметров при изохорном процессе

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

имеем

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 5 \frac{273 - 20,7}{293} = 4,3 \text{ бар.}$$

41. Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30 °С.

Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при  $v = const$  до 16 бар. Принять зависимость  $c = f(t)$  нелинейной. Ответ дать в ккал.

*Решение*

Из соотношения параметров изохорного процесса

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

получаем:

$$T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К} = 333 \text{ °С.}$$

Количество тепла определится по формуле

$$q_v = c_{vm_2} \cdot t_2 - c_{vm_1} \cdot t_1.$$

Пользуясь таблицей XI, находим

$$c_{vm_1} = 0,7173 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}; c_{vm_2} = 0,7351 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Следовательно,

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

Масса воздуха, находящегося в резервуаре, определяется из уравнения (2):

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг,}$$

а сообщенное ему количество тепла равно

$$Q_v = 0,8278 \cdot 223,2 = 184,8 \text{ кДж} = 44,2 \text{ ккал.}$$

42. В резервуаре, имеющем объем  $V = 0,5 \text{ м}^3$ , находится углекислый газ при давлении  $p_1 = 6 \text{ бар}$  и температуре  $t_1 = 527 \text{ °С}$ .

Как изменится температура газа, если отнять от него при постоянном объеме 436 кДж? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

*Решение*

Так как конечное давление газа неизвестно, то для определения конечной температуры нельзя воспользоваться соотношением параметров в изохорном процессе. Обратимся поэтому к выражению, определяющему количество отведенного тепла в изохорном процессе. Согласно формуле (34):

$$Q_v = M \cdot c_{vm}(t_2 - t_1).$$

В этом уравнении

$$Q_v = -436 \text{ кДж,}$$

а масса газа, согласно формуле (2):

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{189 \cdot 800} = 1,98 \text{ кг.}$$

Средняя теплоемкость углекислого газа в пределах от 527 °С до  $t_2$  по таблице 3 равна

$$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053(527 + t_2).$$

Подставляя соответствующие значения величин в уравнения для  $Q_v$  получаем

$$Q_v = -100 = 1,98[0,6837 + 0,00024053(527 + t_2)] \cdot (t_2 - 527).$$

Это выражение является относительно  $t_2$  квадратным уравнением, только один корень которого имеет физический смысл. Однако его решают обычно не как квадратное уравнение, а методом последовательного приближения (подбором). Для этого задаются значением  $t_2$ , после чего определяют значение теплоемкости  $c_{vm}$  и, подставляя в уравнение  $Q_v$ , проверяют, получается ли тождество. Очевидно, что только в этом случае выбранное значение  $t_2$  является правильным.

Указанным путем значение  $t_2$  получается равным 276 °С.

**43.** В цилиндре находится воздух при давлении  $p = 5$  бар и температуре  $t_1 = 400$  °С. От воздуха отнимается тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура  $t_2 = 0$  °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*

Количество отнятого тепла вычисляем по формуле

$$Q_p = V_H \cdot c'_{pm}(t_2 - t_1),$$

где  $V_H$  – объем воздуха при нормальных условиях. Значение его легко определить из выражения:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_H V_H}{T_H};$$

$$V_H = \frac{pV T_H}{p_H T} = \frac{5 \cdot 0,4 \cdot 273}{1,013 \cdot 673} = 0,8 \text{ м}^3.$$

По таблице XI находим

$$c_{pm} = 1,3289 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град.}$$

Следовательно,

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

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

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

Масса воздуха определяется из характеристического уравнения

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,4}{287 \cdot 673} = 1,035 \text{ кг.}$$

Из таблицы XI находим

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

Следовательно,

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

Конечный объем определяется из уравнения

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1};$$

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

Изменение внутренней энергии:

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

Пользуясь таблицей XI, находим

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

Следовательно,

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

Работа, затраченная на сжатие, определяется по формуле (35):

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

44. 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

$$dq = du + d\ell$$

может быть представлено в виде

$$\frac{du}{dq} + \frac{d\ell}{dq} = 1.$$

Величина

$$\frac{d\ell}{dq} = 1 - \frac{du}{dq}$$

определяет долю от всего подводимого к газу тепла, которая превращается в работу расширения. Так как для идеального газа в процессе  $p = \text{const}$ ,

$$du = c_v dt$$

и

$$dq = c_p dt,$$

то

$$\frac{d\ell}{dq} = 1 - \frac{c_v \cdot dt}{c_p \cdot dt}.$$

Принимая  $k = 1,4$ , получаем

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

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

45. 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. Состав газовой смеси следующий:  $m_{CO_2} = 15\%$ ;  $m_{O_2} = 5\%$ ;  $m_{H_2O} = 6\%$ ;  $m_{N_2} = 74\%$ .

Определить количество тепла, подведенное к 1 кг газообразных продуктов сгорания, считая теплоемкость нелинейно зависящей от температуры.

*Решение*

Так как рассматриваемый процесс изобарный, то количество тепла равно разности энтальпий конечного и начального состояний, т. е.

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Известно, что  $i = c_{pm}t$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} q &= \sum_1^n c_{pm2i} \cdot m_i t_2 - \sum_1^n c_{pm1i} \cdot m_i t_1 = \\ &= (c_{pm2CO_2} \cdot m_{CO_2} + c_{pm2O_2} \cdot m_{O_2} + c_{pm2H_2O} \cdot m_{H_2O} + c_{pm2N_2} \cdot m_{N_2}) t_2 - \\ &\quad - (c_{pm1CO_2} \cdot m_{CO_2} + c_{pm1O_2} \cdot m_{O_2} + c_{pm1H_2O} \cdot m_{H_2O} + c_{pm1N_2} \cdot m_{N_2}) t_1. \end{aligned}$$

На основании таблиц VII, IV, IX и V получаем

$$\begin{aligned} q_p &= (1,2259 \cdot 0,15 + 1,0940 \cdot 0,05 + 2,4166 \cdot 0,06 + 1,1857 \cdot 0,74) \cdot 1900 - \\ &\quad - (1,0828 \cdot 0,15 + 0,9793 \cdot 0,05 + 1,9778 \cdot 0,06 + 1,0660 \cdot 0,74) \cdot 500 = \\ &= 1836 \text{ кДж/кг} = 438,8 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

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

*Решение*

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

$$\ell_1 = R_1 T \ln \frac{p_2}{p_1}; \ell_2 = R_2 T \ln \frac{p_2}{p_1}; \ell_3 = R_3 T \ln \frac{p_2}{p_1}; \text{ и т. д.,}$$

поэтому

$$\ell_1 : \ell_2 : \ell_3 = R_1 : R_2 : R_3,$$

т. е. работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

**47.** 1 кг воздуха при начальной температуре  $t_1 = 30$  °С и давлении  $p_1 = 1$  бар сжимается адиабатно до конечного давления  $p_2 = 10$  бар.

Определить конечный объем, конечную температуру и затрачиваемую работу.

*Решение*

Из соотношения параметров в адиабатном процессе по уравнению (28) находим

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

откуда

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

Принимая  $k = 1,4$ , получаем

$$T_2 = 303 \cdot 10^{\frac{0,4}{1,4}} = 303 \cdot 10^{0,286} = 303 \cdot N;$$

$$\lg N = \lg 10^{0,286} = 0,286 \lg 10 = 0,286;$$

$$N = 1,931$$

$$T_2 = 303 \cdot 1,931 = 585^\circ\text{K};$$

$$t_2 = 312^\circ\text{C}.$$

Значение величины  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$  для адиабатного сжатия при  $\frac{p_2}{p_1} = 10$ :

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1,931.$$

Затраченная работа рассчитывается по уравнению (33):

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

Конечный объем определяется из уравнения состояния:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 585}{10 \cdot 10^5} = 0,168 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**48.** В газовом двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на  $200^\circ\text{C}$  ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия  $p_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ . Показатель адиабаты  $k = 1,36$ ,  $R = 314$  Дж/кг·град, температура самовоспламенения равна  $650^\circ\text{C}$ .

Определить величину работы сжатия и степень сжатия  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ .

*Решение*

Из соотношения параметров в адиабатном процессе (формула (28)) имеем:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{723}{343}\right)^{\frac{1}{0,36}};$$

$$\varepsilon = 2,108^{2,776} = 7,92.$$

Работа сжатия рассчитывается по уравнению (33):

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

**49.** 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  $p_1 = 1$  бар и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ .

*Решение*

Конечная температура определяется по формуле (28):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1},$$

отсюда

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = 373 \cdot 14^{0,4} = 373 \cdot 2,86 = 1067^\circ\text{K}.$$

Конечное давление определяется из уравнения (28):

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

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 \cdot \left(\frac{1067}{373}\right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 1 \cdot 2,86^{3,5} = 40 \text{ бар.}$$

**50.** В баллоне емкостью 100 л находится воздух при давлении  $p_1 = 50$  бар и температуре  $t_1 = 20$  °С. Давление окружающей среды  $p_2 = 1$  бар.

Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и 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*

1. Работа изотермического расширения определяется по уравнению (37):

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,303 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \ln 50 = 1956 \text{ кДж.}$$

Конечный объем воздуха равен:

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} = 0,1 \cdot 50 = 50 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$p_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot (50 - 0,1) = 490 \text{ кДж.}$$

Таким образом, полезная работа воздуха

$$1956 - 490 = 1466 \text{ кДж.}$$

2. Работа адиабатного расширения определяется по формуле (38):

$$L_{\text{ад}} = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{0,4} \left[ 1 - \left(\frac{1}{50}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] =$$

$$= 1\,250\,000(1 - 0,020 \cdot 0,286) = 1\,250\,000 \cdot 0,672 = 840\,000 \text{ Дж} = 840 \text{ кДж.}$$

Конечный объем воздуха:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,1 \cdot 50^{\frac{1}{1,4}} = 0,1 \cdot 16,36 = 1,636 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$p_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot 1,536 = 153,6 \text{ кДж,}$$

и, таким образом, полезная работа воздуха составит

$$840 - 153,6 = 686 \text{ кДж.}$$

Минимальная температура определяется из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1};$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = 293 \cdot 0,06110 \cdot 0,4 = 293 \cdot 0,327 = 96^\circ\text{K} = -177^\circ\text{C}.$$

**51.** Воздух адиабатно расширяется в цилиндре так, что конечный его объем в 5 раз больше начального. Сравнить работу полного расширения и расширения на первой половине хода поршня.

*Решение*

Величину работы полного расширения (рис. 2) находим по уравнению (38):

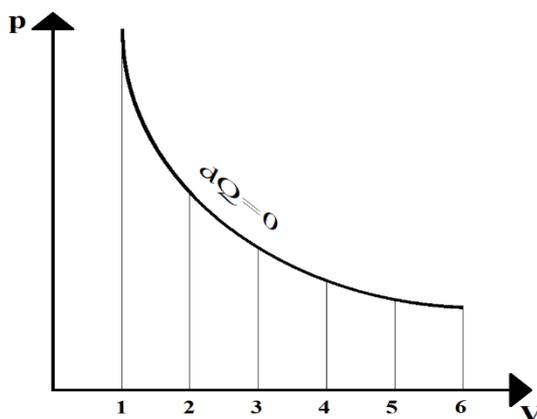


Рис. 2. Рисунок к задаче № 51

$$\ell_1 = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left(\frac{V_1}{V_5}\right)^{k-1} \right].$$

Работа на первой половине хода поршня:

$$\ell_2 = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^{k-1} \right].$$

Следовательно,

$$\frac{\ell_2}{\ell_1} = \frac{1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^{k-1}}{1 - \left(\frac{V_1}{V_5}\right)^{k-1}} = \frac{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{0,4}}{1 - \left(\frac{1}{5}\right)^{0,4}} = 0,554.$$

**52.** Из сосуда, содержащего углекислоту при давлении 12 бар и температуре 20 °С, 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,

$$T_2 = \frac{T_1}{1,36} = \frac{293}{1,36} = 215,4 \text{ °K};$$

$$t_2 = -57,6 \text{ °C}.$$

Конечное давление

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \frac{12}{4,081} = 2,94 \text{ бар}.$$

Это давление можно также определить из уравнения

$$\frac{p_2 \cdot v_2}{p_1 \cdot v_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

отсюда

$$p_2 = p_1 \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{T_2}{T_1} = 12 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1,36} = 2,94 \text{ бар}.$$

**53.** Воздушный буфер состоит из цилиндра, плотно закрытого подвижным поршнем. Длина цилиндра – 50 см, диаметр – 20 см. Параметры воздуха, находящегося в цилиндре, соответствуют параметрам окружающей среды:  $p_1 = 1$  бар и  $t_1 = 20$  °C.

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

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

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

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \right] = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,0157}{0,4} (1 - 0,5^{0,4}) =$$

$$= \frac{1570}{0,4} (1 - 1,91) = -\frac{1570 \cdot 0,91}{0,4} = -3570 \text{ Дж}.$$

Затрата работы для преодоления атмосферного давления составит

$$p_1 (V_2 - V_1) = 10^5 \left(-\frac{4}{5}\right) \cdot 0,0157 = 1256 \text{ Дж}.$$

Следовательно, аккумулированная в воздушном буфере энергия составит

$$3570 - 1256 = 2314 \text{ Дж}.$$

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

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1};$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 1,91 = 558^\circ\text{K} = 285^\circ\text{C};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k;$$

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 1,5^{1,4} = 9,52 \text{ бар.}$$

54. 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 формулы (28) находим

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{10}{0,9}} = 0,13,$$

отсюда

$$n = \frac{1}{1-0,13} = 1,49.$$

Конечный объем определяем из характеристического уравнения

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

Затраченная работа, согласно уравнению (33):

$$L = \frac{MR}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \cdot 287}{0,149} (18 - 125) = -309200 \text{ Дж} = -309,2 \text{ кДж.}$$

Количество отведенного тепла по уравнению

$$Q = M \cdot c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 1,5 \cdot \frac{20,93}{28,96} \cdot \frac{1,149 - 1,4}{1,149 - 1} \cdot (125 - 18) = -195,4 \text{ кДж} = -46,7 \text{ ккал.}$$

55. 5 м<sup>3</sup> воздуха при давлении  $p_1 = 4$  бар и температуре  $t_1 = 60^\circ\text{C}$  расширяются по политропе до трехкратного объема и давления  $p_2 = 1$  бар.

Определить показатель политропы, работу расширения, количество сообщенного извне тепла и изменение внутренней энергии.

*Решение*

Показатель политропы определяется по уравнению (28):

$$n = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{v_2}{v_1}} = \frac{\lg 4}{\lg 3} = 1,26.$$

Работа расширения определяется по формуле (33):

$$L = \frac{1}{n-1}(p_1V_1 - p_2V_2) = \frac{1}{0,26}(4 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5 \cdot 15) = 1923 \text{ кДж.}$$

Количество тепла вычисляем по уравнению (32):

$$\varphi = \frac{n-1}{n-k} = \frac{1,26-1}{1,26-1,4} = -\frac{0,26}{0,14} = -1,86,$$

но так как

$$\varphi = \frac{\Delta U}{Q} = \frac{Q-L}{Q} = -1,86,$$

то

$$Q = +\frac{L}{2,86} = \frac{1923}{2,86} = +672,4 \text{ кДж} = +160,7 \text{ ккал.}$$

Знак (+) показывает, что тепло в данном процессе подводится. Об этом можно судить также по величине показателя политропы.

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = Q - L = 672,4 - 1923 = -1250,6 \text{ кДж} = -298,9 \text{ ккал.}$$

Знак (-) показывает, что внутренняя энергия убывает. В данном процессе работа совершается за счет подводимого извне тепла, а также внутренней энергии газа.

**56.** Воздух в количестве  $0,01 \text{ м}^3$  при давлении  $p_1 = 10$  бар и температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  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, в) политропно с показателями  $n = 1,3$ .

*Решение*

а) изотермическое расширение.

Конечный объем определяется по формуле

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 0,01 \cdot \frac{10}{1} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то конечная температура

$$t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}.$$

Работа газа вычисляется по уравнению (37):

$$L = p_1V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot 2,303 \lg 10 = 23\,000 \text{ Дж} = 23 \text{ кДж.}$$

Количество подведенного тепла вычисляется по формуле (37):

$$Q = L = 23 \text{ кДж.}$$

б) адиабатное расширение.

Конечный объем определяется по уравнению

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха определяется на основании уравнения (28):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 298 \frac{1}{1,931} = 154,3^\circ\text{K};$$
$$t_2 = -118^\circ\text{C}.$$

Работа газа определяется по уравнению (33):

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 0,01}{0,4} \left( 1 - \frac{1}{1,931} \right) = 25\,000 \cdot 0,48 = 12\,000 \text{ Дж} = 12 \text{ кДж};$$

в) политропное расширение.

Конечный объем определится из уравнения:

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,3}} = 0,01 \cdot 5,885 = 0,05885 \text{ м}^3.$$

Конечная температура определяется по уравнению (28):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,3}{1,3}} = 298 \cdot \frac{1}{1,701} = 175,2^\circ\text{К};$$

$$t_2 = -97,8^\circ\text{С}.$$

Работа газа определяется по уравнению (38):

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 0,01}{0,3} \left[ 1 - \frac{1}{10^{\frac{0,3}{1,3}}} \right] = 33\,333 \left( 1 - \frac{1}{1,701} \right) = 13\,700 \text{ Дж} = 13,7 \text{ кДж}.$$

57. 20 м<sup>3</sup> воздуха при давлении  $p_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = 18^\circ\text{С}$  сжимаются по политропе до  $p_2 = 8$  бар, причем показатель политропы  $n = 1,25$ .

Какую работу надо затратить для получения 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха и какое количество тепла отводится при сжатии?

*Решение*

Температура в конце сжатия определяется по уравнению (28):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 291 \left( \frac{8}{1} \right)^{\frac{0,25}{1,25}} = 291 \cdot 1,51 = 439^\circ\text{К};$$

$$t_2 = 166^\circ\text{С}.$$

Масса газа определится из характеристического уравнения для начального состояния газа:

$$p_1 V_1 = MRT_1;$$

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{10^5 \cdot 20}{8 \cdot 10^5} = 23,95 \text{ кг}.$$

Объем воздуха в конце сжатия будет равен

$$V_2 = \frac{MRT_2}{p_2} = \frac{23,95 \cdot 287 \cdot 439}{8 \cdot 10^5} = 3,77 \text{ м}^3.$$

Работа газа определится по формуле (33):

$$L = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{10^5}{0,25} (1 \cdot 20 - 8 \cdot 3,77) = -4\,064\,000 \text{ Дж} = -4064 \text{ кДж}.$$

Работа, затрачиваемая на получение 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха:

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

Количество тепла, отводимого при сжатии воздуха, по уравнению (29) составит:

$$Q = M \cdot c_v \frac{n - k}{n - 1} (t_2 - t_1) = 23,95 \cdot \frac{20,9}{28,9} \cdot \left(-\frac{0,15}{0,25}\right) \cdot 148 = -1548 \text{ кДж}.$$

**58.** В процессе расширения газа 50 % подведенной теплоты превращается в работу; 50 % идет на увеличение внутренней энергии.

Где на  $pV$ -диаграмме расположен этот процесс? Чему равен показатель политропы? Что происходит с газом при расширении? Чему равна теплоемкость процесса?

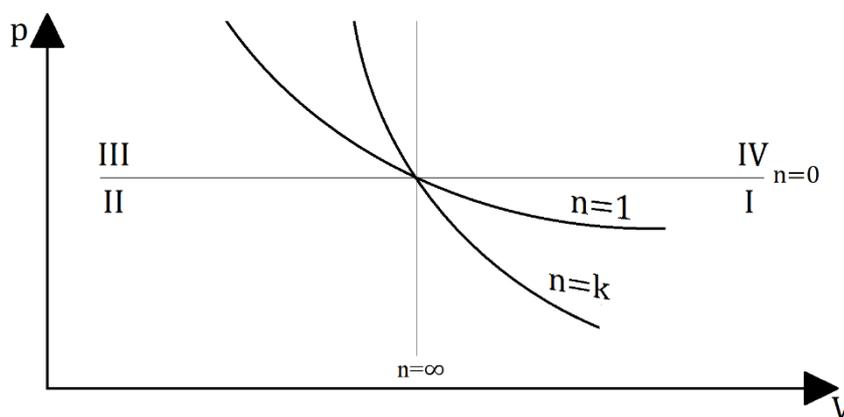


Рис. 3. Рисунок к задаче № 58

*Решение*

$$\varphi = 0,5;$$

$$n = \frac{0,5 \cdot 1,4 - 1}{0,5 - 1} = 0,6.$$

Процесс расположен между изобарой и изотермой; при расширении извне подводится теплота и 50 % ее расходуется на работу расширения, а остальные 50 % идут на нагрев газа.

$$c = c_v \frac{k - n}{1 - n} = \frac{1,005}{1,4} \cdot \frac{1,4 - 0,6}{1 - 0,6} = 1,436 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

**59.** В процессе газ отдает 200 кДж теплоты, из которых 80 кДж взято из внутренней энергии.

Определить показатель политропы и описать происходящий с газом процесс.

*Решение*

$$q = 200 \text{ кДж}; \Delta U = 80 \text{ кДж}; \ell = 120 \text{ кДж}; \varphi = 0,4; n = 0,733.$$

Процесс расположен между изобарой и изотермой; происходит сжатие газа; теплота от работы сжатия вместе с теплотой, взятой из внутренней энергии, отводится наружу;  $\Delta T < 0$ .

**60.** От газа отводится 100 кДж; внутренняя энергия его увеличилась на 200 кДж. Что это за процесс? Какова работа газа? Чему равна теплоемкость?

*Решение*

$$q = -100 \text{ кДж}; \Delta U = 200 \text{ кДж}; \varphi = -2; n = 1,267; \ell = -300 \text{ кДж}.$$

Процесс сжатия расположен ниже адиабаты; теплота, полученная от работы сжатия 300 кДж, распределяется таким образом: часть идет на увеличение внутренней энергии (200 кДж), а часть (100 кДж) отводится наружу.

$$c = -0,357 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

**61.** В политропном процессе давление газа уменьшилось с 10 до 2 ат, а объем его увеличился в 4 раза.

Определить показатель политропы и описать физические явления в этом процессе.

*Решение*

$$n = 1,161.$$

Расширение газа происходит в процессе, расположенном между изотермой и адиабатой, следовательно, температура газа уменьшается и работа расширения происходит частично вследствие уменьшения внутренней энергии и частично вследствие подвода теплоты извне; так как в процессе на  $pV$ -диаграмме расположен близко к изотерме, то работа идет главным образом за счет подвода теплоты извне.

Теплоемкость процесса равна:

$$c = c_v \frac{1,4 - 1,161}{1 - 1,161} = -1,49c_v.$$

Теплоемкость отрицательна, объясните это.

**62.** В политропном процессе температура газа увеличилась в 4 раза, а объем уменьшился в 3 раза.

Чему равен показатель политропы? Где на  $pV$ -диаграмме расположен процесс? Что происходит в процессе с газом?

*Решение*

$$n = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{v_2}{v_1}} = \frac{\lg \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}}}{\lg \frac{v_2}{v_1}},$$

$$n - 1 = \frac{\lg \frac{1}{4}}{\lg \frac{1}{3}},$$

$$n = 2,262.$$

Процесс политропного сжатия расположен выше адиабаты, следовательно, снаружи подводится теплота, которая вместе с теплотой, полученной от сжатия, идет на увеличение внутренней энергии.

**63.** Показатель политропы равен 2. Объем газа увеличился в 3 раза.

Как изменились давление и температура газа? Что происходит с газом в этом процессе?

*Решение*

$$v_2 = 3v_1; \frac{p_1}{p_2} = 9; \frac{T_1}{T_2} = 3.$$

Давление уменьшилось в 9 раз, а температура – в 3 раза; работа расширения всегда положительна, внутренняя энергия уменьшилась в 3 раза, часть теплоты от газа отводится наружу.

**64.** Показатель политропы равен 0,5. Газ сжат до  $p_2 = 3p_1$ .

Как изменилась температура и объем газа? Что произошло с внутренней энергией газа? Какова его работа? Каково участие в процессе внешней теплоты?

*Решение*

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{3}; \frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{9}.$$

Внутренняя энергия газа уменьшилась в 3 раза, работа сжатия газа отрицательна; количество отведенной наружу теплоты равно сумме теплоты, полученной от работы сжатия, и теплоты, взятой от внутренней энергии газа.

**65.** 1 кг воздуха политропно расширяется от начального давления 12 до 2 ат, причем объем его увеличился в 4 раза; начальная температура воздуха равна 127 °С.

Определить показатель политропы, начальный и конечный объемы, конечную температуру и работу расширения.

*Решение*

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{6}; \frac{v_2}{v_1} = 4; n = 1,292; \frac{T_2}{T_1} = 0,667;$$

$$T_2 = 267^\circ\text{К}; v_1 = 0,0977 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; v_2 = 0,3908 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \ell = 130\,700 \text{ Дж/кг}.$$

**66.** 5 кг воздуха сжато по политропе с показателем  $n = 2$  от 1 до 6 ат, начальная температура равна –23 °С.

Определить работу сжатия, конечную температуру газа, начальный и конечный объемы, изменение внутренней энергии и энтальпии и количество внешней теплоты. Представить физическую картину процесса.

*Решение*

$$T_2 = 612,5^\circ\text{К}; V_1 = 3,6625 \text{ м}^3; V_2 = 1,4947 \text{ м}^3; L = -521 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = 5 \cdot \frac{1,005}{1,4} (612,5 - 250) = 1300,6 \text{ кДж};$$

$$Q = 1300,6 - 521 = 779,6 \text{ кДж}; \Delta \ell = 1821 \text{ кДж}.$$

Снаружи к воздуху подводится 779,6 кДж теплоты, она идет на повышение внутренней энергии, как и теплота в количестве 521 кДж, полученная от работы сжатия в количестве 1821 кДж.

**67.** Давление 1 кг воздуха в процессе увеличилось в 4 раза, а температура уменьшилась в 2 раза. Начальные параметры воздуха следующие: давление 2 бар, температура 600 °К.

Определить показатель политропы, начальные и конечные параметры газа, дать описание физических явлений в процессе.

*Решение*

$$\frac{p_2}{p_1} = 4; \frac{T_1}{T_2} = 2; \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}} = \frac{p_1}{p_2}; \frac{n}{n-1} = \frac{\lg \frac{1}{4}}{\lg 2} = -2;$$

$$n = \frac{2}{3}; p_1 = 2 \text{ бар}; T_1 = 600 \text{ °K}; v_1 = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_2 = 8 \text{ бар}; T_2 = 300 \text{ °K}; v_2 = 0,1076 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Внутренняя энергия уменьшается на 214,8 кДж/кг, работа газа равна -258,5 кДж/кг. Наружу отведено теплоты

$$q = -214,8 - 258,5 = -473,3 \text{ кДж/кг}.$$

Процесс сжатия расположен между изобарой и изотермой.

**68.** В политропном процессе 1 кмоль углекислоты ( $\mu c_v = 28,6$  кДж/кмоль·град;  $R = 8314,3$  Дж/кмоль·град;  $k = 1,29$ ). Наружу отведено 2000 кДж теплоты; начальное давление 2 бар; начальная температура 127 °С, а в процессе она уменьшилась на 98,6 °С.

Определить показатель политропы, начальные и конечные параметры газа, изменение внутренней энергии и энтальпии и работу газа.

*Решение*

$$q = -2000 \text{ кДж/кмоль}; \Delta u = 28,6(-98,6) = -2820 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\varphi = \frac{-2820}{-2000} = 1,41; n = 2;$$

$$T_1 = 400 \text{ °K}; p_1 = 2 \text{ бар};$$

$$v_1 = \frac{8314,3 \cdot 400}{2 \cdot 10^5} = 16,63 \text{ м}^3/\text{кмоль};$$

$$T_2 = 301,4 \text{ °K}; p_2 = 2 \left(\frac{301,4}{400}\right)^2 = 1,134 \text{ бар};$$

$$v_2 = \frac{8314,3 \cdot 301,4}{113400} = 22,1 \text{ м}^3/\text{кмоль};$$

$$\mu c_p = 28,6 + 8,315 = 36,9 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град};$$

$$\Delta \ell = -36,9 \cdot 98,6 = -36,38 \text{ кДж/кмоль};$$

$$L = 2820 - 2000 = 820 \text{ кДж/кмоль}.$$

**69.** При политропном сжатии 1 кг воздуха до объема  $v_2 = 0,1v_1$  температура поднялась с 10 до 90 °С; начальное давление равно 0,8 бар;  $R = 287$  Дж/кг·град.

Определить конечные параметры газа, показатель политропы, работу сжатия и количество отведенной наружу теплоты.

*Решение*

$$p_1 = 0,8 \text{ бар}; T_1 = 283 \text{ °K}; v_1 = \frac{287 \cdot 283}{80000} = 1,015 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_2 = 10,264 \text{ бар}; T_2 = 363 \text{ °K}; v_2 = 0,1015 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$n = \frac{\lg \frac{10,264}{0,8}}{\lg 10} = 1,108;$$

$$\Delta u = \frac{1,005}{1,4} (363 - 283) = 57,4 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i = 57,4 \cdot 1,4 = 80,4 \text{ кДж/кг};$$

$$c = c_v \frac{k - n}{1 - n} = \frac{1,005}{1,4} \cdot \frac{1,4 - 1,108}{1 - 1,108} = -1,94 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$q = -1,94(363 - 283) = -155,2 \text{ кДж/кг};$$

$$\ell = \frac{287(283 - 363)}{1,108 - 1} = -212600 \text{ Дж/кг} = -212,6 \text{ кДж/кг}.$$

Проверка:

$$q = \Delta u + \ell;$$

$$-155,2 = 57,4 - 212,6.$$

70. В цилиндре дизеля воздух с начальными параметрами  $t_1 = 47^\circ\text{C}$  и  $p_1 = 1$  ат сжимается по политропе  $n = 1,36$ . Сжатие идет до достижения воздухом температуры  $700^\circ\text{C}$ , несколько превышающей температуру самовоспламенения топлива.

Определить конечное давление воздуха и необходимую степень сжатия  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ ; вычислить работу сжатия.

*Решение*

$$T_1 = 320 \text{ }^\circ\text{K}; T_2 = 973 \text{ }^\circ\text{K}; n = 1,36;$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{973}{320}\right)^{\frac{1,36}{0,36}} = \left(\frac{973}{320}\right)^{3,78} = 66,9;$$

$$p_2 = 66,9 \text{ атм};$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{n-1}} = \left(\frac{973}{320}\right)^{2,78} = 22.$$

$$\ell = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \frac{T_2}{T_1}\right] = \frac{287 \cdot 320}{0,36} \left(1 - \frac{973}{320}\right) = -521\,200 \text{ Дж/кг} = -521,2 \text{ кДж/кг}.$$

71. Сравнить расходы теплоты для нагревания 5 кг азота от  $27$  до  $227^\circ\text{C}$  при  $v = \text{const}$  и  $p = \text{const}$ . Для изобарного нагревания определить работу расширения. Для азота принять  $\mu c_p = 29$  кДж/кмоль · град.

*Решение*

$$\mu c_p = 29 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град},$$

$$\mu c_v = 20,68 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град},$$

$$Q_v = \frac{5}{28} (20,68 \cdot 200) = 738,5 \text{ кДж},$$

$$Q_p = \frac{5}{28} (29 \cdot 200) = 1035,7 \text{ кДж}.$$

$$L = 1035,7 - 738,5 = 297,2 \text{ кДж}.$$

72. Начальное состояние 10 кг воздуха определяется температура 27 °С и давлением 1,2 бар. Воздух изобарно нагревается до 327 °С.

Определить работу газа, изменение внутренней энергии и энтальпии и количество подведенной теплоты.

*Решение*

$$V_1 = 7,175 \text{ м}^3; V_2 = V_1 \frac{600}{300} = 14,35 \text{ м}^3;$$

$$\Delta U = 0,178 \cdot (327 - 27) \cdot 10 = 2154,0 \text{ кДж};$$

$$L = 10 \cdot 287 \cdot 300 \cdot 0,001 = 861 \text{ кДж};$$

$$Q = 2154,0 + 861 = 3015 \text{ кДж};$$

$$\Delta \ell = 1,005 \cdot 10 \cdot (327 - 27) = 3015 \text{ кДж}.$$

73. Воздух в компрессоре сжимается по политропе  $n = 1,25$  от 1 до 8 ат; начальная температура воздуха 27 °С. После сжатия воздух проходит через холодильник, охлаждаемый водой с  $t_1 = 10$  °С.

Определить часовой расход циркуляционной воды в холодильнике, если она нагревается до 18 °С. Производительность компрессора 1000 м<sup>3</sup>/ч при нормальных физических условиях, а воздух охлаждается до 30 °С при постоянном давлении в холодильнике.

*Решение*

$$T_2 = 455 \text{ °K} = 182 \text{ °C}; Q = 1,005 \cdot 1,293 \cdot 1000 \cdot (182 - 30) = 197\,525 \text{ кДж/ч};$$

$$M_B = \frac{197525}{(18 - 10) \cdot 4,178} = 5896,5 \text{ кг/ч, или } 5,90 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

74. 1 кг воздуха в воздушном двигателе расширяется от 10 до 1 атм. Расширения может произойти: изотермно, адиабатно и по политропе  $n = 1,2$ .

Сравнить работы расширения и определить конечные параметры воздуха по этим трем процессам; начальная температура воздуха 227 °С. Представить процессы на  $pV$ -диаграмме.

*Решение*

$$p_1 = 10 \text{ ат}; T_1 = 500 \text{ °K}; v_1 = 0,1465 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изотермное расширение:

$$T_2 = T_1 = 500 \text{ °K}; p_2 = 1 \text{ ат}; v_2 = 1,465 \text{ м}^3/\text{кг}; \ell_{\text{из}} = 331 \text{ кДж/кг}.$$

Политропное расширение:

$$T_2 = 340,5 \text{ °K}; v_2 = 0,9977 \text{ м}^3/\text{кг}; \ell_{\text{пол}} = 229 \text{ кДж/кг}; q_{\text{пол}} = 114,5 \text{ кДж/кг}.$$

Адиабатное расширение:

$$T_2 = 259 \text{ °K}; v_2 = 0,759 \text{ м}^3/\text{кг}; \ell_{\text{ад}} = 173 \text{ кДж/кг}; q = 0.$$

С увеличением показателя  $n$  работа газа уменьшается.

75. 10 кг воздуха сжимаются до  $V_2 = 0,5V_1$ . Начальное состояние воздуха:  $t_1 = 57$  °С и  $p_1 = 1$  бар.

Рассчитать процессы сжатия при показателях политропы: 0; 0,6; 1; 1,2; 1,4; 1,6. Представить эти процессы на  $pV$ -диаграмме.

Решение

$$p_1 = 1 \text{ бар}; T_1 = 330 \text{ °К}; V_1 = 9,47 \text{ м}^3; V_2 = 4,735 \text{ м}^3.$$

Процесс	$p_2$ , бар	$T_2$ , °К	$c$ , кДж/(кг·град)	$L$ , кДж	$\Delta U$ , кДж	$Q$ , кДж
$n = 0$ изобарный	1	165	+1,005	-437,5	-1185	-1658,5
$n = 0,6$ политропный	1,516	250,2	+1,436	-572,5	-573	-114,5
$n = 1$ изотермный	2	330	$\infty$	-656,5	0	-656,5
$n = 1,2$ политропный	2,292	377,4	-0,718	-680	+340	-340
$n = 1,4$ адиабатный	2,64	435	0	-753,4	+453,4	0
$n = 1,6$ политропный	3,03	500	+0,239	-813	+1221	+408

76. Начальное состояние воздуха определяется температурой 127 °С и давлением 3 бар.

Определить работу расширения 1 кмоль воздуха до давления 1 бар в процессах с показателем политропы: 0,5; 1; 1,2; 1,4; 1,6. Найти изменение внутренней энергии и энтальпии, количество внешнего тепла, участвующее в процессе  $\mu_{cv} = 20,8$  кмоль/кг·град.

$$p_1 = 3 \text{ бар}; T_1 = 400 \text{ °К}; V_1 = 22,4 \frac{760 \cdot 400}{3 \cdot 750 \cdot 273} = 11,086 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Процесс	$T$ , °К	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$\mu_c$ , кДж/(кмоль·град)	$L$ , кДж	$\Delta U$ , кДж	$Q$ , кДж
$n = 0,5$ политропный	1200	99,78	+37,44	13310	+16640	29950
$n = 1,0$ изотермный	400	33,26	$\infty$	3650	0	3650
$n = 1,2$ политропный	333,3	27,71	-20,8	2774	-1387	1387
$n = 1,4$ адиабатный	292	24,28	0	2244,5	-2244,5	0
$n = 1,6$ политропный	264,8	22,02	+6,93	1873	-2812	-939

77. Процесс сжатия 10 кг воздуха с  $t_1 = 127$  °С и  $p_1 = 5$  бар происходит по политропе с показателем  $n = -2$ ; объем газа уменьшается в 2 раза.

Определить изменение давления и температуры; объяснить физические явления, происходящие при этом процессе.

Решение

$$V_2 = 0,5V_1; T_1 = 400 \text{ °К}; V_1 = 2,296 \text{ м}^3;$$

$$V_2 = 1,148 \text{ м}^3; p_2 = 1,25 \text{ бар}; T_2 = 50 \text{ °К} = -223 \text{ °С}; L = -334,8 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = -2513 \text{ кДж}; c = 0,814 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}; Q = -2847,8 \text{ кДж}.$$

Процесс отличается отводом большого количества теплоты, взятого из внутренней энергии газа; практически весьма трудно добиться такого сильного охлаждения газа при его сжатии.

**78.** 1 кг азота изотермно сжимается до  $v_2 = 0,5v_1$ , а затем изобарно расширяется до начального объема; начальное состояние определяется температурой  $27^\circ\text{C}$  и давлением 1 бар.

Определить работы, изменения внутренней энергии и энтальпии, количества внешней теплоты обоих процессов и суммарное изменение этих величин. Представить эти процессы на  $pV$ -диаграмме.  $R = 297 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ .

*Решение*

$$\begin{aligned} p_1 &= 1 \text{ бар}; T_1 = 300 \text{ }^\circ\text{K}; v_1 = 0,891 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ p_2 &= 2 \text{ бар}; T_2 = 300 \text{ }^\circ\text{K}; v_2 = 0,4455 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ p_3 &= 2 \text{ бар}; T_3 = 600 \text{ }^\circ\text{K}; v_3 = 0,891 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Изотермный процесс:

$$\ell_{\text{из}} = -61,68 \text{ кДж/кг}; \Delta u_{\text{из}} = 0; q_{\text{из}} = -61,68 \text{ кДж/кг}.$$

Изобарный процесс:

$$\ell_{\text{изб}} = -89,1 \text{ кДж/кг}; \Delta u_{\text{изб}} = 225,9 \text{ кДж/кг}; q_{\text{изб}} = 315,0 \text{ кДж/кг}.$$

Суммарный процесс:

$$\ell = 27,4 \text{ кДж/кг}; \Delta u = 225,9 \text{ кДж/кг}; q = 253,3 \text{ кДж/кг}.$$

**79.** 4 кг углекислоты расширяются по изобаре  $p = 6$  бар с изменением температуры от  $27$  до  $327^\circ\text{C}$ , а затем по адиабате еще расширяются до давления 2 бар.

Определить изменение внутренней энергии и энтальпии, работу, внешнюю теплоту при каждом процессе и суммарно.  $R = 189 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ ,  $c_p = 0,89 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$ ,  $k = 1,27$ .

*Решение*

$$\begin{aligned} p_1 &= 6 \text{ бар}; T_1 = 300 \text{ }^\circ\text{K}; V_1 = 0,378 \text{ м}^3; \\ p_2 &= 6 \text{ бар}; T_2 = 600 \text{ }^\circ\text{K}; V_2 = 0,756 \text{ м}^3; \\ p_3 &= 2 \text{ бар}; T_3 = 475 \text{ }^\circ\text{K}; V_3 = 1,795 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Изобарный процесс:

$$L_{\text{изб}} = 226,8 \text{ кДж}; \Delta U_{\text{изб}} = 840,5 \text{ кДж}; Q_{\text{изб}} = 1067,3 \text{ кДж}.$$

Адиабатный процесс:

$$L_{\text{ад}} = 351,0 \text{ кДж}; \Delta U_{\text{ад}} = -351,0 \text{ кДж}; Q_{\text{ад}} = 0 \text{ кДж}.$$

Суммарный процесс:

$$L = 577,8 \text{ кДж}; \Delta U = 489,5 \text{ кДж}; Q = 1067,3 \text{ кДж}.$$

**80.** К 10 кг воздуха в изохорном процессе подведено 1885 кДж теплоты, а затем в изобарном сжатии объем уменьшен в 2,5 раза. Начальная температура воздуха  $17^\circ\text{C}$ , а давление 0,8 атм.

Рассчитать процессы, происходящие с воздухом, и представить их на  $pV$ -диаграмме.

Решение

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,8 \text{ ат}; T_1 = 290 \text{ °К}; V_1 = 10,62 \text{ м}^3; \\ p_2 &= 1,524 \text{ ат}; T_2 = 552,5 \text{ °К}; V_2 = 10,62 \text{ м}^3; \\ p_3 &= 1,524 \text{ ат}; T_3 = 221 \text{ °К}; V_3 = 4,284 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Изохорный процесс:

$$L_{\text{изх}} = 0; \Delta U_{\text{изх}} = 1885 \text{ кДж}; Q_{\text{изх}} = 1885 \text{ кДж}.$$

Изобарный процесс:

$$L_{\text{изб}} = -951,4 \text{ кДж}; \Delta U_{\text{изб}} = -2380 \text{ кДж}; Q_{\text{изб}} = -3331 \text{ кДж}.$$

Суммарный процесс:

$$L = -951,4 \text{ кДж}; \Delta U = -495 \text{ кДж}; Q = -1446 \text{ кДж}.$$

**81.** 1 кг водорода и 1 кг кислорода расширяются от давления 5 до 1 ат; начальная температура обоих газов одинакова и равна 227 °С.

Сравнить адиабатную и изотермную работу расширения этих газов. Определить работы газов.

Решение

Изотермная работа определяется по формуле (37), а адиабатная – по формуле (38), в которой для двухатомных газов  $k$  одинаково и равно 1,4. Сравнение как изотермных, так и адиабатных работ дает

$$\frac{\ell_B}{\ell_k} = \frac{R_B}{R_k}.$$

Находим для изотермного расширения

$$\ell_k = 209,3 \text{ кДж/кг}; \ell_B = 3319 \text{ кДж/кг},$$

а для адиабатного

$$\ell_k = 120,3 \text{ кДж/кг}; \ell_B = 1907 \text{ кДж/кг}.$$

**82.** Рассчитать изотермное и адиабатное расширение 1 кмоль разноатомных газов для следующих условий: начальное давление 10 бар, температура 227 °С; конечное давление 2 бар.

Теплоемкости газов принять приближенно согласно молекулярной теории теплоемкости:

Теплоемкость	Одноатомного	Двухатомного	Трехатомного
$c_v$ , кДж/кг·град	12,6	21,0	25,2
$c_p$ , кДж/кг·град	21,0	29,4	33,6

Решение

Значения  $k$  для газов:

$$\text{одноатомных } k = \frac{21,0}{12,6} = 1,67,$$

$$\text{двухатомных } k = \frac{29,4}{21,0} = 1,4,$$

$$\text{трехатомных } k = \frac{33,6}{25,2} = 1,33.$$

Изотермная работа не зависит ни от теплоемкостей, ни от значения  $k$ , поэтому она одинакова для газов любой атомности:

$$L = 8,3143 \cdot 500 \cdot 2,303 \cdot \lg 5 = 6692 \text{ кДж/кмоль.}$$

Адиабатная работа 1 кмоль газа различается при разных атомностях. Применяя обычные формулы для адиабатного процесса, получаем результаты, приведенные в таблице.

	1 ат	2 ат	3 ат
$T$ , °К	261	316	336
$L$ , кДж/кмоль	3011	3864	4132

**83.** Расчет, аналогичный предыдущей задаче, провести для 1 кмоль разноатомных газов при сжатии их до  $V_2 = 0,5V_1$ . Начальное состояние газов во всех случаях одинаково и определяется параметрами:  $t_1 = 27$  °С;  $p_1 = 1$  бар.

Расчет провести для изотермного, адиабатного и политропного сжатия;  $n = 1,2$ .

*Решение*

$$p_1 = 1 \text{ бар; } T_1 = 300 \text{ °К; } V_1 = 24,94 \text{ м}^3/\text{кмоль}, \\ V_2 = 12,47 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Для изотермного сжатия, как и в предыдущем случае, имеем одинаковую работу, равную  $L_{из} = 1729$  кДж/кмоль.

Для адиабатного и политропного процессов результаты подсчетов приведены в таблице.

	Процесс	Одноатомные газы	Двухатомные газы	Трехатомные газы
$T_2$ , °К	Адиабатный	477	396	377
	Политропный	345	345	345
$p_2$ , бар	Адиабатный	3,18	2,64	2,51
	Политропный	2,3	2,3	2,3
$L$ , кДж/кмоль	Адиабатный	-2197	-1995	-1940
	Политропный	-1870	-1870	-1870
$\Delta U$ , кДж/кмоль	Адиабатный	+2197	+1995	+1940
	Политропный	+567	+945	+1134
$\mu_c$ , кДж/(кмоль·град)	Адиабатный	0	0	0
	Политропный	-29,6	-21,0	-16,4
$Q$ , кДж/кмоль	Адиабатный	0	0	0
	Политропный	-1332	-945	-738

**84.** Стратостат, заполненный гелием в количестве  $10\,000 \text{ м}^3$  при  $15$  °С и  $760$  мм рт. ст. на земле, поднимается на высоту  $22$  км. На этой высоте давление воздуха равно  $0,0402$  бар, а температура  $-56$  °С.

Определить полную подъемную силу стратостата на земле, а на указанной высоте в двух предположениях:

- 1) при настолько быстром подъеме стратостата, что можно пренебречь теплообменом с окружающим пространством (адиабатное расширение газа);
- 2) газ при подъеме охладился до  $-30$  °С.

Предполагается, что газ из стратостата через клапан не уходит.

*Решение*

Плотность воздуха на земле  $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$ , а на высоте 22 км  $\rho_{\text{в}} = 0,0646 \text{ кг/м}^3$ ; плотность гелия на земле  $\rho = 0,17 \text{ кг/м}^3$ .

Полная подъемная сила стратостата на земле

$$P = 9,81 \cdot 10000 \cdot (1,226 - 0,17) = 103\,600 \text{ Н.}$$

1) если температура гелия не изменилась, то на высоте 22 км его плотность равна

$$\rho_{\text{г}} = 0,00675 \text{ кг/м}^3,$$

а объем

$$V_{\text{г}} = \frac{10\,000 \cdot 1,013}{0,0402} = 251\,950 \text{ м}^3.$$

Подъемная сила стратостата в этом случае будет равна

$$P = 251\,950 \cdot (0,0646 - 0,00675) \cdot 9,81 = 143\,000 \text{ Н.}$$

По сравнению с землей сила тяги увеличилась на 38,0 %;

2) в случае охлаждения гелия до  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  плотность его равна

$$\rho_{\text{г}} = 0,0080 \text{ кг/м}^3,$$

а объем

$$V_{\text{г}} = \frac{251\,950 \cdot 243}{288} = 212\,580 \text{ м}^3.$$

Следовательно,

$$P = 212\,580 \cdot (0,0646 - 0,0080) \cdot 9,81 = 118\,000 \text{ Н.}$$

Подъемная сила при охлаждении газа уменьшается, в данном случае на 17,6 %, а по сравнению с землей подъемная сила увеличилась на 13,9 %.

При весьма медленном подъеме стратостата (точнее при бесконечно медленном) гелий охладился бы до  $-56 \text{ }^\circ\text{C}$ . В этом случае его плотность была бы  $0,00895 \text{ кг/м}^3$ , а объем в стратостате  $189\,840 \text{ м}^3$ ; подъемная сила была бы равна  $103\,600 \text{ Н}$ , т. е. одинакова с подъемной силой на земле.

**85.** Газовая турбина работает на продуктах сгорания, имеющих при входе в нее температуру  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  и давление 5 ат; расширение в турбине идет по политропе  $n = 1,3$  до давления 1 атм.

Определить температуру газов на выходе, изменение объема их в процессе и работу 1 кг продуктов сгорания при расширении их в турбине  $R = 294 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$ .

*Решение*

$$T_2 = 740 \text{ }^\circ\text{K}; \ell = 325\,850 \text{ Дж/кг}; v_1 = 0,644 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\frac{v_2}{v_1} = 3,45;$$

$$v_2 = 2,22 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**86.** Смесь из 4 кг кислорода и 6 кг азота адиабатно расширяется до  $V_2 = 2V_1$ . Начальные параметры смеси: давление 10 бар и температура  $127 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить  $V_1, V_2, p_2, t_2$ , а также работу расширения и изменения внутренней энергии.

*Решение*

По таблицам I, III, IV из приложений находим:

	Для кислорода	Для азота	Для смеси
$c_p$ , кДж/кг·град	0,917	1,038	$0,4 \cdot 0,917 + 0,6 \cdot 1,033 = 0,9896$
$c_v$ , кДж/кг·град	0,653	0,741	$0,4 \cdot 0,653 + 0,6 \cdot 0,741 = 0,7058$
$R$ , Дж/кг·град	260	297	$0,4 \cdot 260 + 0,6 \cdot 297 = 282,2$

$$V_1 = \frac{10 \cdot 282,2 \cdot 400}{10 \cdot 10^5} = 1,129 \text{ м}^3;$$

$$V_2 = 1,129 \cdot 2 = 2,258 \text{ м}^3;$$

$$T_2 = 400 \cdot 0,5^{0,4} = 303 \text{ °К};$$

$$p_2 = \frac{10 \cdot 282,2 \cdot 303}{2,258 \cdot 10^5} = 3,787 \text{ бар};$$

$$\Delta U = 10 \cdot 0,7058 \cdot (303 - 400) = -634,6 \text{ кДж};$$

$$L = -\Delta U = 634,6 \text{ кДж};$$

$$L = \frac{10 \cdot 282,2 \cdot (400 - 303)}{0,4} = 684,3 \text{ кДж}.$$

**87.** Продукты сгорания бензина расширяются в ДВС по политропе  $n = 1,27$  от 30 до 3 атм. Начальная температура газов 2100 °С; массовый состав продуктов сгорания 1 кг бензина следующий:  $\text{CO}_2 = 3,135$  кг,  $\text{H}_2\text{O} = 1,305$  кг,  $\text{O}_2 = 0,34$  кг,  $\text{N}_2 = 12,61$  кг.

Определить работы расширения этих газов, если одновременно подается в цилиндр 2 г бензина.

*Решение*

Масса всей смеси  $M = 17,39$  кг.

Массовый состав:

$$m_{\text{CO}_2} = 0,1803$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0750$$

$$m_{\text{O}_2} = 0,0196$$

$$m_{\text{N}_2} = 0,7251$$

Итого:

$$\sum_1^n m = 1,0000;$$

$$R = 0,1803 \cdot 189 + 0,075 \cdot 462 + 0,0196 \cdot 260 + 0,7251 \cdot 297 = 289 \text{ Дж/кг·град};$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 10^{0,2126};$$

$$T_2 = 1454 \text{ °К};$$

$$L = \frac{17,39 \cdot 0,002 \cdot 289 \cdot (2373 - 1454)}{0,27} = 34212 \text{ Дж}.$$

**88.** Газ при давлении  $p_1 = 10$  бар и температуре  $t_1 = 20$  °С нагревается при постоянном объеме до  $t_2 = 300$  °С.

Определить конечное давление газа.

Ответ:  $p_2 = 19,56$  бар.

89. В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,3$  м<sup>3</sup> содержится 2,75 кг воздуха при давлении  $p_1 = 8$  бар и температуре  $t_1 = 25$  °С.

Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0 °С.

Ответ:  $p_2 = 7,32$  бар;  $v_2 = 0,109$  м<sup>3</sup>/кг.

90. В закрытом сосуде заключен газ при давлении  $p_1 = 28$  бар и температуре  $t_1 = 120$  °С.

Чему будет равно конечное давление  $p_2$ , если температура упадет до  $t_2 = 25$  °С?

Ответ:  $p_2 = 21,2$  бар.

91. В закрытом сосуде находится газ при разрежении  $p_1 = 20$  мм рт. ст. и температуре  $t_1 = 10$  °С. Показание барометра – 750 мм рт. ст. После охлаждения газа разрежение стало равным 150 мм рт. ст.

Определить конечную температуру газа  $t_2$ .

Ответ:  $t_2 = -40,4$  °С.

92. До какой температуры нужно нагреть газ при  $v = const$ , если начальное давление газа  $p_1 = 2$  бар и температура  $t_1 = 20$  °С, а конечное давление  $p_2 = 5$  бар.

Ответ: До  $t_2 = 459,9$  °С.

93. В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,5$  м<sup>3</sup> содержится двуокись углерода при  $p_1 = 6$  бар и  $t_1 = 527$  °С.

Как изменится давление газа, если от него отнять 100 ккал? Принять зависимость  $c = f(t)$  линейной.

Ответ:  $p_2 = 4,2$  бар.

94. До какой температуры нужно охладить 0,8 м<sup>3</sup> воздуха с начальным давлением 3 бар и температурой 15 °С, чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 1 бар? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Ответ: до  $t_2 = -177$  °С;  $Q = -402$  кДж.

95. Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении  $p_1 = 125$  бар.

Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла (в кДж и ккал), если начальная температура кислорода  $t_1 = 10$  °С, а конечная  $t_2 = 30$  °С. Теплоемкость кислорода считать постоянной.

Ответ:  $p_2 = 134$  бар;  $Q = 133$  кДж = 31,8 ккал.

96. В цилиндре диаметром 400 мм содержится 80 л воздуха при давлении  $p_1 = 2,9$  бар и температуре  $t_1 = 15$  °С.

Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, до какой величины должна возрасти сила, действующая на поршень, чтобы последний оставался неподвижным, если к воздуху подводятся 20 ккал тепла.

Ответ:  $F = 51,1$  кН.

97. В калориметрической бомбе емкостью 300 см<sup>3</sup> находится кислород при давлении  $p_1 = 26$  бар и температуре  $t_1 = 22$  °С.

Определить температуру кислорода  $t_2$  после подвода к нему тепла в количестве 1 ккал, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

*Ответ:*  $t_2 = 593$  °С.

**98.** Определить количество тепла, необходимое для нагревания  $2000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении  $p = 5$  бар от  $t_1 = 150$  °С до  $t_2 = 600$  °С. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

*Ответ:*  $Q_p = 3937 \text{ МДж} = 940\,943 \text{ ккал}$ .

**99.** В установке воздушного отопления внешний воздух при  $t_1 = -15$  °С нагревается в калорифере при  $p = \text{const}$  до  $60$  °С.

Какое количество тепла надо затратить для нагрева  $1000 \text{ м}^3$  наружного воздуха? Теплоемкость воздуха считать постоянной. Давление воздуха принять равным 760 мм рт. ст.

*Ответ:*  $24\,609 \text{ ккал} = 103\,033 \text{ кДж}$ .

**100.**  $0,2 \text{ м}^3$  воздуха, имеющего начальную температуру  $18$  °С, подогреваются в цилиндре диаметром 50 см при постоянном давлении  $p = 2$  бар до температуры  $200$  °С.

Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченного тепла, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

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

**101.** На отходящих газах двигателя мощностью  $N = 2500$  кВт установлен подогреватель, через который проходит  $60\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $t_1 = 15$  °С и давлении  $p = 1,01$  бар. Температуры воздуха после подогревателя равна  $75$  °С.

Определить, какая часть тепла топлива использована в подогревателе. Коэффициент полезного действия двигателя принять равным  $0,33$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

*Ответ:*  $17,4 \%$ .

**102.** К  $1 \text{ м}^3$  воздуха, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении  $334 \text{ кДж}$  тепло. Объем воздуха при этом увеличивается до  $1,5 \text{ м}^3$ . Начальная температура воздуха равна  $15$  °С.

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

*Ответ:*  $t_2 = 159$  °С;  $L = 95,1 \text{ кДж}$ .

**103.**  $2 \text{ м}^3$  воздуха с начальной температурой  $t_1 = 15$  °С расширяются при постоянном давлении до  $3 \text{ м}^3$  вследствие сообщения газу  $837 \text{ кДж}$  тепла.

Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

*Ответ:*  $t_2 = 159$  °С;  $p = 2,4$  бар;  $L = 239 \text{ кДж}$ .

**104.** Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура газов  $t_1^g = 300$  °С, конечная  $t_2^g = 160$  °С; расход газов равен  $1000 \text{ кг/ч}$ . Начальная температура воздуха составляет  $t_1^a = 15$  °С, а расход его равен  $910 \text{ кг/ч}$ .

Определить температуру нагретого воздуха  $t_2^B$ , если потери воздухоподогревателя составляют 4 %.

Средние теплоемкости ( $c_{pm}$ ) для отходящих из котла газов и воздуха принять соответственно равными 1,0467 кДж/кг·град и 1,0048 кДж/кг·град.

*Ответ:*  $t_2^B = 168,9$  °С.

**105.** В цилиндре двигателя внутреннего сгорания находится воздух при температуре 500 °С. Вследствие подвода тепла конечный объем воздуха увеличился в 2,2 раза. В процессе расширения воздуха давление в цилиндре практически осталось постоянным.

Определить конечную температуру воздуха и удельные количества тепла и работы, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

*Ответ:*  $t_2 = 1428$  °С;  $q_p = 1088,7$  кДж/кг;  $\ell = 266,3$  кДж/кг.

**106.** Воздух, выходящий из компрессора с температурой 190 °С, охлаждается в охладителе при постоянном давлении  $p = 5$  бар до температуры 20 °С. При этих параметрах производительность компрессора равна 30 м<sup>3</sup>/ч.

Определить часовой расход охлаждающей воды, если она нагревается на 10 °С.

*Ответ:* 733 л/ч.

**107.** Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав:  $CO_2 = 14$  %;  $O_2 = 6$  %;  $N_2 = 75$  %;  $H_2O = 5$  %, нагревается при постоянном давлении от  $t_1 = 600$  °С до  $t_2 = 2000$  °С.

Определить количество тепла, подведенного к 1 кг газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

*Ответ:*  $q_p = 1841$  кДж/кг = 440 ккал/кг.

**108.** При сжигании в топке парового котла каменного угля объем продуктов сгорания составляет  $v_H = 11,025$  м<sup>3</sup>/кг. Анализ продуктов сгорания показывает следующий их объемный состав:  $CO_2 = 10,3$  %;  $O_2 = 7,8$  %;  $N_2 = 75,3$  %;  $H_2O = 6,6$  %.

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 кг топлива), если на выходе из котла температура газов равно 180 °С, а температура окружающей среды 20 °С. Давление продуктов сгорания принято равным атмосферному.

*Ответ:*  $q_{yx} = 2418$  кДж/кг = 578 ккал/кг.

**109.** 8 м<sup>3</sup> воздуха при  $p_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 20$  °С сжимаются при постоянной температуре до 8,1 бар.

Определить конечный объем, затраченную работу и количество тепла, которое необходимо отвести от газа.

*Ответ:*  $V_2 = 0,889$  м<sup>3</sup>;  $L = Q = -1581$  кДж.

**110.** При изотермическом сжатии 0,3 м<sup>3</sup> воздуха с начальными параметрами  $p_1 = 10$  бар и  $t_1 = 300$  °С отводится 500 кДж тепла.

Определить конечный объем  $V_2$  и конечное давление  $p_2$ .

Ответ:  $V_2 = 0,057 \text{ м}^3$ ;  $p_2 = 52,6 \text{ бар}$ .

111. В воздушный двигатель подается  $0,0139 \text{ м}^3/\text{сек}$  воздуха при  $p_1 = 5 \text{ бар}$  и  $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить мощность, полученную при изотермическом расширении воздуха в машине, если  $p_2 = 1 \text{ бар}$ .

Ответ:  $L = 11,188 \text{ кВт}$ .

112. Воздуху в количестве  $0,1 \text{ м}^3$  при  $p_1 = 10 \text{ бар}$  и  $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  сообщается  $125 \text{ кДж}$  тепла; температура его при этом не меняется.

Определить конечное давление  $p_2$ , конечный объем  $V_2$ , получаемую работу  $L$ .

Ответ:  $p_2 = 2,86 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$ ;  $L = 125 \text{ кДж}$ .

113. При изотермическом сжатии  $2,1 \text{ м}^3$  азота, взятого при  $p_1 = 1 \text{ бар}$ , от газа отводится  $335 \text{ кДж}$  тепла.

Определить конечный объем  $V_2$ , конечное давление  $p_2$  и затраченную работу  $L$ .

Ответ:  $V_2 = 0,426 \text{ м}^3$ ;  $L = -335 \text{ кДж}$ ;  $p_2 = 4,93 \text{ бар}$ .

114.  $0,5 \text{ м}^3$  кислорода при давлении  $p_1 = 10 \text{ бар}$  и температуре  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  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:  $p_2 = 50 \text{ бар}$ ;  $V_2 = 0,1 \text{ м}^3$ ;  $L = -805 \text{ кДж}$ .

115. 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:  $\frac{L_2}{L_1} = 0,684$ .

116. Начальное состояние газа определяется параметрами:  $p_1 = 10 \text{ бар}$  и  $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ .

Построить изотерму расширения.

117. Начальное состояние газа определяется параметрами:  $p_1 = 0,5 \text{ бар}$  и  $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$ .

Построить изотерму сжатия.

118.  $10 \text{ кг}$  воздуха при давлении  $p_1 = 1,2 \text{ бар}$  и температуре  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  сжимаются изотермически; при этом в результате сжатия объем уменьшается в 2,5 раза.

Определить начальные и конечные параметры, количество тепла, работу и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $V_1 = 7,25 \text{ м}^3$ ;  $V_2 = 2,9 \text{ м}^3$ ;  $p_2 = 3 \text{ бар}$ ;  $Q = L = -797 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U = 0$ .

119.  $1 \text{ кг}$  воздуха при температуре  $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  и начальном давлении  $p_1 = 1 \text{ бар}$  адиабатно сжимается до  $8 \text{ бар}$ .

Определить работу, конечный объем и конечную температуру.

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

**120.** Воздух при давлении  $p_1 = 4,5$  бар, расширяясь адиабатно до 1,2 бар, охлаждается до  $t_2 = -45^\circ\text{C}$ .

Определить конечное давление и работу, совершенную 1 кг воздуха.

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

**121.** 1 кг воздуха, занимающий объем  $v_1 = 0,0887$  м<sup>3</sup>/кг при  $p_1 = 10$  бар, расширяется до 10-кратного объема.

Определить конечное давление и работу, совершенную воздухом, в изотермическом и адиабатном процессах.

*Ответ:*

1)  $T = \text{const}$ ;  $p_2 = 1$  бар;  $\ell = 204$  кДж/кг;

2)  $dQ = 0$ ;  $p_2 = 0,4$  бар;  $\ell = 133,5$  кДж/кг.

**122.** Воздух при температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  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:*  $p_1 = 3$  бар;  $\ell = 57,4$  кДж/кг.

**123.** 0,8 м<sup>3</sup> углекислого газа при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и давлении  $p_1 = 7$  бар адиабатно расширяются до трехкратного объема.

Определить конечные параметры  $p_2$  и  $t_2$  и величину полученной работы  $L$  ( $k$  принять равным 1,28).

*Ответ:*  $p_2 = 1,71$  бар;  $t_2 = -57,6^\circ\text{C}$ ;  $L = 535,7$  кДж.

**124.** 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;  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Температуры воспламенения смеси  $t_2 = 550^\circ\text{C}$ ;  $k = 1,39$ .

*Ответ:*  $p_2 = 42$  бар.

**125.** 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:*  $t_2 = 234^\circ\text{C}$ ;  $\Delta U = -471$  кДж.

**126.** В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении  $p_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ . Объем камеры сжатия двигателя составляет 16 % от объема, описываемого поршнем.

Определить конечное давление и конечную температуру газовой смеси при адиабатном ее сжатии. Показатель адиабаты  $k$  принять равным 1,38.

*Ответ:*  $p_2 = 15,4$  бар;  $t_2 = 412^\circ\text{C}$ .

**127.** В двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимется 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  $p_1 = 49$  бар, начальная температура  $t_1 = 80$  °С. Сжатие воздуха считать адиабатным.

*Ответ:*  $p_2 = 1$  бар;  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 16$ .

**128.** Объем воздуха при адиабатном сжатии в цилиндре двигателя внутреннего сгорания уменьшается в 13 раз. Начальная температура воздуха перед сжатием  $t_1 = 77$  °С, а начальное давление  $p_1 = 0,9$  бар.

Определить конечную температуру и давление воздуха после сжатия.

*Ответ:*  $t_2 = 703$  °С;  $p_2 = 32,7$  бар.

**129.** 2 кг воздуха при давлении  $p_1 = 1$  бар и  $t_1 = 15$  °С адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления  $p_2 = 7$  бар.

Определить конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие.

*Ответ:*  $t_2 = 229$  °С;  $L = -307$  кДж.

**130.** 1 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 0,95 бар и начальной температуре 10 °С сжимается по адиабате до 3,8 бар.

Определить температуру и объем воздуха в конце сжатия и работу, затраченную на сжатие.

*Ответ:*  $t_2 = 148$  °С;  $V_2 = 0,373$  м<sup>3</sup>;  $L = -117,5$  кДж.

**131.** Воздух при температуре 127 °С 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. Представить процесс расширения и сжатия воздуха в диаграмме  $pV$ .

*Ответ:*  $t_2 = -4$  °С.

**132.** 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 17$  °С сжимается адиабатно до объема, составляющего 1/5 начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема.

Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

*Ответ:*  $\ell = 67$  кДж/кг.

**133.** Воздух при температуре  $t_1 = 20$  °С должен быть охлажден посредством адиабатного расширения до температуры  $t_2 = -60$  °С. Конечное давление воздуха при этом должно составлять 1 бар.

Определить начальное давление воздуха  $p_1$  и удельную работу расширения  $\ell$ .

*Ответ:*  $p_1 = 3,04$  бар;  $\ell = 57,8$  кДж/кг.

**134.** Воздух в количестве 3 м<sup>3</sup> расширяется политропно от  $p_1 = 5,4$  бар и  $t_1 = 45$  °С до  $p_2 = 1,5$  бар. Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным 10 м<sup>3</sup>.

Определить показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенного тепла.

*Ответ:*  $n = 1,064$ ;  $t_2 = 21,4$  °С;  $L = 1875$  кДж;  $Q = 1575$  кДж = 376,4 ккал.

**135.** 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 ( $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ ) равна 14,  $t_1 = 77^\circ\text{C}$  и  $p_1 = 1$  бар.

*Ответ:*  $t_2 = 564^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 33,9$  бар.

**136.** 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)  $n = 1,49$ .

**137.**  $1,5\text{ м}^3$  воздуха сжимаются от 1 бар и  $17^\circ\text{C}$  до 7 бар; конечная температура при этом равна  $100^\circ\text{C}$ .

Какое количество тепла требуется отвести, какую работу затратить и каков показатель политропы?

*Ответ:*  $n = 1,147$ ;  $L = -290$  кДж;  $Q = -183$  кДж =  $-43,7$  ккал.

**138.** Горючая смесь в цилиндре двигателя, имеющая температуру  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  и давление  $p_1 = 0,9$  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:*  $\varepsilon = 5,9$ ;  $p_2 = 9,5$  бар.

**139.** В процессе политропного расширения воздух 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.

**140.** Воздух расширяется по политропе, совершая при этом работу, равную 270 кДж, причем в одном случае воздух 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)  $n = 1,88$ .

**141.** 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.

**142.** В газовом двигателе политропно сжимается горючая смесь  $R = 340$  Дж/кг · град, до температуры  $450^\circ\text{C}$ . Начальное давление смеси  $p_1 = 0,9$  бар, начальная температура  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,35$ .

Определить работу сжатия и степень сжатия.

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

**143.**  $2\text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 2$  бар и температуре  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  сжимаются до давления  $p_2 = 11$  бар и объема  $V_2 = 0,5\text{ м}^3$ .

Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенного тепла.

*Ответ:*  $n = 1,23$ ;  $L = -652$  кДж;  $Q = -272$  кДж =  $-65$  ккал.

**144.** Находящийся в двигателе внутреннего сгорания воздух при давлении  $p_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 100$  °С должен быть так сжат, чтобы конечная температура его поднялась до 650 °С.

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

*Ответ:*  $V_2 = 0,0512V_h$ .

**145.** 1 кг воздуха при давлении  $p_1 = 4$  бар и температуре  $t_1 = 100$  °С расширяется до давления  $p_2 = 1$  бар.

Определить конечную температуру, количество тепла и совершенную работу, если расширение происходит: а) изохорно, б) изотермически, в) адиабатно, г) политропно с показателем  $n = 1,2$ .

*Ответ:*

а)  $t_2 = -180$  °С;  $\ell = 0$ ;  $q = -202$  кДж/кг;

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

в)  $t_2 = -22$  °С;  $\ell = 87,5$  кДж/кг;  $q = 0$ ;

г)  $t_2 = 24$  °С;  $\ell = 10,9$  кДж/кг;  $q = 54,5$  кДж/кг.

## Глава 5. Второй закон термодинамики. Энтродия идеального газа

Второй закон термодинамики математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T},$$

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. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса примет вид:

$$dQ = T \cdot dS, \quad (39)$$

а так как, согласно первому закону термодинамики,

$$dQ = dU + p \cdot dV,$$

то уравнение (39) принимает следующий вид:

$$T \cdot dS = dU + p \cdot dV.$$

Общие формулы для вычисления изменения энтропии при протекании политропного процесса имеют вид:

$$s_2 - s_1 = c_v \cdot (k - n) \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (40)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \frac{k - n}{n} \ln \frac{p_1}{p_2};$$

$$s_2 - s_1 = c_v \frac{k - n}{n} \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат  $T - S$  имеют следующий вид.

Уравнение изохоры:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (41)$$

Уравнение изобары:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (42)$$

Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рис. 4.

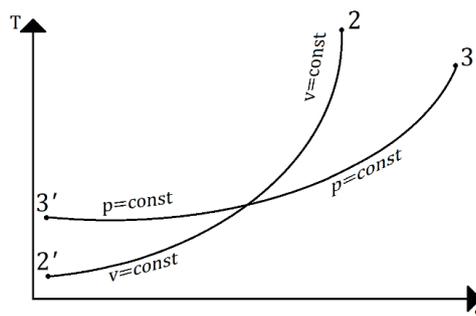


Рис. 4. Расположение изохоры и изобары

Уравнение изотермы:

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (43)$$

Уравнение адиабаты:

$$s = \text{const}. \quad (44)$$

Изображение изотермы и адиабаты в системе координат  $T - S$  дано на рис. 5.

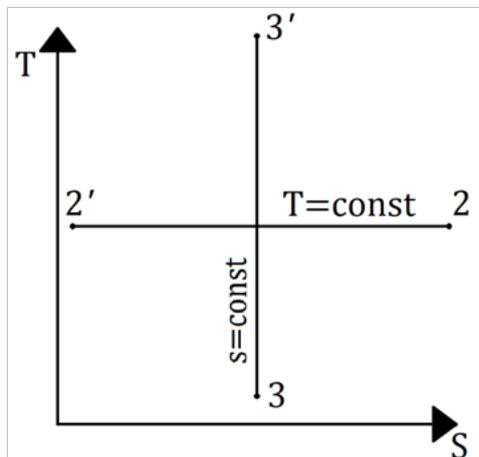


Рис. 5. Расположение изотермы и адиабаты

Для определения относительной энтропии принимают  $s_0 = 0$  при нормальных физических условиях, и тогда энтропия газа определяется по формулам:

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_0}. \quad (45)$$

$$s = c_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_0}; \quad (46)$$

### Максимальная работа

Если работа совершается газом, 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 по формуле

$$\ell_{\text{max полезн}} = u_1 - u_2 - T_0 \cdot (s_1 - s_2) - p_0 \cdot (v_2 - v_1).$$

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  $u_1 - u_2$  и  $T_0 \cdot (s_1 - s_2)$  представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процессов, то формулу работы можно представить в следующем виде:

$$\ell_{\text{max полезн}} = \ell_{\text{ад}} - \ell_{\text{из}} - p_0 \cdot (v_2 - v_1). \quad (47)$$

### Задачи

**146.** Найти значение энтропии 1 кг кислорода при давлении 2 бар и температуре 80 °С.

Решение

Используем формулу (46) для определения относительной энтропии:

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_0} = c_p \ln \frac{T}{273} - (c_p - c_v) \ln \frac{p}{p_0};$$
$$s = 2,303 \left[ 0,915 \ln \frac{353}{273} - (0,915 - 0,655) \lg \frac{2}{1,013} \right] = 0,0592 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

147. 1 кг кислорода при температуре  $t_1 = 127^\circ\text{C}$  расширяется до пятикратного объема; температуре его при этом падает до  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ .

Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Решение

По уравнению (45):

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T}{273} + R \frac{v_2}{v_1} = 2,303 \left( \frac{20,93}{32} \lg \frac{300}{400} + 0,260 \lg 5 \right) =$$
$$= 2,303 \cdot (-0,0818 + 0,1827) = 0,2324 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$$
$$= 0,055 \text{ кДж/ккал} \cdot \text{град.}$$

148. 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, затем при  $v = \text{const}$  давление повышается в 1,5 раза.

Определить общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

Решение

Изменение энтропии воздуха при адиабатном процессе будет равно нулю.

Изменение энтропии в изохорном процессе определяется по формуле (41):

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{T_3}{T_2} = c_v \ln \frac{p_3}{p_2} = c_v \ln 1,5 = 2,303 \frac{20,93}{28,96} \lg 1,5 = 0,293 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град,}$$

следовательно,

$$\Delta s = \Delta s_v = 0,293 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

149. В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении  $p_1 = 50$  бар и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Параметры среды:  $p_0 = 1$  бар;  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде. Представить процесс в диаграмме  $pV$ .

Решение

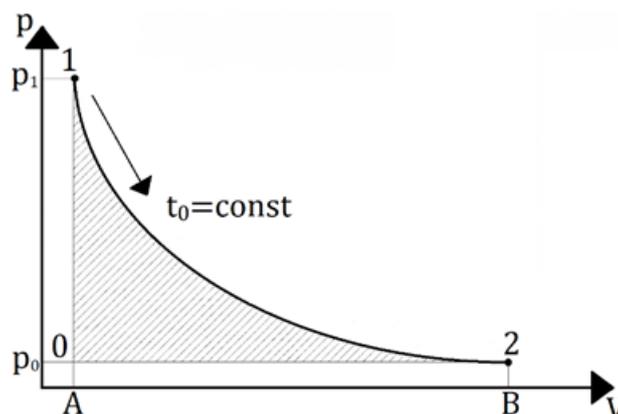


Рис. 6. Рисунок к задаче № 149

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.

На графике максимальная работа изобразится площадью 1-2-B-A, а максимальная полезная работа – площадью 1-2-0-1 (рис. 6).

Величина ее на основании формулы (47):

$$l_{\text{макс полезн}} = T_0 \cdot (s_2 - s_1) - p_0 \cdot (V_2 - V_1),$$

или

$$l_{\text{макс полезн}} = M \cdot T_0 \cdot (s_2 - s_1) - p_0 (V_2 - V_1).$$

Определим массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг};$$

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{50 \cdot 0,3}{4} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе по формуле (43)

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

то

$$L_{\text{макс полезн}} = M \cdot T_0 \cdot \left( R \ln \frac{p_1}{p_2} \right) - p_0 (V_2 - V_1) = 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot 2,3 \cdot 1,699 - 1 \cdot 10^5 (15,9 - 0,3) = 5\,847\,000 - 1\,470\,000 = 4\,377\,000 \text{ Дж} = 4377 \text{ кДж}.$$

**150.** Подсчитать энтропию для 1 кг азота с температурой 100 °С при следующих давлениях: 1, 2, 3, 4, 5 бар. Провести анализ влияния давления газа на его энтропию.

*Решение*

$$s = 2,303 \left[ 1,0391 \lg \frac{373}{273} - 0,2971 \lg \frac{p}{1,013} \right] = 0,319 - 0,684 \lg p.$$

Находим

Давление, бар	1	2	3	4	5
Энтропия, кДж/кг·град	0,319	0,113	-0,007	-0,093	-0,159

Решение показывает, что давление газа уменьшает его энтропию и даже приводит к ее отрицательным значениям.

**151.** Как изменилась энтропия 1 кг воздуха, если его давление увеличилось с 2 до 10 бар, а температура понизилась с 400 до 200 °С? Что это за процесс?

*Решение*

$n = 0,82$ ; процесс политропный.

$$\Delta s = \frac{0,82 - 1,4}{0,42 - 1} 0,716 \cdot 2,303 \lg \frac{478}{673} = -0,813 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град},$$

или

$$\Delta s = \frac{0,82 - 1,4}{0,82} 0,716 \cdot 2,303 \lg \frac{10}{2} = -0,813 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

**152.** 8 м<sup>3</sup> воздуха при нормальных физических условиях политропно расширяется с понижением температуры от 60 до -30 °С; начальное давление 30 атм.

Найти показатель политропы, работу расширения и изменения энтропии газа, если от него отведено в процессе 333 кДж тепла.

*Решение*

$$M = 8 \cdot 1,293 = 10,344 \text{ кг;}$$

$$M \cdot c_v \frac{k - n}{1 - n} (T_2 - T_1) = 10,344 \cdot 0,716 \frac{1,4 - n}{1 - n} (243 - 333) = -333 \text{ кДж.}$$

$$n = 1,8; L = 334 \text{ кДж; } \Delta U = -667 \text{ кДж; } \Delta s = 1,168 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

**153.** Имеется 10 м<sup>3</sup> смеси при нормальных физических условиях с объемным составом: O<sub>2</sub> = 20 %; CO<sub>2</sub> = 30 %; N<sub>2</sub> = 50 %. Давление смеси 5 ат, а температура 37 °С. После политропного сжатия давление поднялось до 10 ат, а температура до 147 °С.

Определить показатель политропы и изменение энтропии смеси. Значение  $k$  принять равным 1,38.

*Решение*

$$\mu = 0,2 \cdot 32 + 0,3 \cdot 44 + 0,5 \cdot 28 = 33,6;$$

$$R = 247,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град; } V = 10 \frac{1,033 \cdot 310}{5 \cdot 273} = 2,346 \text{ м}^3;$$

$$\frac{n - 1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\lg 420 - \lg 310}{\lg 10 - \lg 5} = 0,4384;$$

$$n = 1,78; \rho_0 = 1,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu c_p = \sum r_i \cdot \mu c_{p_i} = 0,2 \cdot 29,29 + 0,3 \cdot 36,06 + 0,5 \cdot 29,20 = 31,27 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град.}$$

$$c_v = \frac{31,27}{1,38 \cdot 33,6} = 0,675 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град,}$$

$$\Delta S = 10 \cdot 1,5 \frac{1,78 - 1,38}{1,78} \cdot 0,675 \cdot 2,303 \lg 2 = 1,577 \text{ кДж/град.}$$

**154.** 1 кг воздуха от начального состояния, характеризуемого давлением 10 ат и температурой 50 °С, изобарно расширяется до  $v_2 = 2v_1$ , а затем по адиабате расширяется еще до  $v_3 = 2v_2$ .

Определить работу, изменение внутренней энергии и энтропии в этих процессах и суммарно.

*Решение*

$$p_1 = 10 \text{ ат; } T_1 = 323 \text{ °С; } v_1 = 0,095 \text{ м}^3/\text{кг;}$$

$$p_2 = 10 \text{ ат; } T_2 = 646 \text{ °С; } v_2 = 0,19 \text{ м}^3/\text{кг;}$$

$$p_3 = 2,16 \text{ ат}; T_3 = 417 \text{ }^\circ\text{С}; v_3 = 0,57 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изобарный процесс:

$$\ell = 93,2 \text{ кДж/кг}; \Delta u = 231,2 \text{ кДж/кг}; \Delta s = 0,696 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

Адиабатный процесс:

$$\ell = 164 \text{ кДж/кг}; \Delta u = -164 \text{ кДж/кг}; \Delta s = 0.$$

Суммарный процесс:

$$\ell = 257,2 \text{ кДж/кг}; \Delta u = 67,2 \text{ кДж/кг}; \Delta s = 0,696 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}.$$

**155.** Определить энтропию 6,4 кг азота при  $p = 5$  бар и  $t = 300$  °С. Теплоемкость считать постоянной.

*Ответ:*  $S = 1,94 \text{ кДж/град} = 0,464 \text{ ккал/град}.$

**156.** 1 кг воздуха сжимается от  $p_1 = 1$  бар и  $t_1 = 15$  °С до  $p_2 = 5$  бар и  $t_2 = 100$  °С. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

*Ответ:*  $\Delta s = -0,196 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} = -0,047 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}.$

**157.** 1 кг воздуха сжимается по политропе от 1 бар и 20 °С до 8 бар при  $n = 1,2$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенного тепла и затраченную работу.

*Ответ:*  $t_2 = 141$  °С;  $\Delta s = -0,2445 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}; q = -87,1 \text{ кДж/кг};$

$\ell = -173 \text{ кДж/кг}.$

**158.** В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре  $t_1 = 20$  °С и давлении  $p_1 = 100$  бар. Температура среды  $t_0 = 20$  °С, давление среды  $p_0 = 1$  бар.

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

*Ответ:*  $L_{\text{мажполезн}} = 7220 \text{ кДж}.$

**159.** В сосуде объемом 400 л заключен воздух при  $p_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = -40$  °С. Параметры среды:  $p_0 = 1$  бар и  $t_0 = 20$  °С.

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести воздух, заключенный в сосуде. Представить процесс в диаграммах  $p - V$  и  $T - s$ .

*Ответ:*  $L_{\text{мажполезн}} = 4600 \text{ Дж} \cdot \rho$

## Глава 6. Круговые процессы

Круговым процессом, или циклом, называют совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

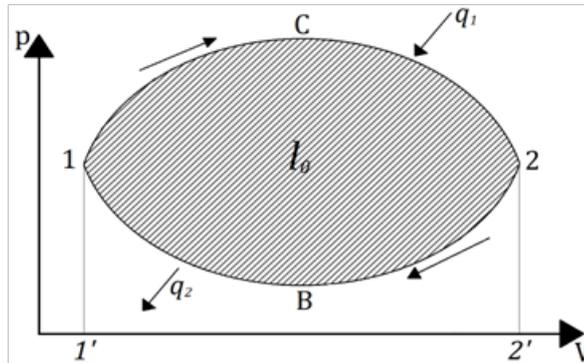


Рис. 7. Круговой процесс  $\ell_0$

Работа кругового процесса  $\ell_0$  изображается в диаграмме  $p - V$  (рис. 7) площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла, причем работа положительна, если цикл совершается по часовой стрелке (прямой цикл). Прямой цикл ( $\ell_0 > 0$ ) характерен для тепловых двигателей, обратный цикл ( $\ell_0 < 0$ ) – для холодильных машин.

$$\ell_0 = q_1 - q_2,$$

где  $q_1$  – количество тепла, подведенного к 1 кг рабочего тела от внешнего источника тепла;

$q_2$  – количество тепла, отведенного от 1 кг рабочего тела внешнему охладителю.

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{\ell_0}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (49)$$

В диаграмме  $T - s$  полезное использованное тепло изображается площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла (рис. 8). Степень совершенства процесса превращения тепла в работу характеризуется термическим КПД:

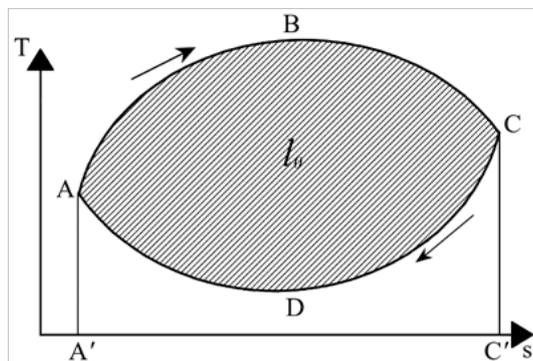


Рис. 8. Исползованное тепла в круговом процессе  $\ell_0$

### Цикл Карно

Цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм (рис. 9 и 10).

Количество отведенного тепла определяется по формуле

$$q_2 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Количество отведенного тепла определяется по формуле

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4}.$$

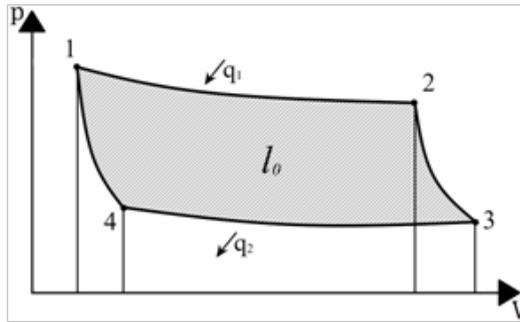


Рис. 9. Цикл Карно в системе координат  $p - V$

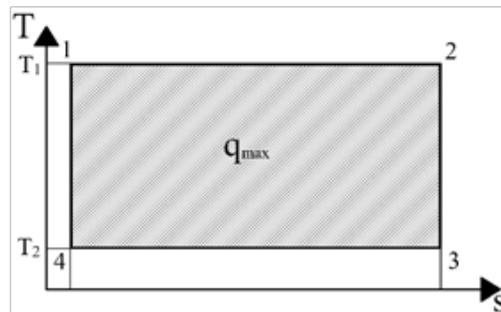


Рис. 10. Цикл Карно в системе координат  $T - s$

Работа цикла Карно определяется уравнением  $\ell_0 = q_1 - q_2$ .

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (49)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – соответственно температура верхнего и нижнего источника тепла в °К.

### Теоретический цикл поршневых двигателей внутреннего сгорания

Цикл с подводом тепла при постоянном объеме состоит из двух адиабат и двух изохор (рис. 11 и 12).

Характеристиками цикла являются:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} - \text{степень сжатия};$$

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} - \text{степень повышения давления}.$$

Количество подведенного тепла:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2).$$

Количество отведенного тепла:

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1).$$

Работа цикла:

$$\ell_0 = q_1 - q_2.$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (50)$$

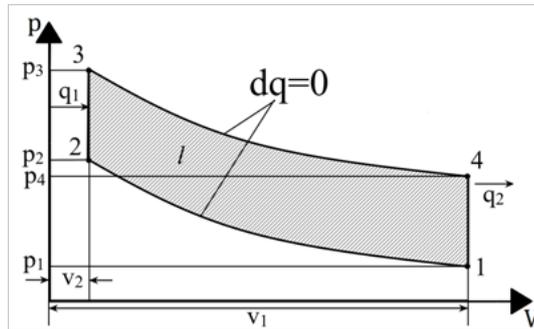


Рис. 11. Цикл с подводом тепла при постоянном объеме, в координатах  $p - V$

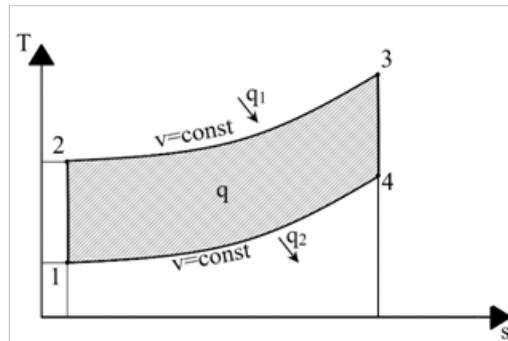


Рис. 12. Цикл с подводом тепла при постоянном объеме, в координатах  $T - s$

Цикл с подводом тепла при постоянном давлении состоит из двух адиабат; одной изобары и одной изохоры (рис. 13 и 14).

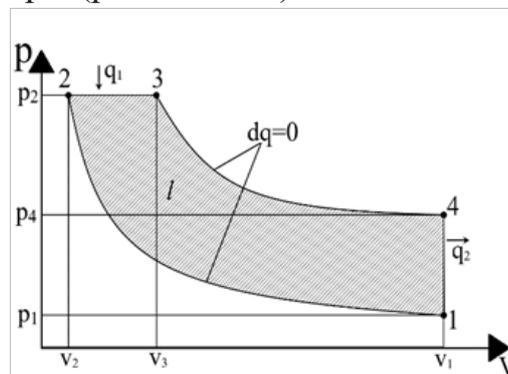


Рис. 13. Цикл с подводом тепла при постоянном давлении, в координатах  $p - V$

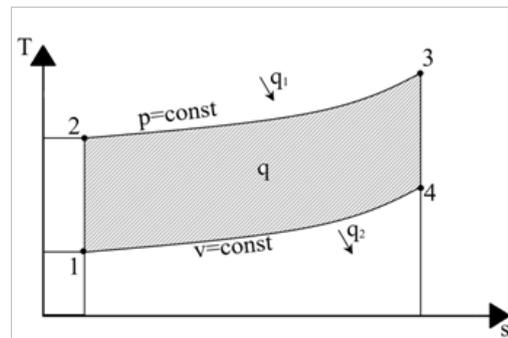


Рис. 14. Цикл с подводом тепла при постоянном давлении, в координатах  $T - s$

Характеристиками цикла являются:

$$\text{степень сжатия } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2};$$

$$\text{степень предварительного расширения } \rho = \frac{v_3}{v_2}.$$

Количество подведенного тепла:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2).$$

Количество отведенного тепла:

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1).$$

Работа цикла:

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho - 1)}. \quad (51)$$

Цикл с комбинированным подводом тепла состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары (рис. 15 и 16).

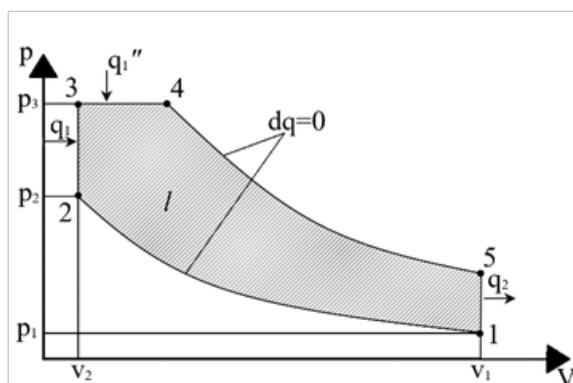


Рис. 15. Цикл с комбинированным подводом, в координатах  $p - V$

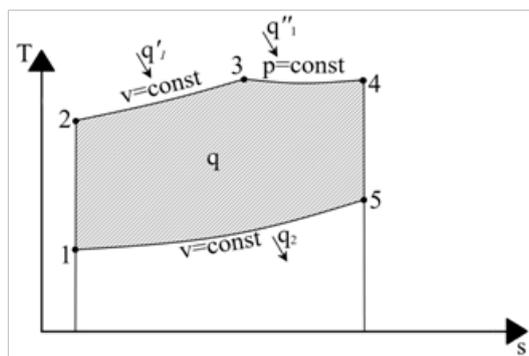


Рис. 16. Цикл с комбинированным подводом, в координатах  $T - s$

Характеристиками цикла являются:

$$\text{степень сжатия } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2};$$

$$\text{степень повышения давления } \lambda = \frac{p_3}{p_2};$$

$$\text{степень предварительного расширения } \rho = \frac{v_4}{v_3}.$$

Количество подведенного тепла:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3).$$

Количество отведенного тепла:

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1).$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda(\rho - 1)}. \quad (52)$$

### Сжатие газа в компрессоре

Рабочий процесс компрессора при сжатии газа от  $p_1$  до  $p_2$  представлен на диаграммах  $p - V$  и  $T - s$  (рис. 17 и 18).

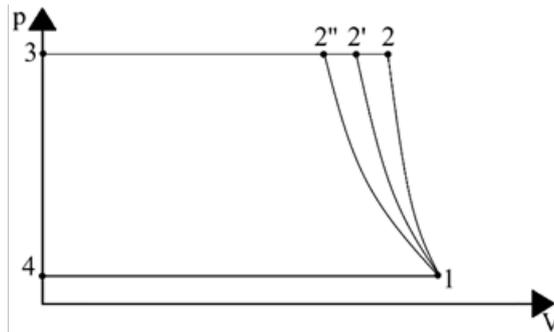


Рис. 17. Рабочий процесс компрессора в координатах  $p - V$

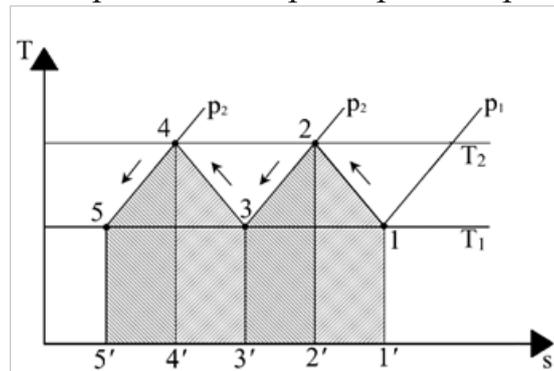


Рис. 18. Рабочий процесс компрессора в координатах  $T - s$

Расход энергии на производство 1 кг сжатого газа определяется следующим образом:

при изотермическом сжатии:

$$\ell = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (53)$$

при адиабатном сжатии:

$$\ell = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]; \quad (54)$$

при политропном сжатии:

$$\ell = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (55)$$

Мощность, потребляемая компрессором при его часовой производительности  $M$  кг/ч, равна:

$$N = \frac{M \cdot \ell}{3600 \cdot \eta_k}, \quad (56)$$

где  $\eta_k$  – эффективный КПД компрессора ( $\eta_k = \eta_{\text{из}} \cdot \eta_{\text{м}}$  или  $\eta_k = \eta_{\text{ад}} \cdot \eta_{\text{м}}$ ).

При многоступенчатом сжатии в  $n$  степенях оптимальная степень сжатия в одной ступени равна

$$\pi = \sqrt[n]{\frac{p_k}{p_H}}. \quad (57)$$

Максимальная степень сжатия в одной ступени допускается не более:

в поршневых компрессорах – 5–6;

в центробежных компрессорах – 3,5–4;

в осевых компрессорах – 1,3–1,4.

Расход воды, охлаждающей газ в холодильнике между ступенями и в рубашке цилиндра, определяется по формуле

$$D_B = \frac{Q}{4,187 \cdot \Delta t'}, \quad (58)$$

где  $Q$  – отводимая от газа теплота, в кДж;

$\Delta t'$  – подогрев охлаждающей воды, в °С.

### Задачи

**160.** 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур  $t_1 = 627$  °С и  $t_2 = 27$  °С, 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:

$$p_1 = 60 \text{ бар}, T_1 = 900 \text{ °С}.$$

Удельный объем газа определяем из характеристического уравнения:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 900}{60 \cdot 10^5} = 0,043 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2:

$$T_2 = 900 \text{ °С}.$$

Из уравнения адиабаты (линия 2–3)

$$\frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 3^{0,4} = 46,8$$

получаем

$$p_2 = 1 \cdot 46,8 \text{ бар}.$$

Из уравнения изотермы (линия 1–2)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

получаем

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2} = \frac{60 \cdot 0,043}{46,8} = 0,055 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3:

$$p_3 = 1 \text{ бар}, T_3 = 300 \text{ °К.}$$
$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{287 \cdot 300}{1 \cdot 10^5} = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 4:

$$T_4 = 300 \text{ °К.}$$

Из уравнения адиабаты (линия 4–1)

$$\frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 46,8$$

получаем

$$p_4 = \frac{p_1}{46,8} = 1,284 \text{ бар.}$$

Из уравнения изотермы (линия 3–4) получаем

$$p_3 v_3 = p_4 v_4;$$
$$v_4 = \frac{p_3 v_3}{p_4} = \frac{1 \cdot 0,861}{1,284} = 0,671 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0,667.$$

Подведенное количество тепла:

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 2,303 \cdot 287 \cdot 900 \lg \frac{0,055}{0,043} = 63,6 \text{ кДж/кг.}$$

Отведенное количество тепла:

$$q_2 = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} = 2,303 \cdot 287 \cdot 300 \lg \frac{0,861}{0,671} = 21,5 \text{ кДж/кг.}$$

Работа цикла:

$$\ell_0 = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг.}$$

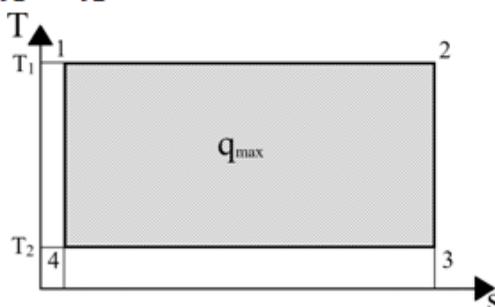


Рис. 19. Рисунок к задаче № 160

**161.** Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при  $v = const$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенного и отведенного тепла, если дано:  $p_1 = 1$  бар;  $t_1 = 20$  °С;  $\varepsilon = 3,6$ ;  $\lambda = 3,33$ ;  $k = 1,4$ .

Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

*Решение*

Расчет ведем для 1 кг воздуха.

Точка 1:

$$p_1 = 1 \text{ бар}; t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Удельный объем определяем из уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2:

Так как степень сжатия  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 0,36,$

то  $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,84}{3,6} = 0,233 \text{ м}^3/\text{кг}.$

Температура в конце адиабатного сжатия определяется из соотношения:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 3,6^{0,4} = 489 \text{ }^\circ\text{K};$$
$$t_2 = 216 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Давление в конце адиабатного сжатия:

$$p_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 489}{0,233 \cdot 10^5} = 6,02 \text{ бар}.$$

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,

$$p_3 = p_2 \cdot \lambda = 6,02 \cdot 3,33 = 20 \text{ бар};$$
$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 489 \cdot 3,33 = 1628 \text{ }^\circ\text{K};$$
$$t_3 = 1355 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Точка 4:

Удельный объем

$$v_4 = v_1 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура в конце адиабатного расширения

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 1628 \frac{1}{3,6^{0,4}} = 976 \text{ }^\circ\text{K}.$$

Давление в конце адиабатного расширения определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4–1):

$$p_4 = p_1 \frac{T_4}{T_1} = 1 \cdot \frac{976}{293} = 3,33 \text{ бар}.$$

Количество подведенного тепла:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) = \frac{20,93}{28,96} (1628 - 293) = 825 \text{ кДж/кг.}$$

Количество отведенного тепла:

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) = \frac{20,93}{28,96} (976 - 293) = 495 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД цикла определяется по формуле (48):

$$\eta_t = \frac{825 - 495}{825} = \frac{330}{825} = 0,4 = 40 \%$$

или по формуле (50):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{3,6^{0,4}} = 0,4 = 40 \%$$

Работа цикла:

$$\ell_0 = q_1 - q_2 = 330 \text{ кДж/кг.}$$

**162.** Для цикла с подводом тепла при  $p = const$  (рис. 20) определить параметры в характерных точках, полезную работу, термический КПД, количество подведенного и отведенного тепла, если дано:  $p_1 = 1$  бар;  $t_1 = 20$  °С;  $\varepsilon = 12,6$ ;  $k = 1,4$ .

Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

*Решение*

Точка 1:

$$p_1 = 1 \text{ бар; } t_1 = 20 \text{ °С.}$$

Определяем удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 2:

Так как степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 12,7,$$

то

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,84}{12,7} = 0,0661 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Температура в конце адиабатного сжатия:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 12,7^{0,4} = 293 \cdot 2,76 = 809 \text{ °К;}$$

$$t_2 = 536 \text{ °С.}$$

Давление в конце адиабатного сжатия:

$$p_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 809}{0,0661 \cdot 10^5} = 35,1 \text{ бар.}$$

Точка 3:

Из соотношения параметров в изобарном процессе получаем:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho = 2.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned}v_3 &= v_2 \cdot \rho = 0,661 \cdot 2 = 0,1322 \text{ м}^3/\text{кг}; \\T_3 &= T_2 \cdot \rho = 809 \cdot 2 = 1618 \text{ }^\circ\text{К}; \\t_3 &= 1345 \text{ }^\circ\text{С}; \\p_3 &= p_2 = 35,1 \text{ бар}.\end{aligned}$$

Точка 4:

$$v_4 = v_1 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Давление в конце адиабатного расширения:

$$\begin{aligned}\frac{p_3}{p_4} &= \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^k = \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^k = \left(\frac{0,84}{0,1322}\right)^{1,4} = 13,3; \\p_4 &= \frac{35,1}{13,3} = 2,64 \text{ бар}.\end{aligned}$$

Температуру в конце адиабатного сжатия определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линии 4–1):

$$\begin{aligned}T_4 &= T_1 \cdot \frac{p_4}{p_1} = 293 \cdot \frac{2,64}{1} = 773 \text{ }^\circ\text{К}; \\t_4 &= 500 \text{ }^\circ\text{С}.\end{aligned}$$

Количество подведенного тепла:

$$\begin{aligned}q_1 = q_{2-3} &= c_p(t_3 - t_2) = \frac{29,3}{28,96} \cdot (1345 - 536) = 818 \text{ кДж/кг}; \\q_2 = q_{4-1} &= c_v(t_4 - t_1) = \frac{20,97}{28,96} \cdot (500 - 20) = 347 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{818 - 347}{818} = 0,576 = 57,6 \text{ } \%$$

Работа цикла:

$$\ell_0 = q_1 - q_2 = 818 - 347 = 471 \text{ кДж/кг}.$$

**163.** Компрессор всасывает воздух при давлении 1 бар и температуре 20 °С и сжимает его до 6 бар.

Определить теоретическую мощность компрессора при изотермном, адиабатном и политропном ( $n = 1,2$ ) сжатии; найти также параметры сжатого воздуха. Часовая производительность компрессора 1200 м<sup>3</sup>/ч при нормальных физических условиях.

*Решение*

В течение часа компрессор всасывает следующее количество воздуха:

$$\begin{aligned}V_1 &= 1200 \cdot \frac{760 \cdot 293}{750 \cdot 273} = 1305 \text{ м}^3/\text{ч}; \\M &= 1200 \cdot 1,293 = 1551,6 \text{ кг/ч}.\end{aligned}$$

1. Изотермический процесс.

Работа на сжатие 1 кг воздуха составляет

$$\ell_{\text{из}} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,303 \cdot 287 \cdot 293 \lg 6 = 150,5 \text{ кДж/кг};$$

мощность компрессора в изотермном процессе равна

$$N_{\text{из}} = \frac{p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}}{3600 \cdot 1000} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 1305 \cdot 2,303 \lg 6}{3600 \cdot 1000} = 64,0 \text{ кВт},$$

или

$$N_{\text{из}} = \frac{1551,6 \cdot 150,5}{3600} = 64,9 \text{ кВт}.$$

В течение часа компрессор дает  $\frac{1305}{6} = 217,5 \text{ м}^3$  воздуха при давлении 6 бар и температуре  $293 \text{ °К} = 20 \text{ °С}$ .

2. Политропный процесс,  $n = 1,2$ .

Работа по сжатию 1 кг воздуха равна

$$\ell_{\text{п}} = \frac{1,2}{0,2} \cdot 287 \cdot 293 \left[ 6^{\frac{0,2}{1,2}} - 1 \right] = 175,6 \text{ кДж/кг};$$

мощность компрессоры в политропном процессе равна

$$N_{\text{п}} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 1305 \cdot \frac{1,2}{0,2} \left[ 6^{\frac{0,2}{1,2}} - 1 \right]}{3600 \cdot 1000} = 75,7 \text{ кВт};$$

конечная температура воздуха равна

$$T_2 = 293 \cdot 6^{0,167} = 395 \text{ °К} = 122 \text{ °С};$$

часовой объем подаваемого воздуха

$$V_2 = 1305 \cdot \frac{1}{6^{\frac{1}{1,2}}} = 293 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3. Адиабатный процесс.

На сжатие 1 кг воздуха расходуется энергии

$$\ell_{\text{ад}} = \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot 293 [6^{0,286} - 1] = 197,2 \text{ кДж/кг};$$

$$N_{\text{ад}} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 1305 \cdot 3,5 [6^{0,286} - 1]}{3600 \cdot 1000} = 85,0 \text{ кВт}.$$

Компрессор подает в течение часа при

$$T_2 = 293 \cdot 6^{0,286} = 489 \text{ °С}$$

$$V_2 = 363 \text{ м}^3 \text{ воздуха}.$$

**164.** Воздух при давлении 1 бар и температуре  $20 \text{ °С}$  должен быть сжат по адиабате до давления 8 бар.

Определить температуру в конце сжатия, теоретическую работу компрессора:

а) для одноступенчатого компрессора;

б) для двухступенчатого компрессора с промежуточным холодильником, в котором воздух охлаждается до начальной температуры.

Относительная величина вредного пространства равна 8 %. Полученные результаты свести в таблицу и сравнить между собой.

*Решение*

а) одноступенчатое сжатие:

температуру в конце сжатия определяем по формуле (28):

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 8^{\frac{0,4}{1,4}} = 293 \cdot 1,81 = 530 \text{ }^\circ\text{K};$$
$$t_2 = 257 \text{ }^\circ\text{C};$$

теоретическая работа компрессора определяется по формуле (54):

$$\ell_0 = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot 293 \cdot (1,81 - 1) = 238\,410 \text{ Дж/кг};$$

б) двухступенчатое сжатие:

степень сжатия в каждой ступени определяем по уравнению (57):

$$\pi = \sqrt{\frac{8}{1}} = 2,84.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени равна:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 2,84^{\frac{0,4}{1,4}} = 293 \cdot 1,35 = 396 \text{ }^\circ\text{K};$$
$$t_2 = 123 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теоретическая работа компрессора в обеих ступенях равна

$$\ell_0 = 2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot 293 \cdot (1,35 - 1) = 206\,000 \text{ Дж/кг}.$$

Полученные результаты приведены в таблице.

Наименование величин	Одноступенчатое сжатие	Двухступенчатое сжатие
Температура в конце сжатия, °С	257	123
Теоретическая затрата работы, Дж/кг	238 410	206 000

Приведенные данные наглядно показывают преимущества двухступенчатого сжатия.

**165.** Для двигателя с воспламенением от сжатия необходим трехступенчатый компрессор, подающий 250 кг/ч воздуха при давлении 80 бар.

Определить теоретическую мощность компрессора. Сжатие считать адиабатным. В начале сжатия  $p_1 = 0,95$  бар и  $t_1 = 17$  °С.

*Решение*

Отношение давлений в каждой ступени определяется по формуле (57):

$$\pi = \sqrt[3]{\frac{80}{0,95}} = 4,38.$$

Таким образом,

$$\frac{p_2}{p_1} = 4,38;$$
$$\frac{p_4}{p_2} = 4,38.$$

Следовательно,

$$p_2 = 4,38 \cdot 0,95 = 4,16 \text{ бар}; p_4 = 4,38 \cdot 4,16 = 18,22 \text{ бар}.$$

Затрата работы на каждую ступень компрессора определяется по формуле (55):

$$\ell_0 = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] =$$
$$= \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot 290 \left( 4,38^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) = 1,54 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}.$$

Затрата работы на трехступенчатый компрессор:

$$\ell_0 = n \cdot \ell'_0 = 3 \cdot 1,54 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}.$$

Мощность компрессора:

$$N = \frac{250 \cdot 4,62 \cdot 10^5}{3600 \cdot 1000} = 32,1 \text{ кВт}.$$

**166.** К газу в круговом процессе подведено 250 кДж тепла. Термический КПД равен 0,46.

Определить работу, полученную за цикл.

*Ответ:*  $L_0 = 115$  кДж.

**167.** В результате осуществления кругового процесса получена работа, равная 80 кДж, а отдано охладителю 50 кДж тепла. Определить термический КПД цикла.

*Ответ:*  $\eta_t = 0,615$ .

**168.** 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур  $t_1 = 250$  °С и  $t_2 = 30$  °С. Наивысшее давление  $p_1 = 10$  бар, наинизшее  $p_3 = 1,2$  бар.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, количество подведенного и отведенного тепла, работу и термический КПД цикла.

*Ответ:*

$$v_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = 0,185 \text{ м}^3/\text{кг}; v_3 = 0,725 \text{ м}^3/\text{кг}; v_4 = 0,59 \text{ м}^3/\text{кг};$$
$$p_2 = 8,1 \text{ бар}; p_4 = 1,48 \text{ бар};$$

$$\eta_t = 0,42; \ell_0 = 18,1 \text{ кДж/кг}; q_1 = 31,1 \text{ кДж/кг}; q_2 = 18 \text{ кДж/кг}.$$

**169.** Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при  $v = \text{const}$  определить параметры характерных для цикла точек, количество подведенного и отведенного тепла, термический КПД цикла и его полезную работу, если дано:  $p_1 = 1$  бар;  $t_1 = 100$  °С;  $\varepsilon = 6$ ;  $\lambda = 1,6$ ;  $k = 1,4$ . Рабочим телом является воздух. Теплоемкость принять постоянной.

*Ответ:*

$$v_1 = 1,07 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = 0,178 \text{ м}^3/\text{кг};$$
$$T_2 = 761 \text{ °К}; T_3 = 1217 \text{ °К}; T_4 = 597 \text{ °К};$$
$$p_3 = 19,6 \text{ бар}; p_4 = 1,56 \text{ бар};$$

$$q_1 = 329,7 \text{ кДж/кг}; q_2 = 162 \text{ кДж};$$

$$\eta_t = 0,51; \ell_0 = 167,7 \text{ кДж/кг}.$$

170. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при  $v = \text{const}$  степень сжатия  $\varepsilon = 5$ , степень увеличения давления  $\lambda = 1,5$ .

Определить термический КПД этого цикла, а также цикла Карно, совершающегося при тех же предельных температурах. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Ответ: 1)  $\eta_t = 0,476$ ; 2)  $\eta_t = 0,651$ .

171. Температура воспламенения топлива, подаваемого в цилиндр двигателя с изобарным подводом тепла, равна  $800^\circ\text{C}$ .

Определить минимально необходимое значение степени сжатия  $\varepsilon$ , если начальная температура воздуха  $t_1 = 77^\circ\text{C}$ . Сжатие считать адиабатным,  $k = 1,4$ .

Ответ:  $\varepsilon = 16,4$ .

172. Поршневой двигатель работает на воздухе по циклу с отводом тепла при  $v = \text{const}$ . Начальное состояние воздуха:  $p_1 = 0,8$  ат и  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,6$ . Количество подведенного тепла составляет  $240$  ккал/кг.

Определить термический КПД двигателя и его мощность, если диаметр цилиндра  $d = 240$  мм, ход поршня  $S = 340$  мм, число оборотов  $n = 200$  в минуту и за каждые два оборота совершается один цикл.

Ответ:  $\eta_t = 0,457$ ;  $N = 14,5$  кВт.

173. Определить значения давления и объема в характерных точках цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при  $p = \text{const}$ , а также термический КПД и полезную работу, если дано:  $p_1 = 1$  бар;  $\varepsilon = 14$ ;  $\rho = 1,5$ ;  $k = 1,4$ .

Диаметр цилиндра  $d = 300$  мм, ход поршня  $S = 450$  мм. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ:

$$V_1 = V_4 = 0,03416 \text{ м}^3; V_2 = 0,00244 \text{ м}^3; V_3 = 0,00366 \text{ м}^3;$$

$$p_2 = 40,23 \text{ бар}; p_4 = 1,76 \text{ бар};$$

$$\eta_t = 0,65.$$

174. В цикле с подводом тепла при  $p = \text{const}$  начальное давление воздуха  $p_1 = 0,9$  бар, температура  $t_1 = 47^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 12$ , степень предварительного расширения  $\rho = 2$  и  $V_1 = 1 \text{ м}^3$ .

Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу и его термический КПД.

Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Ответ:

$$V_2 = 0,0832 \text{ м}^3; V_3 = 0,166 \text{ м}^3;$$

$$p_2 = 29,2 \text{ бар}; p_4 = 2,38 \text{ бар};$$

$$T_2 = 865 \text{ }^\circ\text{K}; T_3 = 1730 \text{ }^\circ\text{K}; T_4 = 845 \text{ }^\circ\text{K};$$

$$L_0 = 478 \text{ кДж}; Q_1 = 842 \text{ кДж}; Q_2 = 364 \text{ кДж}; \eta_t = 0,565.$$

175. Рабочее тело поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом тепла обладает свойствами воздуха. Известны начальные параметры  $p_1 = 1$  бар;  $t_1 = 30$  °С и следующие характеристики цикла:  $\varepsilon = 7$ ;  $\lambda = 2,0$  и  $\rho = 1,2$ .

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенного тепла, полезную работу и термический КПД цикла.

Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ:

$$\begin{aligned} v_1 &= 0,870 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = 0,124 \text{ м}^3/\text{кг}; v_4 = 0,149 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ p_2 &= 15,2 \text{ бар}; p_3 = 30,5 \text{ бар}; p_5 = 2,6 \text{ бар}; \\ t_2 &= 387 \text{ °С}; t_3 = 1047 \text{ °С}; t_4 = 1311 \text{ °С}; t_5 = 511 \text{ °С}; \\ q_1 &= 744,2 \text{ кДж/кг}; q_2 = 378,2 \text{ кДж/кг}; \ell_0 = 396 \text{ кДж/кг}; \eta_t = 0,532. \end{aligned}$$

176. Двухступенчатый компрессор всасывает воздух при давлении  $p_1 = 1$  бар и температуре  $t_1 = 20$  °С и сжимает его до конечного давления  $p_2 = 40$  бар. Между ступенями компрессора установлен промежуточный холодильник, в котором воздух охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры. Производительность компрессора  $V_H = 500$  м<sup>3</sup>/ч.

Определить теоретическую мощность каждой ступени и количество тепла, которое должно быть отведено от обеих ступеней компрессора и промежуточного холодильника, если известно, что отношение конечного давления к начальному одинаково для обеих ступеней и сжатие происходит политропно с показателем  $n = 1,3$ . Изобразить процесс сжатия и охлаждения воздуха в диаграммах  $p - V$  и  $T - s$ .

$$\text{Ответ: } N_1 = N_2 = 35,3 \text{ кВт}; Q_1 = Q_2 = -24780 \text{ кДж/ч}; Q_{n \cdot x} = 104,3 \text{ МДж/ч}.$$

177. Трехступенчатый компрессор всасывает 60 м<sup>3</sup>/ч воздуха при  $p_1 = 0,8$  бар и  $t_1 = 27$  °С и сжимает его адиабатно до 100 бар.

Определить производительность компрессора по сжатому воздуху  $V_{сж}$  и работу, затраченную на сжатие в компрессоре.

$$\text{Ответ: } V_{сж} = 0,8 \text{ м}^3/\text{ч}; L_0 = 29\,383 \text{ кДж/ч}.$$

178. Производительность воздушного компрессора при начальных параметрах  $p_1 = 1$  бар и  $t_1 = 25$  °С и конечном давлении  $p_2 = 6$  бар составляет 500 кг/ч. Процесс сжатия воздуха – политропный, показатель политропы  $n = 1,2$ . Отношение хода поршня к диаметру  $\frac{S}{D} = 1,3$ . Число оборотов  $n = 300$  в минуту.

Определить теоретическую мощность двигателя, необходимую для привода компрессора, ход поршня и диаметр цилиндра.

$$\text{Ответ: } N = 24,8 \text{ кВт}; D = 0,287 \text{ м}; S = 0,373 \text{ м}.$$

## Глава 7. Водяной пар

В теплотехнических расчетах пользуются таблицами насыщенного и перегретого пара, и исключительно большое значение имеет диаграмма  $i - s$  водяного пара.

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и степенью сухости  $x$ . Очевидно, значение  $x = 0$  соответствует воде в состоянии кипения, а  $x = 1$  – сухому насыщенному пару.

Удельный объем влажного пара зависит от давления и от степени сухости и определяется из уравнения:

$$v_x = v'' \cdot x + (1 - x)v'; \quad (59)$$

где  $v'$  – удельный объем кипящей воды, м<sup>3</sup>/кг;

$v''$  – удельный объем сухого насыщенного пара, м<sup>3</sup>/кг;

$x$  – степень сухости пара.

Из этой формулы получаем значение  $x$ :

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}. \quad (60)$$

Плотность влажного пара определяется из равенства:

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v'' \cdot x + (1 - x)v'}.$$

Перегретый пар имеет более высокую температуру  $t$  по сравнению с температурой  $t_H$  сухого насыщенного пара того же давления. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления  $t - t_H$  называют перегревом пара.

Энтальпия  $i''$  сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$i'' = i' + r, \quad (61)$$

где  $i'$  – энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

$r$  – теплота парообразования, кДж/кг.

Для влажного насыщенного пара значение его энтальпии равно:

$$i_x = i' + r \cdot x. \quad (62)$$

Количество тепла, необходимое для перегрева 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении, называют теплотой перегрева. Очевидно, что

$$q_n = \int_{t_H}^t c_p \cdot dt,$$

где  $c_p$  – истинная массовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении.

Теплота перегрева может быть найдена из выражения:

$$q_{\Pi} = i - i',$$

где  $i$  – энтальпия перегретого пара, кДж/кг.

Изменение внутренней энергии пара определяется из выражений:

$$u'' = i'' - pv'' \text{ – для сухого насыщенного пара;} \quad (63)$$

$$u_x = i_x - pv_x \text{ – для влажного насыщенного пара;} \quad (64)$$

$$u = i - pv \text{ – для перегретого пара.} \quad (65)$$

Энтропия водяного пара отсчитывается от условного нуля, в качестве которого принимают энтропию воды при 0,01 °С и при давлении насыщения, соответствующем этой температуре, т. е. при давлении 0,006108 бар (0,006228 ат).

Энтропия жидкости  $s'$  определяется из выражения:

$$s' = c \ln \frac{T_H}{273}, \quad (66)$$

где  $c$  – теплоемкость воды;

$T_H$  – температура насыщения в °К.

Энтропия сухого насыщенного пара  $s''$  определяется из уравнения:

$$s'' = s' + \frac{r}{T_H}, \quad (67)$$

где  $r$  – теплота парообразования.

Энтропия влажного насыщенного пара определяется как

$$s_x = s' + \frac{r}{T_H} x, \text{ или } s_x = s' + (s'' - s')x, \quad (68)$$

где  $x$  – степень сухости пара.

Энтропия перегретого пара может быть найдена из уравнения:

$$s = s'' + \int_{T_H}^T c_p \frac{dT}{T}. \quad (69)$$

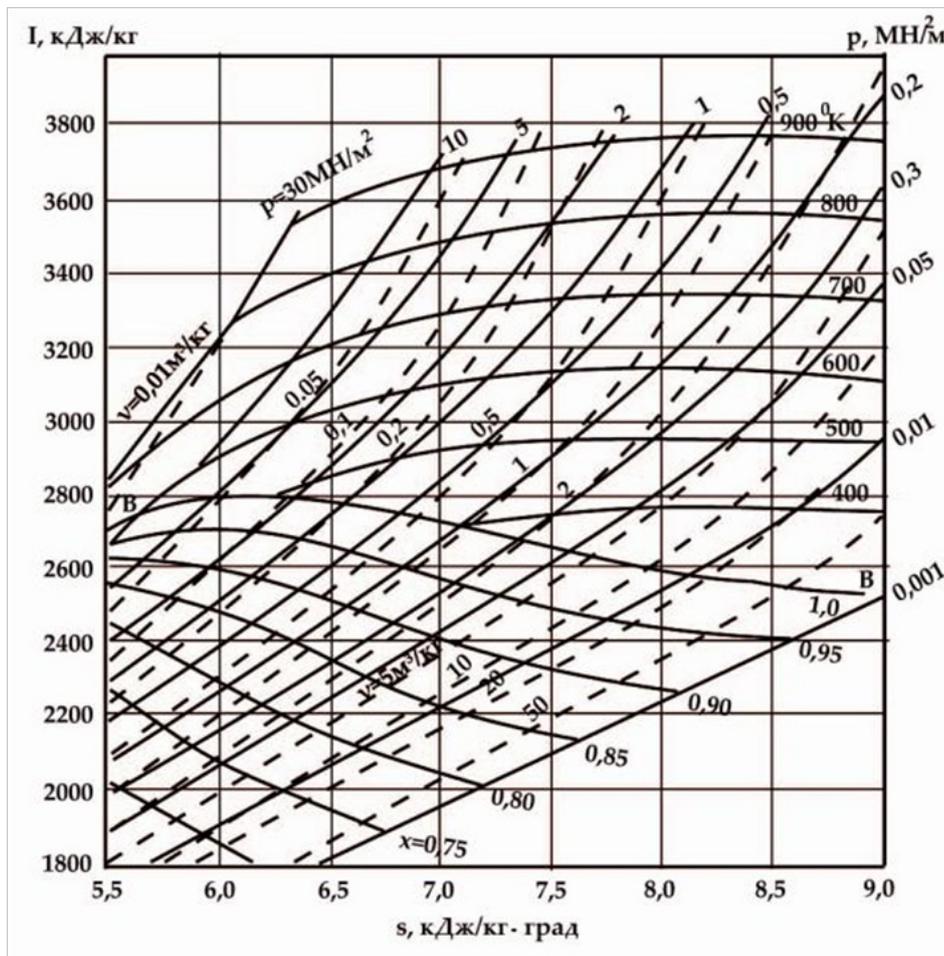


Рис. 21. Диаграмма  $i - s$

На рис. 21 изображена диаграмма  $i - s$  для водяного пара. На ней нанесены изохоры (пунктирные кривые), изобары, изотермы и линии равной сухости пара. Линия  $BB$  – верхняя пограничная кривая. Ниже нее расположена область влажно-го насыщенного пара, выше нее – область перегретого пара. Изобары в области влажного насыщенного пара – прямые линии, являющиеся одновременно изотермами. При переходе в область перегретого пара изобары и изотермы расходятся и каждая из них представляет собой отдельную кривую.

Диаграмма  $i - s$  имеет много ценных свойств: она позволяет быстро определять параметры пара с достаточной для технических расчетов точностью; дает возможность определять энтальпию водяного пара и разности энтальпий в виде отрезков; чрезвычайно наглядно изображает адиабатный процесс, имеющий большое значение при изучении паровых двигателей, и, наконец, позволяет быстро, наглядно и достаточно точно решать различные практические задачи.

В конце книги приложена диаграмма  $i - s$  водяного пара, составленная по таблицам М. П. Вукаловича.

### 1. Изохорный процесс ( $v = const$ ).

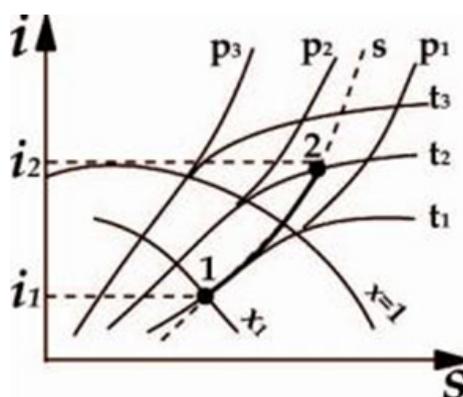


Рис. 22. Диаграмма  $i - s$  для изохорного процесса

Если известно, что в изохорном процессе начальное состояние пара характеризуется параметрами: давлением  $p_1$  и степенью сухости пара  $x_1$ ; а конечное – температурой  $t_2$ , то этот процесс легко изображается на диаграмме (рис. 22) отрезком 1 и 2 на кривой изоchoры  $v = const$ . По расположению точек 1 и 2 определяют все параметры пара в начале и в конце процесса ( $p_1; v_1; t_1; i_1; s_1; p_2; v_2; t_2; i_2; s_2$ ).

График процесса показывает, что при подводе тепла к влажному насыщенному пару вначале происходит его подсушка, а в дальнейшем – перегрев при непрерывном возрастании давления и температуры.

По первому закону термодинамики

$$dq = du, \text{ так как } d\ell = 0, \text{ или } q = \Delta u.$$

Зная параметры пара в точках 1 и 2, теплообмен с внешним источником можно вычислить по формуле

$$q = \Delta u = (i - pv)_2 - (i - pv)_1 \text{ кДж/кг.}$$

## 2. Изобарный процесс ( $p = const$ ).

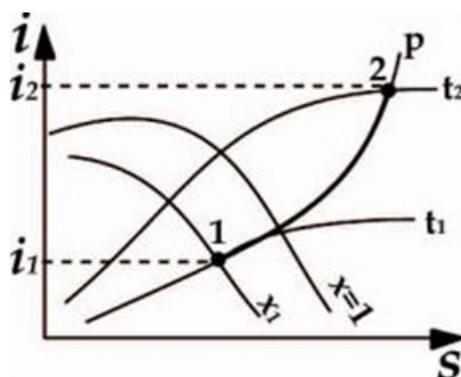


Рис. 23. Диаграмма  $i - s$  для изобарного процесса

Если допустить, что в изобарном процессе начальное и конечное состояние пара определяется параметрами  $p$ ,  $x_1$  и  $t_2$ , то этот процесс изобразится на графике (рис. 23) отрезком 1–2 на кривой изобары.

По расположению точек 1 и 2 определяют все параметры пара в начале и конце процесса ( $p_1; v_1; t_1; i_1; s_1; v_2; t_2; i_2; s_2$ ).

При изобарном расширении пара вначале происходит его подсушка, а затем перегрев. Изобарный процесс происходит в котлах и паронагревателях.

Количество тепла, участвующего в изобарном процессе, определяется по уравнению

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Работа в этом процессе:

$$\ell = p(v_2 - v_1), \text{ или } \ell = q - \Delta u.$$

Изменение внутренней энергии пара определяется по формуле

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i - pv)_2 - (i - pv)_1.$$

## 3. Изотермический процесс ( $T = const$ ).

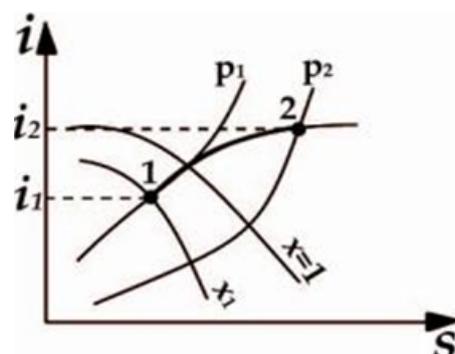


Рис. 24. Диаграмма  $i - s$  для изотермического процесса

В области влажного пара кривая изотермы совпадает с кривой изобары (рис. 24).

Допустим, что в изотермическом процессе начальное и конечное состояние пара определяется параметрами:  $p_1; x_1$  и  $p_2$ .

Теплообмен с внешней средой определится из математической записи второго закона термодинамики

$$q = T(s_2 - s_1) = (t + 273,15)(s_2 - s_1)$$

или по первому закону термодинамики

$$q = \Delta u + \ell,$$

отсюда работа пара

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

Изменение внутренней энергии пара определяется как

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i - pv)_2 - (i - pv)_1.$$

#### 4. Адиабатный процесс

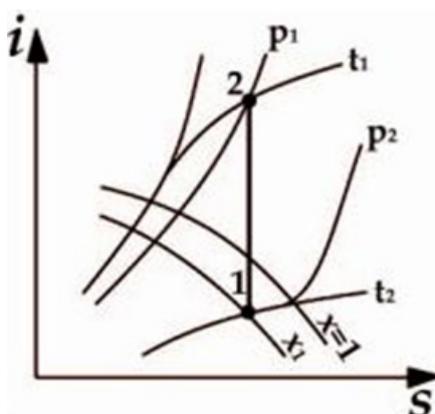


Рис. 25. Диаграмма  $i - s$  для адиабатного процесса

Допустим, что при адиабатном расширении пара начальное и конечное состояние его определяется параметрами  $p_1$ ;  $t_1$  и  $p_2$ .

Процесс расширения изобразится прямой, параллельной оси ординат, отрезком 1–2 (рис. 25).

При адиабатном расширении перегретого пара вначале происходит уменьшение его степени перегрева, а затем переход в сухой насыщенный и во влажный насыщенный пар со степенью сухости  $x_2$ . Работа пара происходит за счет внутренней энергии:

$$\ell = u_1 - u_2 = (i - pv)_1 - (i - pv)_2.$$

#### Задачи

**179.** В закрытом сосуде содержится  $1 \text{ м}^3$  сухого насыщенного водяного пара при давлении 10 бар.

Определить давление, степень сухости пара и количество отданного им тепла, если он охладился до температуры  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Решение

Пользуясь таблицей XIII, получаем при  $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  давление пара  $p = 0,19917$  бар.

Так как процесс происходит при постоянном объеме, то

$$v_1 = v_2 = v_1'' = 0,1946 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пользуясь таблицей XIII, находим

$$v_2'' = 7,678 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом,

$$x_2 = \frac{v_1}{v_2''} = \frac{0,1946}{7,678} = 0,253.$$

Количество тепла в изохорном процессе определяется по формуле

$$q_v = u_2 - u_1.$$

Определяем значения внутренней энергии пара в начале и в конце процесса:

$$u_1 = i_1 - p_1 v_1 = 2778 - \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 0,1946}{1000} = 2583,4 \text{ кДж/кг}.$$

Значение  $i_2$  определяется по формуле (62):

$$i_2 = i_2' + r x_2 = 251,1 + 2358,8 \cdot 0,0258 = 310,8 \text{ кДж/кг},$$

следовательно,

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = 310,8 - \frac{0,19917 \cdot 10^5 \cdot 0,1946}{1000} = 306,9 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом,

$$q_v = u_2 - u_1 = 306,9 - 2583,4 = -2276,5 \text{ кДж/кг}.$$

Так как в рассматриваемом процессе участвует  $1 \text{ м}^3$  пара и плотность его по таблице XIII при  $p = 10$  бар равна  $\rho = 5,139 \text{ кг/м}^3$ , то

$$q_v = \rho q_v = 5,139 \cdot (-2276,5) = -11\,699 \text{ кДж/м}^3.$$

**180.** В паровом котле находится  $8250 \text{ кг}$  пароводяной смеси с паро-содержанием  $x = 0,0015$  при давлении  $4$  бар.

Сколько времени необходимо для поднятия давления до  $10$  бар при закрытых вентилях, если пароводяной смеси сообщается  $18 \text{ МДж/мин}$ ?

*Решение*

Удельный объем пароводяной смеси, согласно уравнению (59), равен

$$v_x = v_1'' x_1 + (1 - x_1) v_1' = 0,4624 \cdot 0,0015 + 0,9985 \cdot 0,0010836 = \\ = 0,00069 + 0,00108 = 0,00177 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Конечное паросодержание определяется из уравнения (60):

$$x_2 = \frac{v_x - v_2'}{v_2'' - v_2'} = \frac{0,00177 - 0,0011273}{0,1946 - 0,0011273} = 0,00332.$$

Так как изменение состояние пароводяной смеси происходит при постоянном объеме, то количество тепла, необходимое для поднятия давления до  $10$  бар, составит

$$Q_v = M(u_2 - u_1) = M[(i_2 - p_2 v) - (i_1' - p_1 v)] \text{ кДж}.$$

Определяем энтальпию пара в начальном и конечном состояниях на основании формулы (62):

$$i_1 = i_1' + r_1 x_1 = 604,7 + 2133 \cdot 0,0015 = 607,9 \text{ кДж/кг};$$

$$i_2 = i_2' + r_2 x_2 = 762,7 + 2015 \cdot 0,00332 = 769,4 \text{ кДж/кг}.$$

Следовательно,

$$Q_v = 8250 \left( 769,4 - \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 0,00177}{1000} \right) - \left( 607,9 - \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 0,00177}{1000} \right) = \\ = 8250(768,2 - 607,2) = 1\,328\,250 \text{ кДж}.$$

Время, необходимое для поднятия давления до 10 бар при закрытых вентилях, составляет

$$\tau = \frac{1\,328\,250}{18\,000} = 73,8 \text{ мин.}$$

**181.** Влажный пар имеет при давлении  $p = 15$  бар паросодержание  $x = 0,80$ .

Какое количество тепла нужно сообщить 1 кг данного пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до  $x_2 = 0,95$ ?

*Решение*

Количество тепла в изобарном процессе определяется по уравнению

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Для рассматриваемого случая

$$q_p = (i' + rx_2) - (i' + rx_1);$$
$$q_p = 1947(0,95 - 0,8) = 292 \text{ кДж/кг.}$$

**182.** 1 кг водяного пара при  $p = 10$  бар и  $t_1 = 240$  °С нагревается при постоянном давлении до 320 °С.

Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

*Решение*

Количество тепла в изобарном процессе рассчитывается по уравнению

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Так как при  $p = 10$  бар температура насыщения  $t_H = 179,88$  °С, то пар при заданных параметрах перегретый. Пользуясь таблицами перегретого пара, получаем:

$$q_p = i_2 - i_1 = 3091 - 2918 = 173 \text{ кДж/кг.}$$

Работа расширения определяется по формуле

$$\ell = p(v_2 - v_1)$$

или по таблице XIII:

$$\ell = 10 \cdot 10^5(0,2677 - 0,2274) = 40300 \text{ Дж/кг} = 40,3 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии проще всего определится из уравнения первого закона термодинамики:

$$u_2 - u_1 = q - \ell = 173,0 - 40,3 = 132,7 \text{ кДж/кг.}$$

**183.** Энтальпия влажного насыщенного пара при давлении  $p_1 = 14$  бар составляет  $i_x = 2705$  кДж/кг.

Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 40 кДж тепла при постоянном давлении?

*Решение*

Определяем степень сухости пара из равенства (62):

$$i_x = i_1 + rx_1.$$

Из таблицы водяного пара при  $p = 14$  бар:

$$i' = 830 \text{ кДж/кг}; r = 1960 \text{ кДж/кг,}$$

следовательно,

$$x_1 = \frac{2702 - 830}{1960} = 0,957.$$

Конечную степень сухости пара определяем из равенства:

$$q_p = i_2 - i_1 = (i' + rx_2) - (i' + rx_1) = r(x_2 - x_1),$$

из которого получаем

$$x_2 = \frac{q_p}{r} + x_1 = \frac{40}{1960} + 0,96 = 0,98.$$

**184.** 2 кг пара, занимающие при  $p = 8$  бар объем  $v_1 = 0,15$  м<sup>3</sup>, изотермически расширяются до  $v_2 = 0,35$  м<sup>3</sup>.

Определить работу расширения, количество подведенного тепла и степень сухости пара.

*Решение*

Определяем удельный объем пара:

$$v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = \frac{V_2}{M} = \frac{0,35}{2} = 0,175 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При  $p_1 = 8$  бар удельный объем  $v'' = 0,2403$  м<sup>3</sup>/кг.

Так как  $v_1$  и  $v_2$  меньше  $v''$ , то пар в начальном и конечном состоянии влажный. Степень сухости определяется из уравнения (60):

$$x_1 = \frac{v_1 - v'}{v'' - v'} = \frac{0,075 - 0,001}{0,2403 - 0,001} = 0,309;$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = \frac{0,175 - 0,001}{0,2403 - 0,001} = 0,727.$$

Работа расширения и количество подведенного тепла могут быть определены по формулам изобарного процесса, так как рассматриваемый изотермический процесс, протекающий в области влажного пара, одновременно является изобарным. Следовательно, работа расширения определяется по уравнению

$$L = M \cdot p(V_2 - V_1) = 2 \cdot 8 \cdot 10^5(0,35 - 0,15) = 320\,000 \text{ Дж} = 320 \text{ кДж},$$

а подведенное тепло – по уравнению

$$Q = M(i_2 - i_1) = M[(i' + rx_2) + (i' + rx_1)] = M \cdot r(x_2 - x_1) =$$

$$= 2 \cdot 2048(0,727 - 0,309) = 1712 \text{ кДж}.$$

Количество подведенного тепла может быть также определено по формуле изотермического процесса (39):

$$Q = MT(s_2 - s_1),$$

где  $T$  – температура насыщения при данном давлении в °К;

$s_1$  и  $s_2$  – энтропия влажного насыщенного пара в начальном и конечном состоянии, определяемая по уравнению.

Так как

$$s_1 = s' + (s'' - s')x_1,$$

$$s_2 = s' + (s'' - s')x_2,$$

то

$$s_2 - s_1 = (s'' - s')(x_2 - x_1),$$

где  $s'$  и  $s''$  – энтропии кипящей воды и сухого насыщенного пара при данном давлении.

Таким образом,

$$Q = MT(s'' - s')(x_2 - x_1) = 2 \cdot 443,42(6,663 - 2,046)(0,727 - 0,309) = 1711,5 \text{ кДж.}$$

**185.** 1 кг пара при давлении  $p_1 = 6$  бар и температуре  $t_1 = 200$  °С сжимают изотермически до конечного объема  $v_2 = 0,11$  м<sup>3</sup>/кг.

Определить конечные параметры и количество тепла, участвующего в процессе.

*Решение*

Начальной температуре  $t_1 = 200$  °С соответствует давление насыщения  $p = 15,551$  бар  $> p_1 = 6$  бар, поэтому пар в начальном состоянии перегретый. Кроме того, при температуре 200 °С  $v'' = 0,1272$  м<sup>3</sup>/кг.

По условию  $v_2 = 0,11$  м<sup>3</sup>/кг  $< v'' = 0,1272$  м<sup>3</sup>/кг, т. е. пар в конечном состоянии влажный насыщенный, а так как его температура равна начальной, то соответствующее ей давление  $p_2 = 15,551$  бар.

Степень сухости пара определяется из уравнения:

$$v_x = v''x,$$

откуда

$$x = \frac{v_x}{v''} = \frac{0,11}{0,1272} = 0,86.$$

Количество тепла определяем по формуле (39):

$$q = T(s_2 - s_1).$$

Значения энтропии  $s_1$  и  $s_2$  находим по таблицам или по диаграмме  $i - s$ :

$$s_1 = 6,963 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град};$$

$$s_2 = 5,8576 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

откуда

$$q = 473(5,8576 - 6,963) = -522,9 \text{ кДж/кг.}$$

**186.** Пользуясь диаграммой  $i - s$ , определить энтальпию пара:

а) сухого насыщенного при  $p = 22$  бар;

б) влажного насыщенного при  $p = 8$  бар и  $x = 0,96$ ;

в) перегретого при  $p = 29$  бар и  $t = 400$  °С.

*Ответ:* а)  $i'' = 2802$  кДж/кг; б)  $i_x = 2688$  кДж/кг; в)  $i = 3232$  кДж/кг.

**187.** Определить количество тепла, которое нужно сообщить 6 кг водяного пара, занимающего объем 0,6 м<sup>3</sup> при давлении 6 бар, чтобы при  $v = \text{const}$  повысить его давление до 10 бар; найти также конечную степень сухости пара.

*Ответ:*  $x_2 = 0,505$ ;  $Q_v = 2570$  кДж.

**188.** 1 м<sup>3</sup> пара при давлении  $p = 10$  ат и температуре  $t = 300$  °С охлаждается при постоянном объеме до 100 °С.

Определить количество тепла, отданного паром.

*Ответ:*  $Q = -1859$  ккал.

**189.** В баллоне емкостью 1 м<sup>3</sup> находится пар при  $p = 1$  ат и  $x = 0,78$ .

Сколько тепла нужно сообщить баллону, чтобы пар сделался сухим насыщенным?

*Ответ:*  $Q = 83,3$  ккал.

**190.** Влажный пар имеет при давлении  $p_x = 8$  бар степень сухости  $x = 0,9$ .

Какое количество тепла нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар?

*Ответ:*  $q = 204,8$  кДж/кг.

**191.** 1 кг водяного пара при  $p_1 = 16$  бар и  $t_1 = 300$  °С нагревается при постоянном давлении до 400 °С.

Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

*Ответ:*  $q_p = 223$  кДж/кг;  $\ell = 50,24$  кДж/кг;  $\Delta u = 172,8$  кДж/кг.

**192.** К 1 кг пара при давлении 8 бар и степени влажности 70 % подводится при постоянном давлении 820 кДж тепла.

Определить степень сухости, объем и энтальпию пара в конечном состоянии.

*Ответ:*  $x_2 = 0,7$ ;  $v_2 = 0,1682$  м<sup>3</sup>/кг;  $i_2 = 2154,4$  кДж/кг.

**193.** 1 кг влажного пара при давлении 18 бар и влажности 3 % перегревается при постоянном давлении до  $t = 400$  °С.

Определить работу расширения, количество сообщенного тепла и изменение внутренней энергии.

*Ответ:*  $\ell = 110$ ; 2 кДж/кг;  $q = 500$  кДж/кг;  $\Delta u = 390$  кДж/кг.

**194.** 1 м<sup>3</sup> водяного пара при давлении  $p_1 = 10$  бар и  $x = 0,65$  расширяется при  $p = \text{const}$  до тех пор, пока его удельный объем не станет равным  $v_2 = 0,19$  м<sup>3</sup>/кг.

Определить конечные параметры, количество тепла, участвующего в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

*Ответ:*  $x_2 = 0,96$ ;  $Q = 5196$  кДж;  $L = 581,4$  кДж;  $\Delta u = 4614,6$  кДж.

**195.** 6 кг пара при давлении  $p_1 = 10$  бар и степени сухости  $x_1 = 0,505$  расширяются изотермически так, что в конце расширения пар оказывается сухим насыщенным.

Определить количество тепла, сообщенного пару, произведенную им работу и изменение внутренней энергии.

*Ответ:*  $Q = 5984,6$  кДж;  $L = 577,8$  кДж;  $\Delta u = 5406,8$  кДж.

**196.** 1,2 м<sup>3</sup> влажного пара со степенью сухости  $x = 0,8$  расширяются адиабатно от 4 до 0,6 атм.

Определить степень сухости, объем пара в конце расширения и произведенную им работу.

*Ответ:*  $x_2 = 74$  %;  $V_2 = 6,56$  м<sup>3</sup>;  $L = 743$  кДж.

**197.** Найти по диаграмме  $i - s$  адиабатный перепад тепла и конечное состояние при расширении пара от 14 бар и 300 °С до 0,06 бар.

*Ответ:*  $h = 900$  кДж/кг;  $x = 0,825$ .

**198.** Влажный пар при  $p_1 = 8$  бар и  $x_1 = 0,95$  расширяется адиабатно до  $p_2 = 0,4$  бар.

Определить степень сухости пара в конце расширения аналитическим и графическим путем.

*Ответ:*  $x_2 = 0,814$ .

**199.** Пар при давлении  $p_1 = 18$  бар и температуре  $t_1 = 350$  °С расширяется адиабатно до конечного давления  $p_2 = 0,08$  бар.

Определить степень сухости в конце процесса и давление, при котором пар в процессе расширения окажется сухим насыщенным.

*Ответ:*  $x = 0,84$ ;  $p = 2,9$  бар.

**200.** Пар с начальным давлением  $p_1 = 20$  бар и температурой  $t_1 = 300$  °С расширяется адиабатно до  $p_2 = 0,04$  бар.

Определить начальные и конечные параметры и работу расширения 1 кг пара.

*Ответ:*  $i_1 = 3019$  кДж/кг;  $v_1 = 0,1255$  м<sup>3</sup>/кг;  $i_2 = 2036$  кДж/кг;  $x = 0,787$ ;  $\ell = 842$  кДж/кг.

**201.** Пар с начальным давлением  $p_1 = 18$  бар и температурой  $t_1 = 340$  °С расширяется адиабатно до  $p_2 = 0,06$  бар.

Определить работу расширения и конечное состояние пара.

*Ответ:*  $\ell = 815$  кДж/кг;  $v_2 = 19,5$  м<sup>3</sup>/кг;  $x_2 = 0,825$ .

**202.** 1 кг пара при давлении  $p_1 = 50$  бар и температуре  $t_1 = 400$  °С расширяется по адиабате до давления 0,5 бар.

Найти, пользуясь диаграммой  $i - s$ , температуру и степень сухости для конечного состояния пара, а также адиабатный перепад тепла.

*Ответ:*  $t_2 = 80$  °С;  $x_2 = 0,853$ ;  $h_0 = 888$  кДж/кг.

**203.** 5 кг водяного пара, параметры которого  $p_1 = 20$  бар и  $V_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>, расширяются адиабатно до давления  $p_2 = 2$  бар.

Определить конечный объем пара, степень сухости его и произведенную им работу.

*Ответ:*  $V_2 = 3,95$  м<sup>3</sup>;  $x_2 = 0,852$ ;  $L = 1780$  кДж.

## Глава 8. Истечение газов и пара

Расчет истечения газов и паров из отверстий производят по формулам, приведенным ниже.

Отношение давлений  $\beta_{кр}$  при достижении звуковой (критической) скорости истечения определяют по формуле

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (70)$$

где  $p_1$  – давление газа в резервуаре;  $p_{кр}$  – давление газа в критическом сечении.

Для двухатомных газов  $\beta_{кр} = 0,528$ , для одноатомных газов  $\beta_{кр} = 0,487$ , для трех- и многоатомных газов  $\beta_{кр} = 0,546$ .

Скорость истечения (м/с) находят по формуле

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (71)$$

Скорость истечения при критическом отношении давлений, то есть критическую скорость (скорость звука), находят из выражения:

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}. \quad (72)$$

Критическая скорость может быть также определена по одной из следующих формул:

$$\omega_{кр} = \sqrt{2(i_1 - i_{кр})}, \text{ если энтальпия } i \text{ выражена в Дж/кг}, \quad (73)$$

$$\omega_{кр} = 44,6 \sqrt{(i - i_{кр})}, \text{ если энтальпия } i \text{ выражена в кДж/кг}, \quad (74)$$

$$\omega_{кр} = 91,53 \sqrt{(i - i_{кр})}, \text{ если энтальпия } i \text{ выражена в ккал/кг}. \quad (75)$$

Секундный расход газа (кг/с) определяют по формуле

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{p_2} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (76)$$

где  $f$  – выходное сечение в м<sup>2</sup>.

Максимальный расход газа вычисляют по уравнению

$$M_{max} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{p_1}{v_1}}. \quad (77)$$

Подставляя в эту формулу значение  $k$ , получаем для двухатомных газов

$$M_{max} = 0,686 \cdot f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}; \quad (78)$$

для трехатомных газов

$$M_{max} = 0,667 \cdot f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}. \quad (79)$$

Во всех перечисленных формулах следует брать  $p$  в Н/м<sup>2</sup>,  $v$  в м<sup>3</sup>/кг, расход газа получается в кг/с.

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяется расширяющееся сопло, или сопло Лавалья (рис. 26).

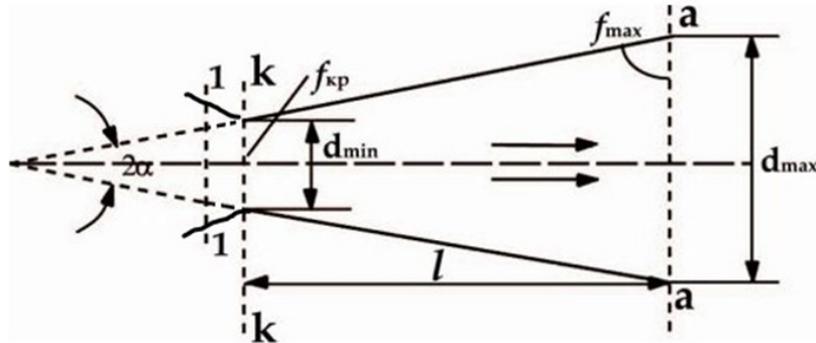


Рис. 26. Сопло Лавалья

Расчет расширяющегося сопла при заданном секундном расходе сводится к определению критического (минимального) сечения  $f_{кр}$ ,  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ , а также длины  $l$  сопла.

Площадь минимального сечения сопла определяется по формуле

$$f_{кр} = \frac{M_{max} \cdot v_{кр}}{c_{кр}};$$

для двухатомных газов оно может быть определено также по формуле

$$f_{кр} = \frac{M_{max} \cdot v_{кр}}{0,686 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} \text{ м}^2, \quad (80)$$

а для трехатомных газов – по формуле

$$f_{кр} = \frac{M_{max} \cdot v_{кр}}{0,667 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} \text{ м}^2. \quad (81)$$

Площадь выходного сечения сопла

$$f_{max} = f_{min} \frac{\omega_{кр} \cdot v_2}{\omega \cdot v_{кр}}, \quad (82)$$

причем  $v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$  – удельный объем газа при давлении среды  $p_2$ .

Длина сопла определяется по формуле

$$l = \frac{d_{max} - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (83)$$

где  $d_{max}$  и  $d_{min}$  – соответственно диаметры выходного и минимального сечения;

$\alpha$  – угол конусности расширяющейся части сопла.

При расчетах с учетом сопротивления протеканию газа действительная скорость истечения  $\omega_g$  будет меньше расчетной вследствие трения струи о стенки сопла, что учитывается коэффициентом скорости  $\varphi$ ; кроме того, сечение струи на выходе может быть меньше сечения выходного отверстия, что учитывается коэффициентом сужения струи  $\alpha$ . Поэтому действительный объемный расход газа ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) может быть найден по формуле

$$V_g = \alpha \cdot \varphi \cdot \omega \cdot f_{max} = \mu \cdot \omega \cdot f_{max}, \quad (84)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода.

Массовый расход ( $\text{кг}/\text{с}$ ) определяют по формуле

$$M_g = V_g \cdot \rho. \quad (85)$$

### Задачи

**204.** Воздух, имеющий температуру  $15^\circ\text{C}$ , по трубке диаметром 8 мм перетекает из резервуара с постоянным давлением 12 ат в другой, расположенный рядом, с постоянным давлением 8 атм.

Определить скорость истечения воздуха, температуру его при переходе во второй резервуар и количество воздуха, перетекшее за 1 час.

*Решение*

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{8}{12} = 0,667 > 0,528;$$

истечение газа происходит в дозвуковой области:

$$\omega = \sqrt{2 \cdot 287 \cdot 288 \cdot 3,5 [1 - 0,667^{0,286}]} = 252 \text{ м/с};$$

$$v_1 = \frac{287 \cdot 293}{12 \cdot 10^4 \cdot 9,81} = 0,07 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,07 \left(\frac{12}{8}\right)^{0,714} = 0,0936 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$T_2 = 256^\circ\text{K}; V = 3600 \cdot 0,785 \cdot 0,008^2 \cdot 252 = 45,5 \text{ м}^3/\text{ч}; M = 486 \text{ кг/ч}.$$

**205.** В вакуумной сушилке поддерживается вакуум 350 мм рт. ст., атмосферное давление составляет 770 мм рт. ст., температура воздуха  $27^\circ\text{C}$ .

Определить количество воздуха, поступающего в сушилку снаружи за 1 час через щель площадью сечения  $6 \text{ мм}^2$ . Принять  $\varphi = 0,75$ ;  $\alpha = 0,8$ .

*Решение*

$$p_1 = 770 \text{ мм рт. ст.}; p_2 = 350 \text{ мм рт. ст.};$$

$$\beta = 0,546 > 0,528;$$

$$\omega = 312 \text{ м/с};$$

$$\omega_g = 234 \text{ м/с};$$

$$v_2 = 1,293 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$M_g = 3,13 \text{ кг/с}.$$

**206.** Рассчитать количество азота, вытекающего за 1 час из суживающегося

сопла в пространство, где давление 1 ат, если постоянное давление в резервуаре составляет: 1,5; 2; 4; 8 атм. Температура газа 27 °С, диаметр сопла 8 мм. Сопротивлениями пренебречь.

*Решение*

$p_1 = 1,5$  ат;  $\beta = 0,667$  – истечение в докритической области.

В остальных случаях в выходных сечениях будет устанавливаться критический режим, то есть  $p_2 = 0,528 \cdot p_1$ .

Данные расчета приведены в таблице.

$p_1$ , ат	$p_2$ , ат	$\beta$	$v_1$ , м <sup>3</sup> /кг	$v_2$ , м <sup>3</sup> /кг	$\omega$ , м/с	$M$ , кг/ч
1,5	1,0	0,667	0,606	0,81	265	59,2
2,0	1,056	0,528	0,454	0,717	322	81,2
4,0	2,112	0,528	0,227	0,3586	322	164,0
8,0	4,224	0,528	0,1135	0,1790	322	325,0

**207.** Во сколько раз скорость истечения воздуха из резервуара будет больше, если к резервуару, где давление 25 бар, будет поставлено расширяющееся сопло в место простого для полного расширения воздуха до 1,2 бар?

*Решение*

Простое сопло:

$$p_2 = 13,2 \text{ бар};$$

$$\omega = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot T_1} = 18,3 \sqrt{T_1}.$$

Расширяющееся сопло:

$$\omega_c = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot 287 \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{1,2}{25} \right)^{0,286} \right]} = 34,2 \sqrt{T_1}.$$

Следовательно,

$$\frac{\omega_c}{\omega} = 1,87.$$

**208.** Рассчитать расширяющееся сопло для расхода продуктов сгорания, равного 2800 кг/ч. Продукты сгорания рассматривать как двухатомный газ с газовой постоянной  $R = 294$  Дж/кг·град; начальная температура газа 2500 °С; давление перед входом в сопло 20 ат, а на выходе 0,8 атм. Угол конусности сопла принять равным  $2\alpha = 12^\circ$ . Расчет адиабатного истечения провести без учета сопротивления.

*Решение*

$$M = 0,778 \text{ кг/с};$$

$$v_1 = 0,375 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_{кр} = 0,59 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_{кр} = 10,56 \text{ ат};$$

$$\omega_{кр} = 924 \text{ м/с};$$

$$f_{кр} = \frac{0,778 \cdot 0,590}{d_{кр}^2} \cdot 10^6 = 497 \text{ мм}^2;$$

$$d_{кр} = 25,2 \text{ мм};$$

$$v_2 = 3,727 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\omega = 1760 \text{ м/с};$$

$$f_{max} = 1648 \text{ мм}^2;$$

$$d_{max} = 45,75 \text{ мм};$$

$$l = 98,3 \text{ мм}.$$

**209.** 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 (71):

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Из характеристического уравнения

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{259,8 \cdot 373}{50 \cdot 10^5} = 0,0194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Все остальные величины, входящие в формулу (71), 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 (76):

$$M = f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]};$$

$$M = 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot \frac{50 \cdot 10^5}{0,0194} \left[ \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{40}{50}\right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,175 \text{ кг/с}.$$

При истечении в атмосферу отношение давлений равно

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{50} < \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\text{кр}} = 0,528,$$

следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход будет максимальным.

По формуле (72):

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{\frac{8314}{32} \cdot 373} = 336 \text{ м/с.}$$

Максимальный расход определяется по формуле (78):

$$M_{\text{max}} = 0,686 \cdot f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}};$$

$$M_{\text{max}} = 0,686 \cdot 0,00002 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^5}{0,0194}} = 0,22 \text{ кг/с.}$$

**210.** Воздух при давлении  $p_1 = 10$  бар и температуре  $t_1 = 300$  °С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением  $p_2 = 1$  бар. Расход воздуха  $M = 4$  кг/с.

Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным  $10^\circ$ . Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

*Решение*

Площадь минимального сечения сопла определяем по формуле

$$f_{\text{min}} = \frac{M_{\text{max}}}{\omega_{\text{кр}}} v_{\text{кр}}.$$

$M_{\text{max}}$  по условию равен 4 кг/с.

Удельный объем воздуха в минимальном сечении  $v_{\text{кр}}$  находим из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$\frac{v_{\text{кр}}}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_{\text{кр}}}\right)^{\frac{1}{k}}.$$

Значение  $v_1$  определяем из начальных условий:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 573}{10 \cdot 10^5} = 0,164 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическое отношение давлений для воздуха:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\text{кр}} = 0,528.$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла, равно

$$p_{\text{кр}} = 0,528 \cdot p_1 = 0,528 \cdot 10 = 5,28 \text{ бар};$$

$$v_{кр} = v_1 \left( \frac{p_1}{p_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \left( \frac{10}{5,28} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,259 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретическая скорость воздуха  $\omega_{кр}$  в минимальном сечении определяется по формуле (72):

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 573} = 432 \text{ м/с}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла может быть равна

$$f_{min} = \frac{4 \cdot 0,259}{432} \cdot 10^6 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{f_{min}}{\frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{2400}{0,785}} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла определяется по формуле

$$f = \frac{M \cdot v_2}{\omega}.$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении:

$$v_2 = v_1 \cdot \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла рассчитываем по уравнению (71)

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} 10 \cdot 10^5 \cdot 0,164 \left[ 1 - \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = \\ &= 744 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Следовательно, площадь выходного сечения сопла равна

$$f = \frac{4 \cdot 0,87}{744} 10^6 = 4680 \text{ мм}^2,$$

а диаметр выходного сечения сопла

$$d = \sqrt{\frac{f}{0,785}} = \sqrt{\frac{4680}{0,785}} = 77,0 \text{ мм}.$$

Расстояние между сечением сопла на выходе и наиболее узким сечением выбирается из конструктивных соображений. Что касается длины расширяющейся части, то она определяется по формуле (83):

$$l = \frac{d - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{77,0 - 55,4}{2 \cdot 0,0875} = 123 \text{ мм}.$$

**211.** Как велика теоретическая скорость истечения сопла через сопло Лавалья, если давление пара  $p_1 = 14$  бар, температура  $t_1 = 300$  °С, а противодействие равно 0,06 бар? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

*Решение*

Из диаграммы  $i - s$  находим

$$h_0 = i_1 - i_2 = 896 \text{ кДж/кг},$$

а по уравнению (74):

$$\omega = 44,76\sqrt{i_1 - i_2} = 44,76\sqrt{896} = 1340 \text{ м/с}.$$

**212.** Воздух при постоянном давлении  $p_1 = 60$  бар и  $t_1 = 27$  °С вытекает в среду с давлением  $p_2 = 40$  бар.

Определить теоретическую скорость и конечную температуру при адиабатном истечении.

*Ответ:*  $\omega = 257$  м/с;  $t_1 = 6$  °С.

**213.** Через сопло форсунки компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия подается воздух для распыления нефти, поступающей в цилиндр двигателя. Давление воздуха  $p_1 = 50$  бар, а его температура  $t_1 = 27$  °С. Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя  $p_2 = 35$  бар.

Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха из сопла форсунки.

*Ответ:*  $\omega = 241$  м/с.

**214.** Определить теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если  $p_1 = 70$  бар;  $p_2 = 45$  бар;  $t_1 = 50$  °С;  $f = 10$  мм<sup>2</sup>.

*Ответ:*  $\omega = 282$  м/с;  $M = 0,148$  кг/с.

**215.** К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении  $p_1 = 10$  бар и температуре  $t_1 = 600$  °С. Давление за соплами  $p_2 = 1,2$  бар. Расход газа, отнесенный к одному соплу,  $M = 1440$  кг/ч.

Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным 10°. Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

*Ответ:*  $d_{min} = 19,4$  мм;  $d = 25$  мм;  $l = 32$  мм.

**216.** Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха через сопло Лавалья, если  $p_1 = 8$  бар и  $t_1 = 20$  °С, а давление среды на выходе из сопла  $p_2 = 1$  бар.

Сравнить полученную скорость с критической.

*Ответ:*  $\omega = 514$  м/с;  $\omega_{кр} = 313$  м/с.

**217.** Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление в котле  $p_1 = 1,5$  бар и  $x_1 = 0,95$ . Процесс расширения пара считать адиабатным.

*Ответ:*  $\omega = 360$  м/с.

**218.** 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  $f = 20$  мм<sup>2</sup>.

Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

*Ответ:*  $\omega = 380$  м/с;  $M = 0,05$  кг/с.

**219.** Отработавший пар из паровой турбины поступает в конденсатор в количестве 125 т/ч. Состояние отработавшего пара  $p_2 = 0,045$  атм. и  $x_1 = 0,89$ .

Определить диаметр входного патрубка конденсатора, если скорость пара в нем  $\omega = 120$  м/с.

*Ответ:*  $d = 3,22$  м.

**220.** Определить площади минимального и выходного сечений сопла Лавалья, если известны параметры пара перед соплом:  $p_1 = 10$  ат,  $t_1 = 300$  °С. Давление за соплом  $p_2 = 2,5$  атм. Расход пара через сопло  $M = 720$  кг/ч. Скоростной коэффициент  $\omega = 0,94$ .

*Ответ:*  $f_{min} = 165$  мм<sup>2</sup>;  $f_{max} = 710$  мм<sup>2</sup>.

## Глава 9. Влажный воздух

В сушильном деле в качестве сушильного агента, т. е. среды, поглощающей влагу из подлежащего сушке материала, часто используют воздух. Отсюда знание свойств воздуха имеет большое значение.

Так как воздух обычно используют при давлениях, близких к атмосферному, то с достаточной точностью можно принять к влажному воздуху все формулы, полученные для идеальных газов.

$$pV = MRT; p = p_v + p_n, \quad (86)$$

где  $p$  – давление влажного воздуха;

$p_v$  – парциальное давление сухого воздуха;

$p_n$  – парциальное давление пара.

Характеристиками влажного воздуха служит его абсолютная и относительная влажность.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха или плотность пара  $\rho_n$  при его парциальном давлении и температуре воздуха. Поэтому абсолютную влажность можно обозначить через  $\rho_n$ .

Величину

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{max}}, \quad (87)$$

представляющую отношение абсолютной влажности воздуха при данной температуре  $\rho_n$  к его максимально возможной абсолютной влажности  $\rho_{max}$  при той же температуре, называют относительной влажностью.

Расчет сушки всякого рода веществ ведут обычно графическим образом. Наибольшее распространение для этих целей получила диаграмма  $d - i$ , предложенная профессором Л. К. Рамзиным. В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание  $d$ , а по оси ординат – энтальпия  $i$  влажного воздуха. Барометрическое давление принято равным  $B = 745$  мм рт.ст.

Под влагосодержанием влажного воздуха понимают количество влаги, приходящееся на 1 кг содержащегося в нем сухого воздуха, т. е.

$$d = \frac{M_n}{M_v} \text{ кг/кг}, \quad (88)$$

где  $M_n$  – количество влаги в воздухе;

$M_v$  – количество сухого воздуха.

Если обозначить объем влажного воздуха через  $V$ , то

$$M_v = \rho_v \cdot V,$$

$$M_n = \rho_n \cdot V,$$

тогда

$$d = \frac{M_n}{M_v} = \frac{\rho_n}{\rho_v}. \quad (89)$$

Принимая влажный воздух за смесь идеальных газов, получим при температуре  $T$

$$\rho_n \cdot V = M_n \cdot R_n \cdot T,$$

$$\rho_B \cdot V = M_B \cdot R_B \cdot T,$$

или

$$\rho_n = \rho_n \cdot R_n \cdot T,$$

$$\rho_B = \rho_B \cdot R_B \cdot T,$$

откуда

$$d = \frac{\rho_n}{\rho_B} = \frac{R_B \cdot T}{R_n \cdot T} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_B} = \frac{R_B}{R_n} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_B}. \quad (90)$$

Учитывая, что газовые постоянные воздуха  $R_B = 287,2$  Дж/кг·град и пара  $R_n = 462$  Дж/кг·град и что  $p_B = B - p_n$ , получим

$$d = 0,622 \frac{\rho_n}{B - \rho_n} \frac{\text{кг}}{\text{кг}}, \text{ или } d = 622 \frac{\rho_n}{B - \rho_n} \frac{\text{г}}{\text{кг}}. \quad (91)$$

Энтальпия влажного воздуха для 1 кг может быть выражена так:

$$i = i_B + d \cdot i_n, \text{ кДж}. \quad (92)$$

Здесь  $i_B$  определяют из выражения  $i_B = c_{p_B} t_B$ , а  $i_n$  берут по таблицам пара. Теплоемкость воздуха можно принимать равной  $c_{p_B} = 1,0$  кДж/кг·град.

Для практических целей можно пользоваться эмпирической формулой

$$i_n = 2499 + 1,974 \cdot t, \quad (93)$$

следовательно,

$$i = c_{p_B} \cdot t + (2499 + 1,974 \cdot t) \cdot d. \quad (94)$$

Процесс сушки материала воздухом осуществляется обычно следующим образом. Воздух при неизменном давлении нагревают в калорифере до требуемой температуры, при этом изменяется относительная влажность  $\phi$  воздуха, но не изменяется влагосодержание  $d$ . Следовательно, процесс в калорифере протекает при  $d = \text{const}$ . Далее нагретый воздух подают в сушильную камеру, где за счет его тепла испаряется влага осушиваемого материала до тех пор, пока воздух не станет насыщенным. В этом процессе тепло, теряемое воздухом на испарение влаги, вновь возвращается с влагой, поступающей из материала в воздух, в результате чего его энтальпия не меняется, т. е. процесс в сушильной камере протекает при  $i = \text{const}$ .

Соответствующие расчеты удобно выполнять, пользуясь диаграммой  $d - i$ .

Эту диаграмму строят следующим образом (рис. 27).

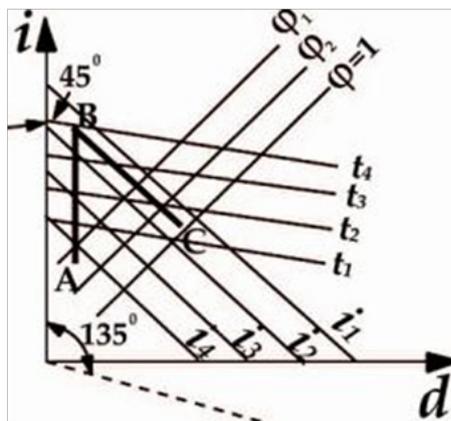


Рис. 27. Диаграмма  $d - i$

По оси ординат откладывают энтальпию, а по оси абсцисс, направленной к оси ординат под углом  $135^\circ$ , – влагосодержание влажного воздуха.

Значение  $d$  для удобства сносят на горизонтальную линию, проведенную из начала координат. На диаграмме наносят построенную по точкам систему изотерм, систему линий, постоянных энтальпий; систему линий постоянной относительной влажности. Таким образом, процесс в калорифере изобразится на диаграмме  $d - i$  вертикальной линией АВ, а процесс в сушильной камере – линией ВС. Разность энтальпий  $i_B - i_A$  будет выражать количество тепла, использованного на подогрев 1 кг сухого воздуха, а разность влагосодержаний  $d_C - d_B$  – количество влаги, испаренной каждым килограммом сухого воздуха.

### Задачи

**221.** Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем  $p_n = 0,14$  ат, а температура  $t = 60^\circ\text{C}$ . Барометрическое давление равно 760 мм рт. ст.

#### Решение

Температуре  $t = 60^\circ\text{C}$  соответствует давление  $p_H = 0,2031$  атм. Следовательно, при парциальном давлении  $p_n = 0,14$  ат пар перегрет.

По таблице XIII для  $p = 0,14$  ат и  $t = 60^\circ\text{C}$  имеем

$$v = 11,16 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно, абсолютная влажность

$$\rho_n = \frac{1}{v} = \frac{1}{11,16} = 0,0897 \text{ кг/м}^3.$$

**222.** Определить влагосодержание воздуха при температуре  $t = 60^\circ\text{C}$  и барометрическом давлении  $B = 745$  мм рт. ст., если относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ .

#### Решение

По формуле (89):

$$d = \frac{\rho_n}{\rho_B},$$

а так как по уравнению (87)

$$\varphi = \frac{p_n}{p_H},$$

то

$$p_n = \varphi \cdot p_H.$$

$p_H$  определяют по таблице XIII насыщенного водяного пара для температуры  $t = 60^\circ\text{C}$ . Из этой таблицы  $p_H = 0,2031$  атм, следовательно,

$$p_n = 0,6 \cdot 0,2031 = 0,1219 \text{ атм}.$$

По таблицам перегретого пара для  $p = 0,1219$  ат и  $t = 60^\circ\text{C}$  находим  $v = 12,83 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Тогда  $\rho_n = \frac{1}{12,83} = 0,078 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,

Парциальное давление воздуха

$$p_{\text{в}} = p - p_{\text{п}} = \frac{745}{735,6} - 1,0128 - 0,1218 = 0,8909 \text{ атм.}$$

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}}}{RT} = \frac{0,874 \cdot 10^5}{287(273 + 60)} = 0,914 \text{ кг/м}^3,$$

Поэтому

$$d = \frac{0,078}{0,914} = 0,0853 \text{ кг/кг} = 85,3 \text{ г/кг.}$$

Значение  $d$  можно также определить из формулы (91):

$$d = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 622 \cdot \frac{0,1219}{0,8979} = 85,1 \text{ г/кг.}$$

**223.** Каково состояние воздуха, если температура его равна  $50^\circ\text{C}$ , а парциальное давление пара в нем  $p_{\text{п}} = 60$  мм рт. ст.?

*Решение*

По таблице XIII определяем  $p_{\text{H}}$ . При температуре  $t = 50^\circ\text{C}$

$$p_{\text{H}} = 0,12578 \text{ ат} = 93 \text{ мм рт. ст.}$$

Так как

$$p_{\text{п}} = 60 \text{ мм рт. ст.} < p_{\text{H}} = 93 \text{ мм рт. ст.},$$

то пар в воздухе перегрет, а следовательно, воздух при этом не насыщен.

**224.** Парциальное давление пара в атмосферном воздухе составляет  $0,2$  ат, температура воздуха равна  $70^\circ\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха.

*Решение*

Температуре  $70^\circ\text{C}$  соответствует давление  $p_{\text{H}} = 0,3178$  атм. Следовательно, при парциальном давлении  $p_{\text{п}} = 0,2$  ат пар перегрет. Из таблицы XIII для  $p = 0,2$  ат и  $t = 70^\circ\text{C}$  получаем

$$v = 8,037 \text{ м}^3/\text{кг},$$

отсюда

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v} = 0,124 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Из таблицы XIII для  $t = 70^\circ\text{C}$

$$p_{\text{H}} = p'' = 0,1982 \text{ кг/м}^3,$$

отсюда относительная влажность воздуха равна

$$\varphi = \frac{0,124}{0,1982} = 62,6 \text{ \%}.$$

Тот же результат получится, если из таблицы XIII найти давление насыщения при температуре  $t = 70^\circ\text{C}$ :

$$p_{\text{H}} = 0,3178 \text{ атм.}$$

Тогда по уравнению (87)

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{H}}} = \frac{0,2}{0,3178} = 62,9 \text{ \%}.$$

**225.** Наружный воздух, имеющий температуру  $t = 20$  °С и влагосодержание  $d = 6$  г/кг, подогревается до температуры 45 °С.

Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 атм.

*Решение*

Относительная влажность воздуха определяется по формуле (87):

$$\varphi = \frac{p_n}{p_H}.$$

Величина  $p_H$  определяется по таблицам насыщенного пара и при температуре  $t = 20$  °С составляет

$$p_H = 0,02383 \text{ атм.}$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе при данном барометрическом давлении является функцией только влагосодержания и определяется по формуле (91):

$$p_n = p \frac{d}{622 + d} = 1 \cdot \frac{6}{628} = 0,0096 \text{ атм.}$$

Следовательно,

$$\varphi_1 = \frac{0,0096 \cdot 100}{0,02383} = 40 \text{ \%}.$$

В процессе подогрева влагосодержание воздуха не изменяется. Следовательно, остается неизменным и парциальное давление пара. Давление насыщения  $p_H$  при температуре  $t = 45$  °С по таблице XIII составит

$$p_H = 0,09771 \text{ ат,}$$

поэтому

$$\varphi_2 = \frac{0,0096 \cdot 100}{0,09771} = 9,8 \text{ \%}.$$

**226.** Во влажный воздух с параметрами  $t_c = 75$  °С и  $\varphi = 10$  % испаряется вода при адиабатных условиях. Температура воздуха при этом понижается до 45 °С.

Определить относительную влажность и влагосодержание воздуха в конечном состоянии.

*Решение*

Начальное состояние воздуха в диаграмме  $i - d$  (рис. 26) определяется пересечением изотермы  $t = 75$  °С и линии  $\varphi = \text{const} = 10$  % (точка А). Так как в процессе адиабатного испарения воды температура мокрого термометра не изменяется, то конечное состояние воздуха определяется пересечением изотермы  $t_M = \text{const}$ , проходящей через точку А, с изотермой  $t = 45$  °С (точка В). Этой точке соответствуют относительная влажность  $\varphi = 60$  % и влагосодержание  $d = 38,5$  г/кг.

**227.** Для сушки используют воздух при  $t_1 = 20$  °С и  $\varphi_1 = 60$  %. В калорифере его подогревают до  $t_2 = 95$  °С и направляют в сушилку, откуда он выходит при  $t_3 = 35$  °С.

Вычислить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и тепла на 1 кг испаренной влаги.

*Решение*

В диаграмме  $i-d$  находим точку А на пересечении линии  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $\varphi_1 = 60\%$  и определяем  $d_1 = 8,9$  г/кг;  $i_1 = 10,2$  ккал/кг.

Проведя линию  $d = \text{const}$ , находим в пересечении ее с  $t_2 = 95^\circ\text{C}$  точку В, характеризующую состояние воздуха после выхода его из калорифера. Из точки В ведем линию  $i = \text{const}$  до пересечения с изотермой  $t_3 = 35^\circ\text{C}$ , где находим точку С, характеризующую состояние воздуха при выходе из сушилки. Для точки С

$$d_3 = 32,8 \text{ г/кг}; i_3 = 28,5 \text{ ккал/кг}.$$

Таким образом, на 1 кг сухого воздуха изменение влагосодержания составляет

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 32,8 - 8,9 = 23,9 \text{ г/кг}.$$

Для испарения 1 кг влаги потребуется

$$\frac{1000}{23,9} = 41,8 \text{ кг сухого воздуха}.$$

Расход тепла в калорифере  $(i_3 - i_1)$  на 1 кг воздуха составляет

$$\Delta i = i_3 - i_1 = 28,5 - 10,2 = 18,3 \text{ ккал/кг}.$$

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги (на 41,8 кг сухого воздуха) составит

$$q = 18,3 \cdot 41,8 = 765 \text{ ккал/кг}.$$

**228.** Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем  $p = 0,3$  ат, а температура воздуха  $t = 80^\circ\text{C}$ . Показание барометра  $B = 745$  мм рт. ст.

*Ответ:*  $\rho_{\text{п}} = 0,182$  кг/м<sup>3</sup>.

**229.** Задано состояние влажного воздуха  $t_{\text{в}} = 80^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{п}} = 0,15$  атм.

Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность. Барометрическое давление  $B = 745$  мм рт. ст.

*Ответ:*  $\varphi = 0,31$ ;  $d = 108$  г/кг;  $\rho = 0,925$  кг/м<sup>3</sup>.

**230.** Газовый двигатель всасывает 500 м<sup>3</sup>/ч воздуха при  $t = 25^\circ\text{C}$ . Относительная влажность воздуха  $\varphi = 0,4$ .

Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

*Ответ:* 4,6 кг

**231.** Состояние влажного воздуха характеризуется температурой  $t = 25^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\varphi = 0,8$ . Барометрическое давление  $B = 745$  мм рт. ст.

Найти парциальное давление пара в воздухе и его влагосодержание.

*Ответ:*  $p_{\text{п}} = 0,0258$  ат;  $d = 16,3$  г/кг.

**232.** Для использования тепла газов, уходящих из паровых котлов, в газоходах последних устанавливаются водоподогреватели (водяные экономайзеры).

Минимально допустимая температура воды, поступающей в экономайзер, должна быть по крайней мере на  $10^\circ\text{C}$  выше температуры точки росы водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

Определить допускаемую температуру питательной воды, если объем продуктов сгорания  $V_H^{п.с.} = 9,60$  м<sup>3</sup>/кг, а объем водяных паров  $V_H^{в.п.} = 0,24$  м<sup>3</sup>/кг.

Давление продуктов сгорания в газоходе экономайзера равно 1 атм.

*Ответ:*  $t \geq 30,8$  °С.

**233.** В сушилку помещен материал, от которого нужно отнять 3000 кг воды. Температура наружного воздуха  $t_1 = 10$  °С при относительной влажности  $\varphi = 0,4$ . При входе в сушилку воздух подогревается и выходит из нее при  $t_2 = 40$  °С и  $\varphi = 0,85$ .

Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.

*Ответ:*  $V_H = 64\,500$  м<sup>3</sup>.

## Глава 10. Теплопередача в теплообменных аппаратах

К теплообменным относятся все аппараты, в которых осуществляется обмен теплом между греющей и нагреваемой средами. В поверхностных теплообменниках греющая среда отделена от нагреваемой поверхностью, тепло передается через стенку. Применяют теплообменники без разделительной стенки. К ним относят смешительные и регенеративные устройства.

В смешительных теплообменниках тепло передается от пара или газа к воде при их смешивании. В регенеративных теплообменниках тепло горячих газов сначала аккумулируется в теплообменной насадке, например, в керамической сыпучей массе, а затем передается нагреваемой среде, например, воздуху путем продувания через горячую насадку.

### Расчет теплообменных аппаратов

При расчете поверхностных теплообменников основными расчетными являются уравнения

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \text{ Вт}, \quad (95)$$

где  $Q$  – количество тепла, переданного через стенку от горячей среды к нагреваемой за единицу времени, Вт;

$k$  – коэффициент теплопередачи, равный обратной величине термического сопротивления и определяемый формулой:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (96)$$

$F$  – площадь поверхности теплообменника,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta t$  – температурный напор, град.

Температуры греющей и нагреваемой сред чаще всего изменяются по поверхности нагрева. На рис. 28, *a* показана схема теплообменника, в котором теплоносители движутся по схеме прямотока, а на рис. 28, *b* – схема теплообменника, где теплоносители движутся противоточно, навстречу друг другу.

На практике встречаются теплообменники с перекрестным ходом и с движением теплоносителей по сложным схемам.

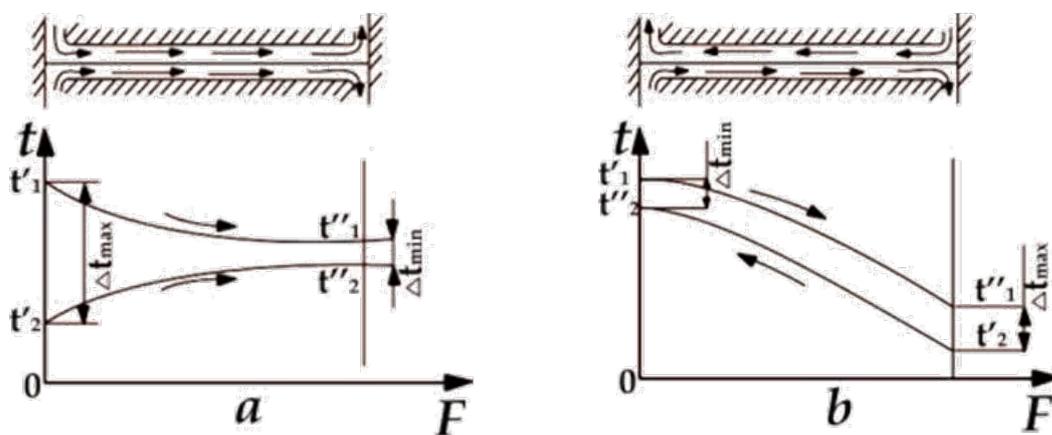


Рис. 28. Изменение температуры жидкости в теплообменном аппарате:

*a*) прямоток;

*b*) противоток

При расчете теплообменников пользуются теми же формулами, что и в случае неизменных температур, обменивающихся теплом сред вдоль поверхности нагрева. Однако при этом приходится в каждом отдельном случае особо вычислять средний температурный напор  $\Delta t$ .

Если изменение температур в теплоносителях небольшое, то кривая изменения их приближается к прямой линии. В таком случае с достаточной для практики точностью можно пользоваться в качестве  $\Delta t$  среднеарифметическим температурным напором

$$\Delta t_{\text{ар}} = \frac{t'_1 - t'_2 + t''_1 - t''_2}{2} = \frac{t'_1 + t''_1}{2} + \frac{t'_2 + t''_2}{2}. \quad (97)$$

Если изменение температур в теплоносителях значительное, пользуются среднелогарифмическим температурным напором

$$\Delta t_{\text{лог}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}}, \quad (98)$$

где  $\Delta t_{\text{max}}$  – наибольший температурный напор;

$\Delta t_{\text{min}}$  – наименьший температурный напор.

Практическими расчетами установлено, что при отношении

$$\frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}} \leq 1,7 \quad (99)$$

с достаточной для практики точностью можно пользоваться среднеарифметическим температурным напором, а при отношении

$$\frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}} > 1,7 \quad (100)$$

надо пользоваться среднелогарифмическим температурным напором.

Средний температурный напор при противотоке при прочих равных условиях больше, чем при прямотоке, а потому необходимая поверхность нагрева при противотоке получается меньше.

### Задачи

**234.** Определить поверхность нагрева прямоточного и противоточного воздухоподогревателя, обогреваемого дымовыми газами. Температура воздуха на входе  $t'_в = 30^\circ\text{C}$ , на выходе  $t''_в = 200^\circ\text{C}$ .

Температура дымовых газов до воздухоподогревателя и после него – соответственно  $t'_г = 510^\circ\text{C}$  и  $t''_г = 320^\circ\text{C}$ . Давление воздуха  $p = 0,1 \text{ МН/м}^2$ . Количество подогреваемого воздуха  $V_в = 1,67 \text{ м}^3/\text{с} = 6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; коэффициент теплопередачи от газов к воздуху  $k = 15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$  (рис. 28).

### Решение

Количество тепла, передаваемого от газов к воздуху,

$$Q_в = V_в \cdot c'_в (t''_в - t'_в) = 1,67 \cdot 1,323 \cdot 10^3 \cdot 170 = 375 \text{ кВт},$$

где средняя объемная изобарная теплоемкость воздуха

$$c'_в = 1,323 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{град}.$$

Среднюю логарифмическую разность температур при прямотоке найдем по формуле (98):

$$\Delta t_{\text{прямоток}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{max}}}{\Delta t_{\text{min}}}} = \frac{(510 - 30) - (320 - 200)}{2,31 \lg \frac{510 - 30}{320 - 200}} = 260 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя определяется по формуле (95):

$$F_{\text{прямоток}} = \frac{Q_{\text{в}}}{k \cdot \Delta t_{\text{прямоток}}} = \frac{375\,000}{15 \cdot 260} = 96,2 \text{ м}^2.$$

Средняя логарифмическая разность при противотоке по формуле (98) равна

$$\Delta t_{\text{противоток}} = \frac{(510 - 200) - (320 - 30)}{2,31 \lg \frac{510 - 200}{320 - 30}} = 297 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Необходимая поверхность нагрева воздухоподогревателя определяется по формуле (95)

$$F_{\text{противоток}} = \frac{375\,000}{15 \cdot 297} = 84,2 \text{ м}^2.$$

Отсюда видно, что при противотоке требуется при прочих равных условиях меньшая поверхность нагрева.

**235.** Плоская стальная стенка парового котла толщиной  $\delta_c = 25$  мм омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой  $t_1 = 1000$  °С, а с другой кипящей водой с температурой  $t_2 = 190$  °С. Стенка покрыта слоем накипи  $\delta_H = 1,5$  мм.

Определить коэффициент теплопередачи от газов к воде, удельный тепловой поток и температуру стенки накипи, если известно, что коэффициент теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 30$  Вт/м<sup>2</sup>·град и от стенки к  $\alpha_2 = 4500$  Вт/м<sup>2</sup>·град. Коэффициент теплопроводности принять следующий: для стали  $\lambda_c = 40$  Вт/м·град и для накипи  $\lambda_H = 1,0$  Вт/м·град.

*Решение*

Определяем следующие, необходимые для решения примера величины:

1) термическое сопротивление при переходе от газов к воде по формуле

$$R = R_1 + R_2' + R_2'' + R_3 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{1}{\alpha_2};$$

$$R = \frac{1}{30} + \frac{0,025}{40} + \frac{0,0015}{1,0} + \frac{1}{4500} = 0,0334 + 0,0005 + 0,0015 + 0,0002 = \\ = 0,0357 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град/Вт};$$

2) коэффициент теплопередачи газов к воде по формуле (96)

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0357} \approx 28,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

3) удельный тепловой поток через стенку

$$q = k(t_1 - t_2) = 28,1(1000 - 190) = 22\,750 \text{ Вт/м}^2;$$

4) температуру стенки со стороны газов по формуле

$$t_{ст1} = t_1 - q \cdot \frac{1}{\alpha_2} = 1000 - \frac{22750}{4500} = 242 \text{ }^\circ\text{C};$$

5) температуру на границе между сталью и накипью  
 $242 - 22750 \cdot 0,0006 = 228,4 \text{ }^\circ\text{C};$

б) температуру накипи со стороны воды  
 $t_{ст2} = 190 + \frac{22750}{4500} = 195,1 \text{ }^\circ\text{C}.$

**236.** Определить потерю тепла в окружающую среду, происходящую вследствие теплопроводности через  $1 \text{ м}^2$  плоской стенки из шамотного кирпича толщиной  $\delta = 0,51 \text{ м}$ , если температура внутренней поверхности  $t_{ст1} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$  и наружной  $t_{ст2} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Решение*

Средняя температура шамотной кладки

$$t_{ср} = 0,5(t_{ст1} + t_{ст2}) = 0,5(900 + 120) = 510 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности находим по формуле, приведенной в таблице XII:

$$\lambda_{ср} = 0,7 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ср} = 0,7 + 6 \cdot 510 \cdot 10^{-4} = 1,006 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}.$$

Термическое сопротивление слоя равно

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,51}{1,006} = 0,506 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}.$$

Тепловой поток (потери тепла через  $1 \text{ м}^2$  стенки) определяем по формуле

$$q = \frac{t_{ст1} - t_{ст2}}{R} = \frac{900 - 120}{0,506} = 1542 \text{ Вт/м}^2.$$

**237.** Определить тепловой поток, проходящий через единицу стенки камеры сгорания диаметром  $180 \text{ мм}$ , если толщина стенки  $2,5 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности материала стенки  $34,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными и равным соответственно  $1200$  и  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Решение*

Из условия задачи следует, что протекает процесс теплопроводности через цилиндрическую стенку, поэтому

$$q_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,9 \cdot 1 \cdot (1200 - 600)}{\ln \frac{0,18 + 2 \cdot 0,0025}{0,18}} = 4,815 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}.$$

*Ответ:*  $q_1 = 4,815 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}.$

**238.** Определить тепловой поток через бетонную стену здания толщиной  $200 \text{ мм}$ , высотой  $H = 2,5 \text{ м}$  и длиной  $2 \text{ м}$ , если температуры на ее поверхностях  $t_{c1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{c2} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплопроводности  $\lambda = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

*Решение.*

$$Q = (t_{c1} - t_{c2})\lambda \frac{F}{\delta} = (20 + 10) \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot \frac{2}{0,2} = 750 \text{ Вт}.$$

*Ответ:*  $Q = 750 \text{ Вт}.$

**239.** Определить коэффициент теплопроводности материала стенки толщиной 50 мм, если плотность теплового потока через нее  $q = 100 \text{ Вт/м}^2$ , а разность температур на поверхностях  $\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\lambda = \frac{q\delta}{t_{c1} - t_{c2}} = \frac{100 \cdot 0,05}{20} = 0,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

*Ответ:*  $\lambda = 0,25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

**240.** Определить тепловой поток через стенку вращающегося шарообразного варочного котла, внутренний диаметр которого  $d_1 = 1,2 \text{ м}$ , а общая толщина стенки котла и слоя изоляции  $\delta = 100 \text{ мм}$ . Температура внутренней поверхности  $t_1 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ , внешней –  $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ .

*Решение*

Согласно условию задачи, внешний диаметр котла

$$d_2 = d_1 + 2\delta = 1,2 + 0,2 = 1,4 \text{ м}.$$

Тепловой поток определяется по формуле

$$Q = \frac{\pi \lambda \Delta t d_1 d_2}{\delta} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{0,1} = 528 \text{ Вт}.$$

*Ответ:*  $Q = 528 \text{ Вт}$ .

**241.** 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 не должна превышать  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности резины  $0,175 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ; электрическое сопротивление алюминиевого провода составляет  $0,00397 \text{ Ом/м}$ .

*Решение*

Определяем тепловой поток, проходящий через 1 м изоляции:

$$q_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (65 - 45)}{0,175 \cdot \ln \frac{3 + 2 \cdot 1,2}{3}} = 37,3 \text{ Вт/м}.$$

Из формулы

$$Q = I^2 R$$

находим допустимую силу тока:

$$I = \sqrt{\frac{37,3}{0,00397}} = 96,95 \text{ А}.$$

*Ответ:*  $I = 96,95 \text{ А}$ .

**242.** Трубопровод с внешним диаметром  $d_2 = 15 \text{ мм}$  необходимо покрыть тепловой изоляцией. Целесообразно ли использовать в качестве изоляции асбест, коэффициент теплопроводности которого  $\lambda_{из} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ . Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляции в окружающую среду  $\alpha_2 = 8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ .

*Решение*

Используя условие, имеем:

$$\frac{\alpha_2 d_2}{2} = \frac{8 \cdot 0,015}{2} = 0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Так как из условия задачи  $\lambda_{\text{из}} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$  и, следовательно, для асбеста  $\lambda_{\text{из}} > \alpha_2 d_2 / 2$ , то в данном случае этот материал использовать для тепловой изоляции трубопровода нецелесообразно. Из основного условия следует, что в этом случае нужно использовать материалы, для которых  $\lambda_{\text{из}} < 0,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , например, войлок шерстяной, для которого  $\lambda = 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ .

**243.** 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  $40 \text{ °C}$ . Коэффициент теплопроводности шлаковой ваты

$$\lambda = 0,058 + 0,000145 t.$$

*Решение*

Определим средний коэффициент теплопроводности шлаковой ваты:

$$\lambda_{\text{ср}} = 0,058 + 0,000145 \cdot \frac{700 + 40}{2} = 0,1102 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}.$$

Определяем толщину слоя изоляции

$$\delta = \frac{\lambda_{\text{ср}} \Delta t}{q} = \frac{0,1102 \cdot (700 - 40)}{523} = 0,139 \text{ м}.$$

*Ответ:*  $\delta = 0,139 \text{ м}$ .

**244.** Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при толщине  $l = 40 \text{ мм}$  и разности температур на поверхностях  $\Delta T = 20 \text{ °C}$  плотность теплового потока  $q = 145 \text{ Вт/м}^2$ .

*Ответ:*  $\lambda = 0,29 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ .

**245.** Определить тепловой поток через стенки картера авиадвигателя, если толщина стенок  $5,5 \text{ мм}$ , поверхность  $0,6 \text{ м}^2$ , температура на внутренней поверхности картера  $75 \text{ °C}$ , на наружной –  $68 \text{ °C}$ , а средний коэффициент теплопроводности стенок  $175 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ .

*Ответ:*  $Q = 133\,300 \text{ Вт}$ .

**246.** По условиям эксплуатации температура горизонтального нихромового неизолированного провода ( $d = 1 \text{ мм}$ ) не должна превышать  $600 \text{ °C}$ . Определить максимально допустимую силу тока, если температура воздуха  $30 \text{ °C}$ ,  $\rho = 1,2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ,  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,95$ .

*Ответ:*  $I = 11,5 \text{ А}$ .

**247.** Вычислить потери теплоты через единицу поверхности кирпичной обмуровки парового котла в зоне размещения водяного экономайзера и температуры на поверхностях стенки, если толщина стенки  $\delta = 250 \text{ мм}$ , температура газов  $t_1 = 700 \text{ °C}$  и воздуха в котельной  $t_2 = 30 \text{ °C}$ . Коэффициент теплоотдачи от газов

к поверхности стенки  $\alpha_1 = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  и от стенки к воздуху  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . Коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ .

*Ответ:* Потери теплоты  $q = 1385 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Температура на поверхностях стенки  $t_{c1} = 640 \text{ °С}$  и  $t_{c2} = 145,5 \text{ °С}$ .

**248.** Определить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ( $\delta = 510 \text{ мм}$ ) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ . Температура воздуха внутри помещения  $t_1 = 18 \text{ °С}$ ; коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стенки  $\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ ; температура наружного воздуха  $t_2 = -30 \text{ °С}$ ; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . Вычислить также температуры на поверхностях стены  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ .

*Ответ:* плотность теплового потока  $q = 58,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; температуры на поверхностях стены  $t_{c1} = 10,2 \text{ °С}$  и  $t_{c2} = -27,1 \text{ °С}$ .

**249.** Решить задачу 248, если стена покрыта снаружи слоем тепловой изоляции толщиной  $50 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{из} = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ . Сравнить потери теплоты через изолированную и неизолированную стенки.

*Ответ:* потери теплоты через изолированную стенку  $q = 33,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; температуры на поверхностях стены:  $t_{c1} = 13,6 \text{ °С}$  и  $t_{c2} = -28,3 \text{ °С}$ ; потери теплоты через неизолированную стенку на  $76,5 \%$  больше, чем через изолированную.

**250.** Вычислить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхностях стенки, если заданы следующие величины: температура дымовых газов  $t_1 = 1000 \text{ °С}$ , кипящей воды  $t_2 = 200 \text{ °С}$ ; коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  и от стенки к кипящей воде  $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ .

Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ , толщина стенки  $\delta = 12 \text{ мм}$ .

*Ответ:*  $q = 76\,500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; температуры на поверхностях стенки  $t_{c1} = 235 \text{ °С}$  и  $t_{c2} = 215 \text{ °С}$ .

**251.** Решить задачу 250 при условии, что в процессе эксплуатации поверхность нагрева парового котла со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной  $\delta_c = 1 \text{ мм}$  ( $\lambda_c = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ ) и со стороны воды слоем накипи толщиной  $\delta_n = 2 \text{ мм}$  ( $\lambda_n = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ ).

Вычислить плотность теплового потока через  $1 \text{ м}^2$  загрязненной поверхности нагрева и температуры на поверхностях соответствующих слоев  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  и  $t_{c4}$ . Сравнить результаты расчета с ответом задачи 8 и определить уменьшение тепловой нагрузки.

*Ответ:* плотность теплового потока  $q = 31\,500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ; температуры на поверхностях слоев  $t_{c1} = 685 \text{ °С}$ ,  $t_{c2} = 291 \text{ °С}$ ,  $t_{c3} = 283 \text{ °С}$ ,  $t_{c4} = 206 \text{ °С}$ ; уменьшение тепловой нагрузки поверхности нагрева в результате загрязнения  $\Delta q = 58,9 \%$ .

## Глава 11. Расчет характеристик топлив

### Состав топлива

Элементарный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S, азота N, золы А и влаги W (в процентах или в долях единицы). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому обозначению присваивается соответствующий надстрочный индекс:

- горючая масса  $C^r + H^r + O^r + S^r + N^r = 100 \%$ ;
- сухая масса  $C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c = 100 \%$ ;
- рабочая масса  $C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100 \%$ .

Пересчет элементарного состава одной массы топлива на другую производится при помощи коэффициентов, приведенных в таблице 4

Таблица 4

Коэффициенты для пересчета элементарного состава топлив

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	Рабочая	Сухая	Горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Пересчет элементарного состава рабочей массы топлива с  $W^p_1$  на массу с зольностью  $W^p_2$  производится умножением исходных составляющих на множитель  $\frac{100 - W^p_2}{100 - W^p_1}$ . Пересчет элементарного состава рабочей массы топлива с зольностью  $A^p_1$  на массу с зольностью  $A^p_2$  производится умножением исходных составляющих на множитель  $\frac{100 - A^p_2}{100 - A^p_1}$ .

### Задачи

**252.** При лабораторных исследованиях был получен следующий элементный состав кузнецкого угля марки СС на горючую массу:  $C^r = 84 \%$ ;  $H^r = 4,5 \%$ ;  $N^r = 2 \%$ ;  $O^r = 9 \%$ ;  $S^r = 0,5 \%$ . Влажность и зольность на рабочую массу равны  $W^p = 12 \%$  и  $A^p = 11,4 \%$ .

Определить элементный состав на рабочую массу топлива.

*Решение*

Для пересчета с горючей массы на рабочую используем коэффициент пересчета

$$K = \frac{100 - W^p - A^p}{100} = \frac{100 - 12 - 11,4}{100} = 0,766.$$

Отсюда получаем:

$$C^p = C^r \cdot K = 84 \cdot 0,766 = 64,34 \%;$$

$$H^p = H^r \cdot K = 4,5 \cdot 0,766 = 3,45 \%;$$

$$\begin{aligned}N^P &= N^r \cdot K = 2 \cdot 0,766 = 1,53 \% \\O^P &= O^r \cdot K = 9 \cdot 0,766 = 6,9 \% \\S^P &= S^r \cdot K = 0,5 \cdot 0,766 = 0,38 \%\end{aligned}$$

Проверка: суммарный элементный состав топлива на рабочую массу  $64,34 + 3,45 + 1,53 + 6,9 + 0,38 + 12 + 11,4 = 100 \%$ .

**253.** Задан следующий элементный состав на горючую массу кузнецкого угля марки СС пониженного качества:  $C^r = 80,2 \%$ ;  $H^r = 3,3 \%$ ;  $N^r = 2,1 \%$ ;  $O^r = 14 \%$ ;  $S^r = 0,4 \%$ . Известно, что зольность сухой массы  $A^c = 22,12 \%$ .

Определить элементный состав топлива на рабочую массу при  $W^p = 15 \%$ .

*Решение*

В соответствии с табл. 4 коэффициент пересчета масс имеет вид

$$\frac{100 - W^p - A^p}{100}.$$

Для его использования пересчитаем зольность с сухой массы на рабочую:

$$A^p = A^c \cdot \frac{100 - W^p}{100} = 22,12 \cdot \frac{100 - 15}{100} = 18,8 \%.$$

Отсюда получаем

$$K = \frac{100 - W^p - A^p}{100} = \frac{100 - 15 - 18,8}{100} = 0,662.$$

Определяем элементный состав на рабочую массу:

$$\begin{aligned}C^p &= C^r \cdot K = 80,2 \cdot 0,662 = 53,09 \% \\H^p &= H^r \cdot K = 3,3 \cdot 0,662 = 2,18 \% \\N^p &= N^r \cdot K = 2,1 \cdot 0,662 = 1,39 \% \\O^p &= O^r \cdot K = 14 \cdot 0,662 = 9,27 \% \\S^p &= S^r \cdot K = 0,4 \cdot 0,662 = 0,27 \%\end{aligned}$$

Проверяем полный элементный состав рабочей массы:

$$53,09 + 2,18 + 9,27 + 1,39 + 0,27 + 18,8 + 15 = 100 \%$$

**254.** Сушка березовского угля с составом рабочей массы  $W^p = 33 \%$ ;  $A^p = 4,7 \%$ ;  $S^p = 0,2 \%$ ;  $C^p = 44,3 \%$ ;  $H^p = 3 \%$ ;  $N^p = 0,4 \%$ ;  $O^p = 14,4 \%$  производится при разомкнутой схеме. Определить состав рабочей массы подсушенного до  $W^p = 10 \%$  топлива. (Пояснение: при разомкнутой схеме приготовления сушильные газы сбрасываются в атмосферу, а при замкнутой – в топку вместе с угольной пылью.).

*Ответ:*  $A^p = 6,3 \%$ ;  $S^p = 0,3 \%$ ;  $C^p = 59,5 \%$ ;  $H^p = 4 \%$ ;  $N^p = 0,55 \%$ ;  $O^p = 19,35 \%$ ;  $W^p = 10 \%$ .

**255.** Содержание углерода в рабочей массе экибастузского угля составляет  $C^p = 43,4 \%$  при  $W^p = 7 \%$  и  $A^p = 38,1 \%$ . Определить содержание углерода в сухой массе при увеличении рабочей зольности топлива до  $A^p = 45 \%$ .

*Ответ:*  $C^c = 41,12 \%$ .

**256.** Определить состав горючей массы нерюнгринского угля, если известен состав рабочей массы:  $W^p = 9,5 \%$ ;  $A^p = 12,7 \%$ ;  $S^p = 0,2 \%$ ;  $C^p = 66,1 \%$ ;  $H^p = 3,3 \%$ ;  $N^p = 0,7 \%$ ;  $O^p = 7,5 \%$ .

Ответ:  $S^Г = 0,26 \%$ ;  $C^Г = 84,96 \%$ ;  $H^Г = 4,24 \%$ ;  $N^Г = 0,9 \%$ ;  $O^Г = 9,64 \%$ .

**257.** Определить рабочий состав эстонских сланцев, если известен элементный состав горючей массы:  $S^Г = 5,25 \%$ ;  $C^Г = 72,13 \%$ ;  $H^Г = 10,16 \%$ ;  $N^Г = 0,33 \%$ ;  $O^Г = 12,13 \%$ . Рабочая масса имеет  $W^P = 13 \%$ ;  $(CO_2)_{кр} = 16,5 \%$ ;  $A^P = 40 \%$ . Коэффициент пересчета вычисляется по формуле (1)

Ответ:  $S^P = 1,6 \%$ ;  $C^P = 22 \%$ ;  $H^P = 3,1 \%$ ;  $N^P = 0,1 \%$ ;  $O^P = 3,7 \%$ ;  $W^P = 13 \%$ ;  $(CO_2)_{кр} = 16 \%$ ;  $A^P = 40 \%$ .

**258.** Определить состав горючей массы кизеловского угля марки Г, если состав его рабочей массы:  $C^P = 48,5 \%$ ;  $H^P = 3,6 \%$ ;  $S_{л}^P = 6,1 \%$ ;  $N^P = 0,8 \%$ ;  $O^P = 4,0 \%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 33,0 \%$  и влажность рабочая  $W^P = 6,0 \%$ .

Ответ:  $C^Г = 77 \%$ ;  $H^Г = 5,7 \%$ ;  $S_{л}^Г = 9,7 \%$ ;  $N^Г = 1,3 \%$ ;  $O^Г = 6,3 \%$ .

**259.** Определить состав рабочей массы кузнецкого угля марки Д, если состав его горючей массы:  $C^Г = 78,5 \%$ ;  $H^Г = 5,6 \%$ ;  $S_{л}^Г = 0,4 \%$ ;  $N^Г = 2,5 \%$ ;  $O^Г = 13,0 \%$ ; зольность сухой массы  $A^c = 15,0 \%$  и влажность рабочая  $W^P = 12,0 \%$ .

Ответ:  $C^P = 58,7 \%$ ;  $H^P = 4,2 \%$ ;  $S_{л}^P = 0,3 \%$ ;  $N^P = 1,9 \%$ ;  $O^P = 9,7 \%$ .

**260.** В мельнице-вентиляторе подсушивается подмосковный уголь марки Б2 следующего состава:  $C_1^P = 28,7 \%$ ;  $H_1^P = 2,2 \%$ ;  $(S_{л}^P)_1 = 2,7 \%$ ;  $N_1^P = 0,6 \%$ ;  $O_1^P = 8,6 \%$ ;  $A_1^P = 25,2 \%$ ;  $W_1^P = 32 \%$ . Определить состав рабочей массы подсушенного топлива, если известно, что влажность топлива после подсушки  $W_2^P = 15 \%$ .

Ответ:  $C_2^P = 45,9 \%$ ;  $H_2^P = 2,7 \%$ ;  $S_{л}^P = 3,4 \%$ ;  $N_2^P = 0,7 \%$ ;  $O_2^P = 10,8 \%$ ;  $A_2^P = 31,5 \%$ .

**261.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из 3000 кг донецкого угля марки Д следующего состава:  $C_1^P = 49,3 \%$ ;  $H_1^P = 3,6 \%$ ;  $(S_{л}^P)_1 = 3,0 \%$ ;  $N_1^P = 1,0 \%$ ;  $O_1^P = 8,3 \%$ ;  $A_1^P = 21,8 \%$ ;  $W_1^P = 13,0 \%$  и 4500 кг донецкого угля марки Г состава:  $C_2^P = 55,2 \%$ ;  $H_2^P = 3,8 \%$ ;  $(S_{л}^P)_2 = 3,2 \%$ ;  $N_2^P = 1,0 \%$ ;  $O_2^P = 5,8 \%$ ;  $A_2^P = 23,0 \%$ ;  $W_2^P = 8,0 \%$ . Определить состав рабочей смеси.

Ответ:  $C_{см}^P = 52,8 \%$ ;  $H_{см}^P = 3,7 \%$ ;  $S_{л}^P = 3,1 \%$ ;  $N_{см}^P = 1,0 \%$ ;  $O_{см}^P = 6,8 \%$ ;  $A_{см}^P = 22,6 \%$ ;  $W_{см}^P = 10,0 \%$ .

**262.** В топке котла сжигается смесь, состоящая из 800 кг кузнецкого угля марки Д состава:  $C_1^P = 58,7 \%$ ;  $H_1^P = 4,2 \%$ ;  $(S_{л}^P)_1 = 0,3 \%$ ;  $N_1^P = 1,9 \%$ ;  $O_1^P = 9,7 \%$ ;  $A_1^P = 13,2 \%$ ;  $W_1^P = 12,0 \%$  и 1200 кг кузнецкого угля марки Г следующего состава:  $C_2^P = 66,0 \%$ ;  $H_2^P = 4,7 \%$ ;  $(S_{л}^P)_2 = 0,5 \%$ ;  $N_2^P = 1,8 \%$ ;  $O_2^P = 7,5 \%$ ;  $A_2^P = 11,0 \%$ ;  $W_2^P = 8,5 \%$ . Определить состав рабочей смеси.

Ответ:  $C_{см}^P = 63,1 \%$ ;  $H_{см}^P = 4,5 \%$ ;  $S_{л}^P = 0,4 \%$ ;  $N_{см}^P = 1,8 \%$ ;  $O_{см}^P = 8,4 \%$ ;  $A_{см}^P = 11,9 \%$ ;  $W_{см}^P = 9,9 \%$ .

### Теплота сгорания топлива

Различают высшую  $Q_B$  и низшую  $Q_H$  теплоту сгорания топлива. Высшая теплота сгорания топлива определяется по величине теплоты сгорания в калориметрической бомбе.

Высшая теплота сгорания больше низшей на количество теплоты, выделяемой при конденсации паров, входящих в состав дымовых газов. Все расчеты экономичности агрегата ведутся по низшей теплоте сгорания. Низшая и высшая теплота сгорания (кДж/кг) связаны зависимостью

$$Q_H = Q_B - 25,1(9H + W). \quad (101)$$

Пересчет теплоты сгорания топлива:

$$Q_{H^p} = Q_{B^p} - 25,1(9H^p + W^p); \quad (102)$$

$$Q_{H^c} = Q_{B^c} - 226H^c; \quad (103)$$

$$Q_{H^r} = Q_{B^r} - 226H^r; \quad (104)$$

$$Q_{H^p} = Q_{H^c} \frac{100 - W^p}{100 - 25,1W^p}; \quad (105)$$

$$Q_{H^p} = Q_{H^r} \frac{100 - W^p - A^p}{100 - 25,1W^p}. \quad (106)$$

Здесь верхние индексы «р», «с», «г» относятся к рабочей, сухой и горючей массам топлива. При изменении влажности от  $W^p_1$  до  $W^p_2$  или зольности топлива от  $A^p_1$  до  $A^p_2$  для определения теплоты сгорания используются зависимости:

$$Q^p_{H2} = (Q^p_{H1} + 25,1W^p_1) \cdot \frac{100 - W^p_2}{100 - W^p_1} - 25,1W^p_2; \quad (107)$$

$$Q^p_{H2} = Q^p_{H1} \frac{100 - A^p_2}{100 - A^p_1}. \quad (108)$$

При одновременном изменении влажности и зольности

$$Q^p_{H2} = (Q^p_{H1} + 25,1W^p_1) \cdot \frac{100 - W^p_2 - A^p_2}{100 - W^p_1 - A^p_1} - 25,1W^p_2. \quad (109)$$

Низшую теплоту сгорания жидких и твердых топлив  $Q^p_H$ , кДж/кг, определяют по формуле Менделеева:

$$Q^p_H = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25,1W^p; \quad (110)$$

$$Q^r_H = 339C^r + 1030H^r - 109(O^r - S^r). \quad (111)$$

Теплота сгорания газообразного топлива принимается по данным calorиметрического анализа. При отсутствии таких данных теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях подсчитывается по формуле

$$Q^c_H = 0,01 \left[ Q^c_{B^c} H_2 S + Q_{o.y} CO + Q_{вод} H_2 + \sum (Q_{o.y} в CтHn) \right], \quad (112)$$

где  $Q^c_B$ ,  $Q_{o.y}$  и т. д. – теплота сгорания отдельных составляющих, входящих в состав газообразного топлива, кДж/м<sup>3</sup>; последние должны приниматься по теплотехническим справочникам.

Вместо формулы (112) для определения теплоты сгорания 1 м<sup>3</sup> чистого сухого газа при нормальных условиях можно пользоваться следующим выражением, кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q^c_H = 126,4CO + 108,2H_2 + 358,5CH_4 + 592C_2H_4 + 638,5C_2H_6 + 859,8C_3H_8 + 913C_3H_9 + 1404C_6H_6 + 1134C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1462C_5H_{12} + 234,5H_2S.$$

При сжигании смеси двух твердых или жидких топлив, заданных массовыми долями ( $g_1$  – массовая доля одного из топлив в смеси), теплота сгорания 1 кг смеси подсчитывается по формуле

$$Q^p_H = Q^p_{H1}g_1 + Q^p_{H2}(1 - g_1). \quad (113)$$

Если же смесь задана в долях по тепловыделению каждого топлива ( $q_1$  – доля по тепловыделению одного из топлив), то для перехода к массовым долям используется зависимость

$$g_1 = q_1 \cdot \frac{Q^p_{H2}}{q_1 \cdot Q^p_{H2} + (1 - q_1)Q^p_{H1}}. \quad (114)$$

При сжигании смеси твердого или жидкого топлива с газообразным расчет ведется на 1 кг твердого или жидкого топлива с учетом количества газа  $x$  м<sup>3</sup>, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q^p_H = Q^p_{H1} + x \cdot Q^p_{H2}. \quad (115)$$

Если смесь задана в долях тепловыделения  $q_1$ , то количество газа (м<sup>3</sup>), приходящееся на 1 кг твердого или жидкого топлива, может быть найдено по зависимости

$$x = (1 - q_1) \frac{Q^p_{H1}}{q_1 \cdot Q^p_{H2}}. \quad (116)$$

Жаропроизводительность топлива – это максимальная температура, развиваемая при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха при температуре топлива и воздуха, равной 0 °С.

Название величины	Обозначение	Единица измерения	Формула
Масса	$m$	кг	$m = Q/q$
Удельная теплота сгорания	$q$	Дж/кг	$q = Q/m$
Количество теплоты	$Q$	Дж	$Q = q \cdot m$

### Задачи

**263.** Какое количество теплоты можно получить при сжигании 5 кг бензина?

*Решение*

$$Q = q \cdot m;$$

$$Q = 46 \cdot \frac{10^6 \text{ Дж}}{\text{кг}} \cdot 5 \text{ кг} = 230 \text{ МДж}.$$

*Ответ:*  $Q = 230 \text{ МДж}$ .

**264.** Сколько килограммов каменного угля надо сжечь, чтобы получить 6,4 МДж энергии?

*Решение*

$$m = \frac{Q}{q};$$

$$q = 30 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$m = \frac{6,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{30 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}} = 0,213 \text{ кг}.$$

*Ответ:*  $m = 0,213 \text{ кг}$ .

**265.** Какой массы торф надо сжечь, чтобы получить такое же количество теплоты, как при сжигании 8 кг керосина?

Решение

$$q_{\text{кер}} = 46 \text{ МДж/кг};$$

$$q_{\text{торф}} = 14 \text{ МДж/кг};$$

$$Q = q \cdot m;$$

$$Q = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \cdot 8 \text{ кг} = 368 \text{ МДж};$$

$$m_{\text{торф}} = \frac{Q}{q};$$

$$m_{\text{торф}} = \frac{368 \text{ МДж}}{14 \text{ МДж/кг}} \approx 26,29 \text{ кг}.$$

Ответ:  $m_{\text{торф}} \approx 26,29 \text{ кг}$ .

**266.** Определить теплоту сгорания газообразного топлива, имеющего следующий состав: метан  $\text{CH}_4 = 94 \%$ ; этан  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8 \%$ ; пропан  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,4 \%$ ; бутан  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,3 \%$ ; пентан  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$ ; азот  $\text{N}_2 = 2 \%$ ; двуокись углерода  $\text{CO}_2 = 0,4 \%$ . Низшая теплота сгорания отдельных газовых составляющих имеет значения: для метана  $35\,818 \text{ кДж/м}^3$ ; для этана  $63\,248 \text{ кДж/м}^3$ ; для пропана  $91\,251 \text{ кДж/м}^3$ ; для бутана  $118\,646 \text{ кДж/м}^3$ ; для пентана  $146\,077 \text{ кДж/м}^3$ .

Решение

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 0,01(0 + 0 + 0 + 35\,818 \cdot 94 + 63\,248 \cdot 2,8 + 91\,251 \cdot 0,4 + 118\,646 \cdot 0,3 + 146\,077 \cdot 0,1) = 36\,321 \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ:  $Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 36\,321 \text{ кДж/м}^3$ .

**267.** При работе на сниженных нагрузках в топке котла сжигается  $G_1 = 25 \text{ т/ч}$  твердого топлива с  $Q_{\text{н1}}^{\text{п}} = 20\,934 \text{ кДж/кг}$  и  $G_2 = 15 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$  газа с  $Q_{\text{н2}}^{\text{п}} = 40 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$ .

Определить условную теплоту сгорания смеси топлив  $Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}}$ .

Решение

При сжигании твердого или жидкого топлива в смеси с газообразным расчет ведется по условной теплоте сгорания, отнесенной к 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}} = Q_{\text{н2}}^{\text{п}} + x \cdot Q_{\text{н2}}^{\text{п}},$$

где  $x$  – количество газа ( $\text{м}^3$ ), приходящееся на 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$x = \frac{G_2}{G_1} = \frac{15 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} = 0,6 \text{ м}^3.$$

Тогда

$$Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}} = 20\,934 + 0,6 \cdot 40 \cdot 10^3 = 44\,934 \text{ кДж/кг}.$$

Ответ:  $Q_{\text{н.усл.}}^{\text{п}} = 44\,934 \text{ кДж/кг}$ .

**268.** Определить калорийный и технический эквиваленты при сжигании мазута с  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 41\,440 \text{ кДж}$ , если КПД котельной  $\eta_{\text{к}} = 0,93$ .

Решение

$$\mathcal{E}_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{29\,300};$$

$$\mathcal{E}_{\text{кал}} = \frac{41\,440}{29\,300} = 1,41;$$

$$\mathcal{E}_{\text{тех}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}{29\,300};$$

$$\mathcal{E}_{\text{тех}} = \frac{41\,440 \cdot 0,93}{29\,300} = 1,31.$$

Ответ:  $\mathcal{E}_{\text{кал}} = 1,41$ ;  $\mathcal{E}_{\text{тех}} = 1,31$ .

**269.** Определите расход бензина автомобилем на 1 км пути при скорости 72 км/ч. Мощность двигателя автомобиля 20 кВт, КПД равен 25 %.

Дано:  $S = 1$  км,  $v = 72$  км/ч,  $N = 20$  кВт,  $\eta = 25$  %.

*Решение*

Согласно определению, коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение полезной работы автомобиля к затраченной работе.

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}}.$$

Полезную работу  $A_{\text{п}}$  можно определить через его мощность  $N$  и время работы  $t$ . Последнее можно найти как отношение пройденного пути  $S$  к скорости движения  $v$ , поэтому

$$A_{\text{п}} = N \cdot t = N \cdot \frac{S}{v}.$$

Затраченная работа  $A_{\text{з}}$  равна количеству теплоты  $Q$ , выделившейся при сгорании бензина в двигателе. Последнюю найдем как произведение удельной теплоты сгорания  $q$  на массу бензина  $m$ .

$$A_{\text{з}} = qm.$$

Массу бензина представим как произведение плотности бензина  $\rho$  на объем  $V$ .

$$A_{\text{з}} = q\rho V.$$

Подставим выражения, тогда:

$$\eta = \frac{NS}{vq\rho V}.$$

Выразим искомый объем бензина  $V$ :

$$V = \frac{NS}{\eta v q \rho}.$$

Плотность бензина  $\rho$  равна 700 кг/м<sup>3</sup>, а удельная теплота сгорания  $q$  – 46 МДж/кг. Переведем скорость из км/ч в м/с, а КПД из процентов в доли единицы:

$$72 \text{ км/ч} = 72 \cdot 1000 / 3600 \text{ м/с} = 20 \text{ м/с},$$

$$25 \% = 0,25.$$

Подставим значения величин в последнюю формулу, чтобы подсчитать численный ответ.

$$V = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 1000}{0,25 \cdot 20 \cdot 46 \cdot 10^6 \cdot 700} = 124,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 124,2 \text{ см}^3.$$

Ответ: 124,2 см<sup>3</sup>.

**270.** На складе имеется 5 м<sup>3</sup> сосновых дров, 3 т каменного угля, 2 т торфа. На какое количество бензина можно обменять их с учетом равноценного обмена по теплоте сгорания?

$$\begin{aligned}q_{\text{торф}} &= 14 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \\q_{\text{сосны}} &= 13 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \\ \rho_{\text{торф}} &= 300 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{\text{сосна}} &= 400 \text{ кг/м}^3; \\q_{\text{уголь}} &= 27 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \\ \rho_{\text{уголь}} &= 1200 \text{ кг/м}^3; \\Q_{\text{бенз}} &= 45 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.\end{aligned}$$

*Ответ:* 3 т.

**271.** Рассчитать теплоту сгорания горючей смеси бензина при коэффициенте избытка воздуха 1,2. Состав бензина: С = 85,5 %, Н = 14,5 %.

*Решение*

Теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива количество воздуха (кг) может быть определено по выражению

$$L_0 = \frac{2,67C + 8H + S - O}{23,2}.$$

Определяем количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг бензина по формуле

$$L_0 = \frac{2,67 \cdot 85,5 + 8 \cdot 14,5}{23,2} = 14,84 \text{ кг возд/кг топл.}$$

Определяем теплоту сгорания бензина:

$$\begin{aligned}Q_{\text{H}}^{\text{P}} &= 339C^{\text{P}} + 1030H^{\text{P}} - 109(O^{\text{P}} - S^{\text{P}}) - 25,1W^{\text{P}}; \\Q_{\text{H}}^{\text{P}} &= 339 \cdot 85,5 + 1030 \cdot 14,5 = 43\,919,5 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Рассчитываем теплоту сгорания горючей смеси:

$$\begin{aligned}Q_{\text{гор.смеси}} &= \frac{Q_{\text{H}}}{1 + a \cdot L_0}, \\Q_{\text{гор.смеси}} &= \frac{43919,5}{1 + 1,2 \cdot 14,84} = 2335,15 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

*Ответ:*  $Q_{\text{гор.смеси}} = 2335,15 \text{ кДж/кг}$ .

**272.** Какое количество теплоты можно получить при сжигании 0,5 т торфа; 1,5 т каменного угля?

*Ответ:*  $7 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ ;  $45 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ .

**273.** Какое количество теплоты можно получить при сжигании 5 м<sup>3</sup> сухих березовых дров?

*Ответ:* 45 500 МДж.

**274.** Сколько березовых дров нужно сжечь, чтобы получить такое же количество теплоты, которое выделяется при сгорании 1 кг природного газа?

$$q_{\text{газа}} = 35 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \quad q_{\text{бер}} = 14 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \quad \rho_{\text{бер}} = 700 \text{ кг/м}^3.$$

*Ответ:* 3,57 м<sup>3</sup>.

**275.** Сколько торфа нужно сжечь, чтобы получить такое же количество теплоты, которое выделяется при сгорании 50 кг каменного угля?  $q_{\text{торф}} = 14 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $q_{\text{уголь}} = 27 \cdot 10^6$  Дж/кг.

*Ответ:* 96,4 кг.

**276.** Определите массу спирта, которую нужно сжечь для того, чтобы нагреть 5 л воды на 50 °С. Считать, что вся теплота, выделяемая при сгорании спирта, идет на нагревание воды.

*Ответ:* 38,7 г.

**277.** Определите массу бурого угля, который надо сжечь, чтобы нагреть воду массой 10 кг от 20 °С до 100 °С. Считать, что на нагревание воды идет 20 % теплоты от сгорания топлива.

*Ответ:* 1,14 кг.

**278.** В топке котла парового двигателя сожгли торф массой 20 т. Какой массой каменного угля можно было бы заменить сгоревший торф? (Удельную теплоту сгорания торфа принять равной  $1,5 \cdot 10^7$  Дж/кг.)

*Ответ:* 10 т.

**279.** Сколько теплоты выделится при полном сгорании керосина объемом 0,25 м<sup>3</sup>; спирта объемом 0,00005 м<sup>3</sup>; бензина объемом 25 л; нефти объемом 250 л?

*Ответ:*  $9,2 \cdot 10^9$  Дж; 10,8 МДж; 816,5 МДж;  $8,8 \cdot 10^9$  Дж.

**280.** Смешали бензин объемом 1,5 л и спирт объемом 0,5 л. Какое количество теплоты выделится при полном сгорании этого топлива?

*Ответ:* 59,79 МДж.

**281.** Сколько спирта надо сжечь, чтобы изменить температуру воды массой 3 кг от 15 до 60 °С, если вся теплота, выделенная при горении спирта, пойдет на нагревание воды?

*Ответ:* 21 г.

**282.** Насколько изменится температура воды, масса которой 22 кг, если ей передать всю энергию, выделившуюся при сгорании керосина, масса которого равна 50 г?

*Ответ:* 25 °С.

**283.** Насколько изменится температура воды, масса которой 10 кг, если ей передать всю энергию, выделившуюся при сгорании керосина, масса которого равна 20 г?

*Ответ:* 21,9 °С.

**284.** На спиртовке нагрели воду массой  $m = 500$  г. Температура ее повысилась от  $t_1 = 15$  °С до  $t_2 = 80$  °С. При этом сожгли  $m_c = 30$  г спирта. Найти коэффициент полезного действия (КПД) установки. Удельная теплота сгорания спирта  $q = 2,7 \cdot 10^7$  Дж/кг.

*Ответ:* 16,85 %.

**285.** 2 л воды нагрели с 20 °С до кипения на электроплитке. Определить количество березовых дров для получения такого же результата, если КПД печи 25 % ( $q_{\text{бер}} = 14 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $\rho_{\text{бер}} = 700$  кг/м<sup>3</sup>).

*Ответ:* 2,73 м<sup>3</sup>.

**286.** Даны кубики одинакового размера из сосны и березы. Нужно определить количество теплоты, которое выделится при полном сгорании этих видов топлива:  $q_{\text{бер}} = 14 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $q_{\text{сосны}} = 13 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $\rho_{\text{бер}} = 700$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{сосны}} = 400$  кг/м<sup>3</sup>;  $V = 0,0001$  м<sup>3</sup>.

*Ответ:*  $Q_{\text{бер}} = 980$  кДж;  $Q_{\text{сосны}} = 520$  кДж.

**287.** Определить калорийный и технический эквиваленты при сжигании каменного угля с  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 2,7 \cdot 10^7$  кДж, если КПД котельной  $\eta_{\text{к}} = 0,90$ .

*Ответ:*  $\mathcal{E}_{\text{кал}} = 0,92$ ;  $\mathcal{E}_{\text{тех}} = 0,83$ .

**288.** Определить калорийный и технический эквиваленты при сжигании природного газа с  $q = 4,4 \cdot 10^7$  кДж/кг, если КПД котельной  $\eta_{\text{к}} = 0,85$ .

*Ответ:*  $\mathcal{E}_{\text{кал}} = 1,5$ ;  $\mathcal{E}_{\text{тех}} = 1,28$ .

**289.** Определите расход бензина автомобилем на 20 км пути при скорости 90 км/ч. Мощность двигателя автомобиля 50 кВт, КПД равен 25 %.

*Ответ:* 4969 см<sup>3</sup>.

**290.** Автомобиль с дизельным двигателем мощностью 120 кВт и КПД равным 35 %, двигаясь со скоростью 72 км/ч прошел путь 50 км. Определить расход топлива. (Плотность дизтоплива равна 850 кг/м<sup>3</sup>, а удельная теплота сгорания  $q = 42$  МДж/кг).

*Ответ:* 24 л.

**291.** Необходимо сделать равноценный обмен 6 т дизельного топлива на березовые дрова. Рассчитать количество дров, если  $q_{\text{дизтоплива}} = 42$  МДж/кг.

$q_{\text{бер}} = 14 \cdot 10^6$  Дж/кг;

$\rho_{\text{бер}} = 700$  кг/м<sup>3</sup>

*Ответ:* 25,7 м<sup>3</sup>.

**292.** Рассчитать теплоту сгорания горючей смеси дизельного топлива при коэффициенте избытка воздуха 1,5; 1,8. Состав топлива: С = 87 %, Н = 12,6 %, S = 0,2 %, О = 0,2 %.

*Ответ:* 1884,3 кДж/кг; 1582,4 кДж/кг.

**293.** Рассчитать теплоту сгорания горючей смеси спирта C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>ОН, если сгорание происходило при избытке воздуха 1,15; 0,90.

*Ответ:* 2406,8 кДж/кг; 3002,2 кДж/кг.

**294.** Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха, если зольность угля марки АШ (состав:  $W^{\text{р}} = 8,5$  %;  $A^{\text{р}} = 30,2$  %;  $S^{\text{р}} = 1,6$  %;  $C^{\text{р}} = 56,4$  %;  $H^{\text{р}} = 3,6$  %;  $N^{\text{р}} = 1,7$  %;  $O^{\text{р}} = 5,9$  %) увеличится до 35 %.

*Ответ:*  $V_0$  изменилось с 5,8 до 5,4 м<sup>3</sup>/кг.

**295.** Определить, как изменится теоретически необходимый объем воздуха при сжигании смеси твердого и газообразного топлива – кузнецкого угля марки СС и бухарского природного газа (состав угля марки СС:  $W^{\text{р}} = 8,5$  %;  $A^{\text{р}} = 30,2$  %;  $S^{\text{р}} = 1,6$  %;  $C^{\text{р}} = 56,4$  %;  $H^{\text{р}} = 3,6$  %;  $N^{\text{р}} = 1,7$  %;  $O^{\text{р}} = 5,9$  %; горючий состав бухарского природного газа: метан CH<sub>4</sub> = 94,9 %; этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 3,2 %; пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 0,4 %; бутан C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 0,1 %; пентан C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> = 0,1 %), если доля природного газа в общем тепловыделении увеличится до  $q = 0,6$ .

*Ответ:*  $V_0 = 11,26$  м<sup>3</sup>/кг.

## Библиографический список

1. Теплотехника / А. А. Шукин, И. Н. Сушкин, Р. Г. Зах [и др.]. – Москва : Металлургия, 1973. – 473 с. – Текст : непосредственный.
2. Сборник задач по термодинамике и теплотехнике / А. В. Болгарский, В. И. Голдобеев, Н. С. Идиатулин, Д. Ф. Толкачев. – Москва : Высшая школа, 1972. – 304 с. – Текст : непосредственный.
3. Рабинович, О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – Москва : Машиностроение, 1969. – 376 с. – Текст : непосредственный.
4. Теплотехника : учебник для технических специальных вузов / В. Н. Луканин, М. Т. Шатров, Г. М. Камаров [и др.]. – Издание 4-е, испр. – Москва : Высшая школа, 2003. – 671 с. – Текст : непосредственный.
5. Баскаков, А. П. Теплотехника : учебное пособие для вузов / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с. – Текст : непосредственный.
6. Теплотехника : курс общей теплотехники для нетеплоэнергетических специальностей вузов ; Под ред. И. Н. Сушкина. – Изд. 2-е. – Москва : Металлургия, 1973. – 473 с. – Текст : непосредственный.
7. Теплотехника : учебник для нетеплоэнергетических специальностей вузов ; Под ред. Г. А. Матвеева. – Москва : Высшая школа, 1981. – 480 с. – Текст : непосредственный.
8. Теплотехника : учебник для втузов ; под общ. ред. В. Н. Крутова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 419 с. Текст : непосредственный.

## Приложение 1

Таблица I

### Международная система единиц (СИ)

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенные обозначения единиц измерения
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°К
Сила света	свеча	св
<i>Дополнительные единицы</i>		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	стер
<i>Производные единицы</i>		
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем	кубический метр	м <sup>3</sup>
Плотность (объемная масса)	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>
Скорость	метр в секунду	м/с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>
Сила	Ньютон	Н
Давление (механическое напряжение)	Ньютон на квадратный метр	Н/м <sup>2</sup>
Работа, энергия, количество теплоты	Джоуль	Дж
Мощность	Ватт	Вт
Удельная работа, энергия, теплота	Джоуль на килограмм	Дж/кг
Энтальпия системы	Джоуль	Дж
Удельная энтальпия	Джоуль на килограмм	Дж/кг
Энтропия системы	Джоуль на градус	Дж/град
Удельная энтропия	Джоуль на килограмм на градус	Дж/(кг·град)
Теплоемкость системы	Джоуль на градус	Дж/град
Удельная теплоемкость	Джоуль на килограмм на градус	Дж/(кг·град)

Таблица II

## Приставки для образования кратных и дольных единиц

Наименование приставок	Обозначение	Отношение к основной единице	Наименование приставок	Обозначение	Отношение к основной единице
Дека	да	$10^1$	Деци	д	$10^{-1}$
Гекто	г	$10^2$	Санتي	с	$10^{-2}$
Кило	к	$10^3$	Милли	м	$10^{-3}$
Мега	М	$10^4$	Микро	мк	$10^{-6}$
Гига	Г	$10^5$	Нано	н	$10^{-9}$
Тера	Т	$10^6$	Пико	п	$10^{-12}$

Таблица III

## Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса $\mu$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Объем киломоля $\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	Газовая постоянная, Дж/(кг·град)
Воздух	–	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	<b>O<sub>2</sub></b>	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	<b>N<sub>2</sub></b>	28,026	1,251	2,40	296,8
Атмосферный азот <sup>1</sup>	<b>N<sub>2</sub></b>	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	<b>He</b>	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	<b>Ar</b>	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	<b>H<sub>2</sub></b>	2,016	0,090	22,43	4142,0
Окись углерода	<b>CO</b>	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	<b>CO<sub>2</sub></b>	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	<b>SO<sub>2</sub></b>	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	<b>CH<sub>4</sub></b>	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	<b>NH<sub>3</sub></b>	17,032	0,771	22,08	48836
Водяной пар <sup>2</sup>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

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

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

Теплоемкость кислорода<sup>1</sup>

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,963	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752
1800	37,945	29,630	34,834	26,519	1,0886	0,8286	1,5541	1,1832
1900	38,175	29,860	35,006	26,691	1,0940	0,8340	1,5617	1,1907
2000	38,406	30,091	35,169	26,854	1,0990	0,8390	1,5692	1,1978
2100	38,636	30,321	35,328	27,013	1,1041	0,8441	1,5759	1,2050
2200	39,858	30,543	35,483	27,168	1,1087	0,8491	1,5830	1,2121
2300	39,080	30,765	35,634	27,319	1,1137	0,8537	1,5897	1,2188
2400	39,293	30,978	35,785	27,470	1,1183	0,8583	1,5964	1,2255
2500	39,502	31,187	35,927	27,612	1,1229	0,8629	1,6027	1,2318
2600	39,708	31,393	36,069	27,754	1,1271	0,8675	1,6090	1,2380
2700	39,909	31,594	36,207	27,892	1,1313	0,8717	1,6153	1,2443

Примечание. <sup>1</sup> Значения объемных теплоемкостей в таблицах IV–XI относятся к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> его при нормальных условиях.

## Теплоемкость азота

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,684	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,557	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2200	36,603	28,278	33,658	25,343	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2300	36,703	28,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2400	36,765	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468

## Теплоемкость окиси углерода

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	30,752	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948
1600	36,040	27,725	33,051	24,736	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1700	36,203	27,888	33,231	24,916	1,1865	0,8893	1,4825	1,1116
1800	36,350	28,035	33,402	25,087	1,1924	0,8956	1,4901	1,1191
1900	36,480	28,165	33,561	25,246	1,1983	0,9014	1,4972	1,1262
2000	36,597	28,262	33,708	25,393	1,2033	0,9064	1,5039	1,1329
2100	36,706	28,391	33,850	25,535	1,2083	0,9115	1,5102	1,1392
2200	36,802	28,487	33,980	25,665	1,2129	0,9161	1,5160	1,1451
2300	36,894	28,579	34,106	25,791	1,2175	0,9207	1,5215	1,1505
2400	36,978	28,663	34,223	25,908	1,2217	0,9249	1,5269	1,1560
2500	37,053	28,738	34,336	26,021	1,2259	0,9291	1,5320	1,1610

## Теплоемкость водорода

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	28,716	20,302	28,716	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,981	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	30,288	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964
1600	33,762	25,447	30,832	22,517	15,294	11,169	1,3754	1,0044
1700	34,114	25,799	31,012	22,697	15,383	11,258	1,3833	1,0124
1800	34,445	26,130	31,192	22,877	15,472	11,347	1,3917	1,0207
1900	34,763	26,448	31,372	23,057	15,561	11,437	1,3996	1,0287
2000	35,056	26,741	31,548	23,233	15,649	11,524	1,4076	1,0366
2100	35,332	27,017	31,723	23,408	15,736	11,611	1,4151	1,0442
2200	35,605	27,290	31,891	23,576	15,819	11,694	1,4227	1,0517
2300	35,852	27,537	32,058	23,743	15,902	11,798	1,4302	1,0593
2400	36,090	27,775	32,222	23,907	15,983	11,858	1,4373	1,0664
2500	36,316	28,001	32,385	24,070	16,064	11,937	1,4449	1,0739
2600	36,530	28,215	32,540	24,225	16,141	12,016	1,4516	1,0806
2700	36,731	28,416	32,691	24,376	16,215	12,091	1,4583	1,0873

## Теплоемкость углекислого газа

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7873	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,800	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034
1800	60,269	51,954	53,004	45,289	1,2179	1,0291	2,3915	2,0205
1900	60,478	52,163	53,959	45,644	1,2259	1,0371	2,4074	2,0365
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	1,2334	1,0446	2,4221	2,0511
2100	60,801	52,486	54,596	46,281	1,2405	1,0517	2,4359	2,0649
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	1,2468	1,0580	2,4484	2,0775
2300	61,006	52,691	55,144	46,829	1,2531	1,0639	2,4602	2,0892
2400	61,060	52,745	55,391	47,076	1,2586	1,0697	2,4710	2,1001
2500	61,085	52,770	55,617	47,302	1,2636	1,0748	2,4811	2,1101

## Теплоемкость водяного пара

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2138
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	4,3907	1,9293	1,9213	1,5504
1900	52,377	44,062	43,539	35,224	2,4166	1,9552	1,9423	1,5713
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	2,4422	1,9804	1,9628	1,5918
2100	53,449	45,134	44,435	36,120	2,4664	2,0051	1,9824	1,6115
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	2,4895	2,0281	2,0009	1,6299
2300	54,370	46,055	45,255	36,940	2,5121	2,0503	2,0189	1,6479
2400	54,780	46,465	45,644	37,330	2,5334	2,0720	2,0365	1,6655
2500	55,161	46,846	46,017	37,702	2,5544	2,0926	2,0528	1,6818
2600	55,525	47,210	46,381	38,066	2,5745	2,1131	2,0691	1,6982
2700	55,864	47,549	47,729	38,414	2,5937	2,1323	2,0864	1,7137
2800	56,187	47,872	47,060	38,745	2,6121	2,1508	2,0997	1,7287
2900	56,488	48,173	47,378	39,063	2,6297	2,1683	2,1135	1,7425

## Теплоемкость сернистого газа

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	38,85	30,52	38,85	30,52	0,607	0,477	1,733	1,361
100	42,41	34,08	40,65	32,32	0,636	0,507	1,813	1,440
200	45,55	37,22	42,33	34,00	0,662	0,532	1,888	1,516
300	48,23	39,90	43,88	35,55	0,687	0,557	1,955	1,587
400	50,24	41,91	45,22	36,89	0,708	0,578	2,018	1,645
500	51,71	43,38	46,39	38,06	0,724	0,595	2,068	1,700
600	52,88	44,55	47,35	39,02	0,737	0,607	2,114	1,742
700	53,76	45,43	48,23	39,90	0,754	0,624	2,152	1,779
800	54,43	46,10	48,94	40,61	0,762	0,632	2,181	1,813
900	55,01	46,68	49,61	41,28	0,775	0,645	2,215	1,842
1000	55,43	47,10	50,16	41,83	0,783	0,653	2,236	1,867
1100	55,77	47,44	50,66	42,33	0,791	0,662	2,261	1,888
1200	56,06	47,73	51,08	42,75	0,795	0,666	2,278	1,905

## Теплоемкость воздуха

Температура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·град)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·град)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{mp}$	$c'_{vm}$
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2000	36,665	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2100	36,768	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2400	37,110	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8972	1,5303	1,1593

Плотность  $\rho$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$  некоторых газов,  
металлов и строительных материалов

Материалы	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·град)
Газы	–	0,006–0,60
В том числе:		
Воздух, 0–1000 °С при 100 кН/м <sup>2</sup>	1,293–0,276	0,023–0,074
углекислота, 0–600 °С при 100 кН/м <sup>2</sup>	1,978–0,618	0,014–0,06
метан, 0–600 °С при 100 кН/м <sup>2</sup>	0,717–0,224	0,030–0,14
Капельные жидкости		0,09–0,68
вода 0–100 °С		0,14–0,27
Металлы		
В том числе:		
алюминий при 20 °С	2670	200
чугун (3 % С) при 20 °С	7220	55
сталь (углеродистая при 100 °С)	7900	62
медь при 20 °С	8800	360–370
серебро при 20 °С	10500	400
Огнеупорные и строительные материалы		От 0,1 до 1,4
В том числе:		
карборундовые изделия	2300–2600	21 – 0,0105 $t_{cp}$
кирпич динасовый	1900–1950	1,58 + 0,00038 $t_{cp}$
кирпич шамотный	1800–1900	0,7 + 0,00064 $t_{cp}$
шлакобетон набивной при 20 °С	2200	0,7
кладка из красного кирпича при 20 °С	1600–1700	1,3
Теплоизоляционные материалы		
В том числе:		
асбест	340	0,157 + 0,00014 $t_{cp}$
зонолит (вермикулит)	150–250	0,0739 + 0,000286 $t_{cp}$
совелит	230–250	0,083 + 0,000104 $t_{cp}$
диатомит молотый	400–450	0,105 + 0,000233 $t_{cp}$
диатомитовый кирпич	500–600	0,158 + 0,00031 $t_{cp}$

Таблица XIII

Насыщенный водяной пар (по давлениям)<sup>1</sup>

$p$ , бар	$t$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$l'$ , кДж/кг	$l''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/ (кг·град)	$s''$ , кДж/ (кг·град)
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,11	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,15	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,40	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,50	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0,60	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,70	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,80	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,90	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
1,1	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
1,4	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081

Примечание. <sup>1</sup> Параметры даны в единицах системы СИ.

Параметры критического состояния  $t_{кр} = 374,15$  °C;  $p_{кр} = 221,29$  бар;  $v_{кр} = 0,00326$  м<sup>3</sup>/кг.

Продолжение таблицы XIII

$\rho$ , бар	$t$ , °C	$\nu'$ , м <sup>3</sup> /кг	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$l'$ , кДж/кг	$l''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/ (кг·град)	$s''$ , кДж/ (кг·град)
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
21,0	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
22,0	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
23,0	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
25,0	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
26,0	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
27,0	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
28,0	230,04	0,0012888	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
29,0	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
30,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186

Продолжение таблицы XIII

$\rho$ , бар	$t$ , °C	$\nu'$ , м <sup>3</sup> /кг	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$l'$ , кДж/кг	$l''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/ (кг·град)	$s''$ , кДж/ (кг·град)
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
34	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
36	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113
38	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
40	250,33	0,0012520	0,04972	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
48	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
130	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	0,00294	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

## Четырехзначные логарифмы

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Пропорциональные части								
											1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374	4	8	12	17	21	25	29	33	37
11	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755	4	8	11	15	19	23	26	30	34
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106	3	7	10	14	17	21	24	28	31
13	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430	3	6	10	13	16	19	23	26	29
14	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732	3	6	9	12	15	18	21	24	27
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014	3	6	8	11	14	17	20	22	25
16	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279	3	5	8	11	13	16	18	21	24
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529	2	5	7	10	12	15	17	20	22
18	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765	2	5	7	9	12	14	16	19	21
19	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989	2	4	7	9	11	13	16	18	20
20	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201	2	4	6	8	11	13	15	17	19
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404	2	4	6	8	11	12	14	16	18
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598	2	4	6	8	10	12	14	15	17
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784	2	4	6	7	9	11	13	15	17
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962	2	4	5	7	9	11	12	14	16
25	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133	2	3	5	7	9	10	12	14	15
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298	2	3	5	7	8	10	11	13	15
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456	2	3	5	6	8	9	11	13	14
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609	2	3	5	6	8	9	11	12	14
29	4624	4639	4664	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757	1	3	4	6	7	9	10	12	13
30	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900	1	3	4	6	7	9	10	11	13
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	1	3	4	6	7	8	10	11	12
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	1	3	4	5	7	8	9	11	12
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	1	3	4	5	6	8	9	10	12
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428	1	3	4	5	6	8	9	10	11
35	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551	1	2	4	5	6	7	9	10	11
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	1	2	4	5	6	7	8	10	11
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786	1	2	3	5	6	7	8	9	10
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899	1	2	3	5	6	7	8	9	10
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010	1	2	3	4	5	7	8	9	10
40	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117	1	2	3	4	5	6	8	9	10
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222	1	2	3	4	5	6	7	8	9
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325	1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425	1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618	1	2	3	4	5	6	7	8	9

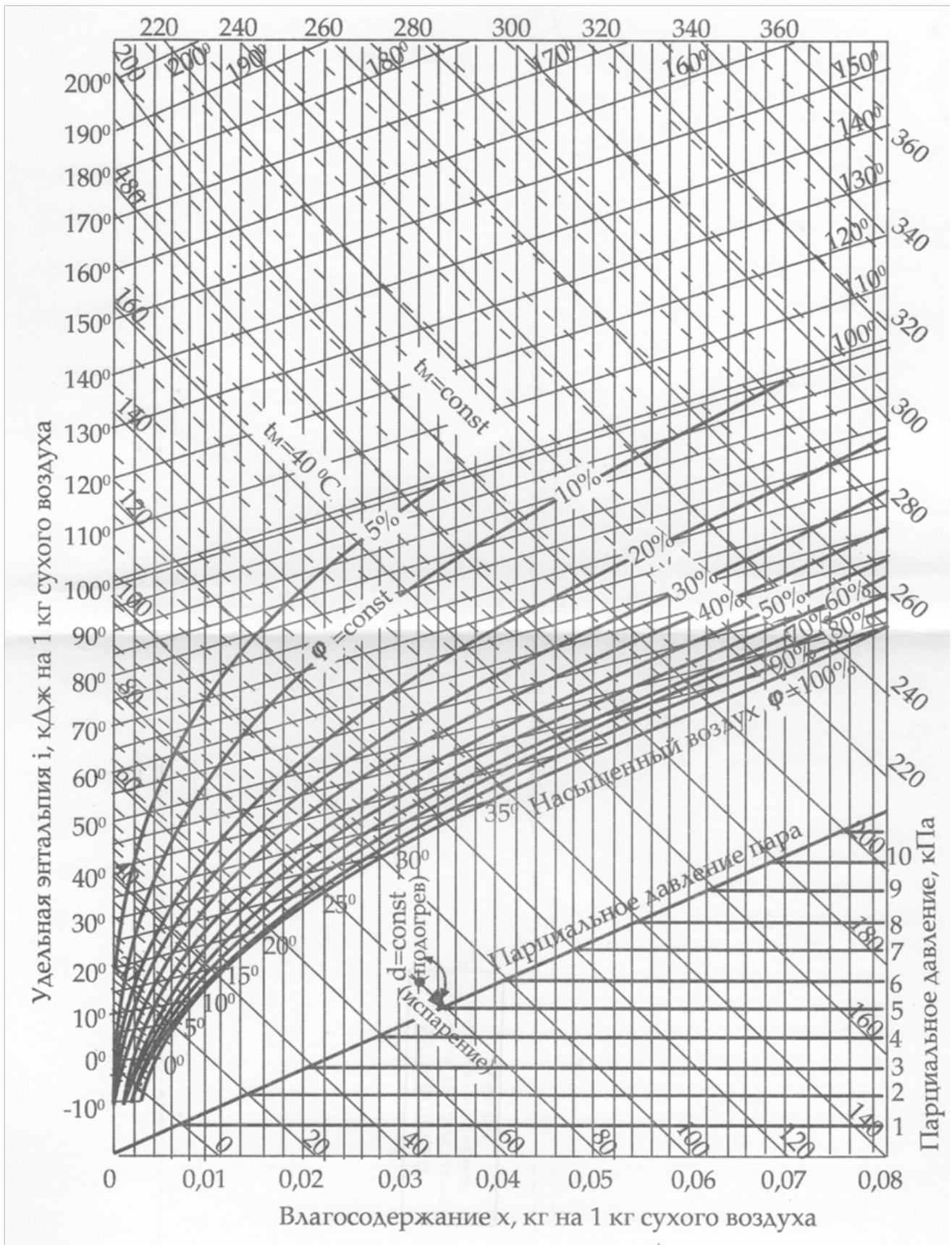
Продолжение таблицы XIV

46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712	1	2	3	4	5	6	7	7	8
47	6721	6730	6739	6749	6758	6776	6776	6785	6794	6803	1	2	3	4	5	5	6	7	8
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893	1	2	3	4	4	5	6	7	8
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981	1	2	3	4	4	5	6	7	8
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067	1	2	3	3	4	5	6	7	8
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1	2	3	3	4	5	6	7	8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1	2	2	3	4	5	6	7	7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1	2	2	3	4	5	6	6	7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1	2	2	3	4	5	6	6	7
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474	1	2	2	3	4	5	5	6	7
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	1	2	2	3	4	5	5	6	7
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	1	2	2	3	4	5	5	6	7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701	1	1	2	3	4	4	5	6	7
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	1	1	2	3	4	4	5	6	7
60	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846	1	1	2	3	4	4	5	6	6
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917	1	1	2	3	4	4	5	6	6
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	1	1	2	3	3	4	5	5	6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	1	1	2	3	3	4	5	5	6
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	1	1	2	3	3	4	5	5	6
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189	1	1	2	3	3	4	5	5	6
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	1	1	2	3	3	4	5	5	6
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	1	1	2	3	3	4	5	5	6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	1	1	2	3	3	4	4	5	6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	1	1	2	2	3	4	4	5	6
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506	1	1	2	2	3	4	4	5	6
71	8513	8579	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	1	1	2	2	3	4	4	5	5
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	1	1	2	2	3	4	4	5	5
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	1	1	2	2	3	4	4	5	5
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	1	1	2	2	3	4	4	5	5
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802	1	1	2	2	3	3	4	4	5
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	1	1	2	2	3	3	4	5	5
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	1	1	2	2	3	3	4	4	5
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	1	1	2	2	3	3	4	4	5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	1	1	2	2	3	3	4	4	5
80	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079	1	1	2	2	3	3	4	4	5
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133	1	1	2	2	3	3	4	4	5

Продолжение таблицы XIV

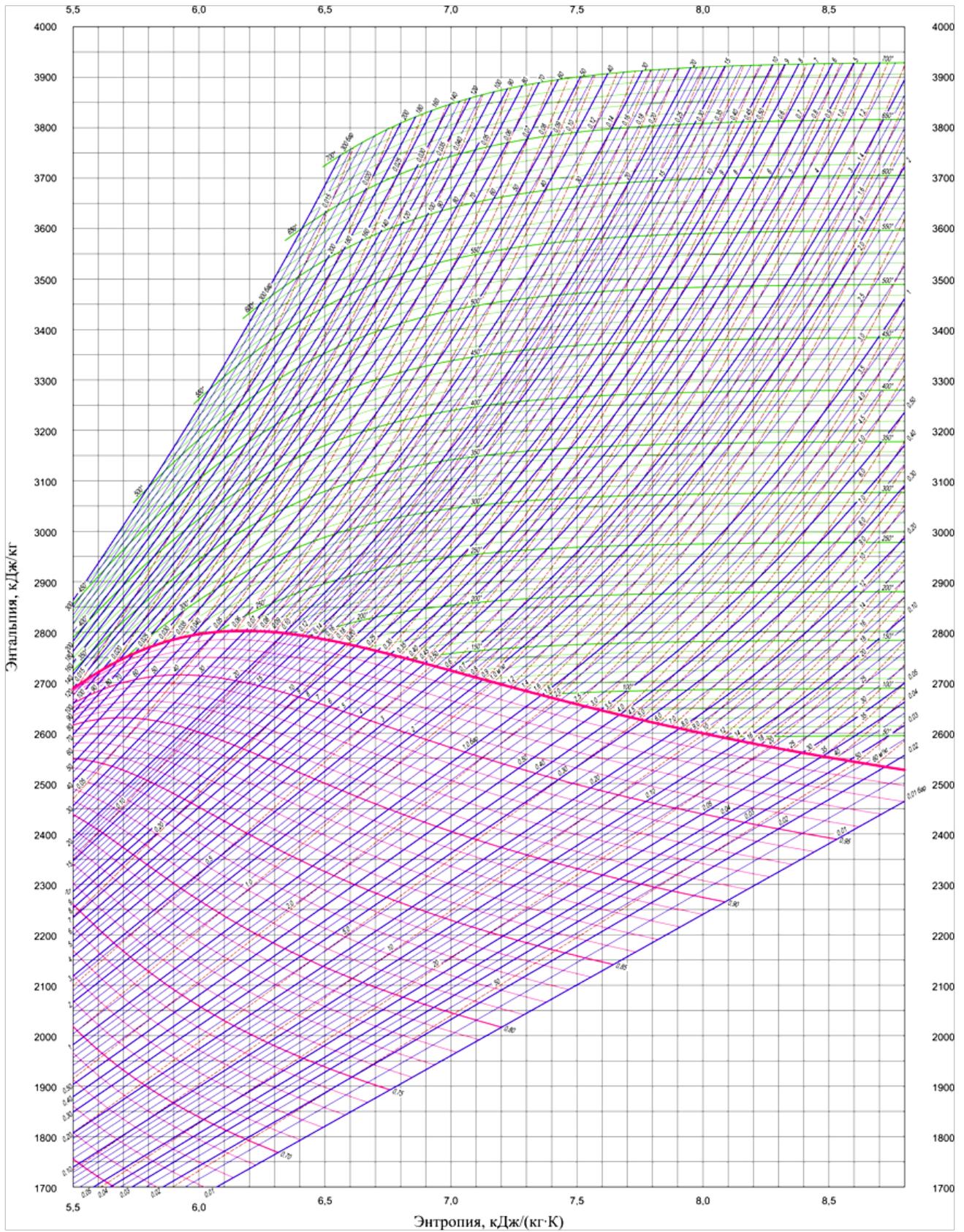
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1	1	2	2	3	3	4	4	5
83	9191	9196	9202	9205	9212	9217	9222	9227	9232	9238	1	1	2	2	3	3	4	4	5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289	1	1	2	2	3	3	4	4	5
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9235	9330	9335	9340	1	1	2	2	3	3	4	4	5
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	1	1	2	2	3	3	4	4	5
87	9305	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	0	1	0	2	2	3	3	4	4
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489	0	1	1	2	2	3	3	4	4
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	0	1	1	2	2	3	3	4	4
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586	0	1	1	2	2	3	3	4	4
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	0	1	1	2	2	3	3	4	4
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	0	1	1	2	2	3	3	4	4
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727	0	1	1	2	2	3	3	4	4
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	0	1	1	2	2	3	3	4	4
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818	0	1	1	2	2	3	3	4	4
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	0	1	1	2	2	3	3	4	4
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	0	1	1	2	2	3	3	4	4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	0	1	1	2	2	3	3	4	4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	0	1	1	2	2	3	3	3	4

**Приложение 2**  
**Диаграмма Рамзина  $i-x$  ( $d$ )**



## Приложение 2

### Диаграмма $i-s$ для водяного пара



*Учебное издание*

НОВОПАШИН Леонид Алексеевич  
ДЕНЕЖКО Любовь Васильевна  
СКОМОРОХОВ Владимир Александрович  
ПАНКОВ Юрий Владимирович  
САДОВ Артем Александрович

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ  
В ПРИМЕРАХ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебное пособие для аграрных вузов

Редактор и корректор            А. В. Ерофеева  
Дизайнер-верстальщик        Н. А. Предеина

Подписано в печать 01.08.2022. Формат 60×84/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times New Roman.  
Уч.-изд. л. 4,98. Усл. печ. л. 16,28. Тираж 500 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский государственный аграрный университет»  
620075, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42

Отпечатано в Универсальной Типографии «Альфа Принт»  
620049, Екатеринбург, пер. Автоматики, 2Ж  
Тел.: +7 (343) 222-00-34. Эл. почта: *mail@alfaprint24.ru*

Оригинал-макет подготовлен в федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Уральский государственный аграрный университет»  
620075, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42