

621.1  
P 12

*О.М.Рабиневич*

СБОРНИК  
ЗАДАЧ

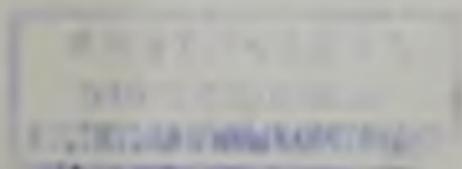
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ  
ТЕРМОДИНАМИКЕ

Проф. О. М. РАБИНОВИЧ

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

*Издание пятое, переработанное*

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для техникумов*



Москва  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1973



Р-12  
УДК 536 (076)

Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. М., «Машиностроение», 1973, 344 с.

Книга содержит задачи и упражнения по технической термодинамике.

Каждый раздел книги включает теоретическую часть, дающую определения основных понятий, основные формулы, пояснения к ним и задачи. Часть задач дана с подробными решениями, по всем остальным задачам приведены ответы.

Настоящее издание отличается от четвертого только тем, что все физические величины даны в системе единиц СИ и в единицах, допускаемых к применению наравне с единицами СИ.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся энергомашиностроительных техникумов. Она может быть также использована студентами вузов при изучении курсов технической термодинамики и общей теплотехники. Табл. 27, илл. 126, список лит. 9 назв.

Р  $\frac{332-015}{038 (01)-73}$  15-73

329021

© Издательство „Машиностроение“ 1973 г.



СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Редактор издательства В. В. Быстрицкая  
Технический редактор А. И. Захарова  
Корректор А. П. Озерова      Художник Е. В. Бекетов

Сдано в набор 20/VI 1973 г.      Подписано к печати 3/X 1973 г.      Т-15914  
Формат 84×108<sup>2</sup>/<sub>32</sub>.      Бумага № 3 и офсетная. Усл. печ. л. 18,9 (в т. ч. вкл. в 2 кр. 0,84).      Уч.-изд. л. 17,55.      Тираж 75 000 (1-й завод 1—35 000 экз.)  
Заказ 410.      Цена 86 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, 1-й Басманный пер., 3

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
193144. Ленинград, ул. Моисеенко, 10

## Глава I

### ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕЛА

Величины, характеризующие тело в данном состоянии, называют *параметрами* состояния. Чаще всего состояние тела определяется следующими параметрами: *удельным объемом, давлением и температурой*.

1. *Удельный объем* ( $v$ ) тела представляет собой объем единицы его массы. В технической термодинамике за единицу массы принимают килограмм (кг), за единицу объема — кубический метр ( $\text{м}^3$ ). Следовательно, удельный объем равен объему в кубических метрах одного килограмма вещества.

Если  $V$  — объем в  $\text{м}^3$ , занимаемый телом массой  $M$  в кг, то удельный объем

$$v = \frac{V}{M} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1)$$

Величина, обратная удельному объему

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{M}{V} \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (2)$$

представляет собой массу единицы объема и носит название *плотности*. Таким образом, удельный объем измеряют в  $\text{м}^3/\text{кг}$ , а ~~плотность~~  $\rho$  — в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Из уравнения (2) следует, что

$$v\rho = 1,$$

$$V = Mv = \frac{M}{\rho} \text{ м}^3 \text{ и } M = \rho V = \frac{V}{v} \text{ кг}.$$

2. *Давление*  $p$  в Международной системе единиц (СИ) измеряют в паскалях. Паскаль (Па) — давление, вызываемое силой 1 ньютон (Н) \*, равномерно распределенной

\* Ньютон — сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1  $\text{м}/\text{с}^2$  в направлении действия силы.

по нормальной к ней поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ . Таким образом, в единицах СИ паскаль измеряют в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ). Во всех термодинамических уравнениях пользуются этой единицей, поэтому в формулы следует подставлять числовые значения давления в паскалях.

Так как эта единица очень мала, ею пользуются только при измерении незначительных давлений. Для практи-

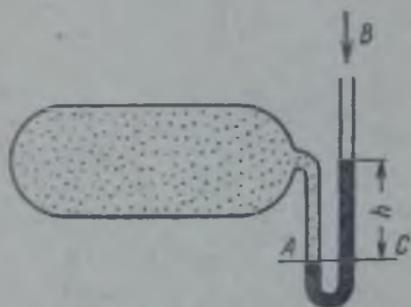


Рис. 1

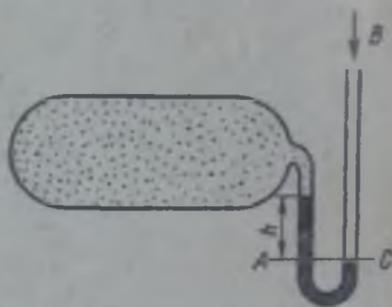


Рис. 2

ческих целей давление удобнее измерять в  $\text{кПа/м}^2$  (килопаскалях на квадратный метр) или в  $\text{МПа/м}^2$  (мегапаскалях на квадратный метр).

Следовательно,

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па} = 10^3 \text{ Н/м}^2; \quad 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} = 10^6 \text{ Н/м}^2.$$

Давление можно также измерять высотой столба жидкости (ртути, воды, спирта и др.), уравновешивающего давление газа (воздуха). На рис. 1 изображен сосуд с газом, к которому припаяна изогнутая трубка, наполненная какой-либо жидкостью. Если давление в сосуде больше атмосферного (барометрического), то жидкость в правом колене трубки поднимается; если же оно ниже, то жидкость поднимается в левом колене (рис. 2).

В Англии и США применяют две системы единиц -- Британскую абсолютную систему и Британскую инженерную систему.

В Британской абсолютной системе в качестве единицы массы принят 1 фунт массы (lbm), а единица силы является производной единицей и определяется как сила, которая сообщает массе в 1 фунт ускорение  $1 \text{ фут/с}^2$ . Эту единицу силы называют паундаль:

$$1 \text{ паундаль} = 1 \text{ фунт} \cdot \text{фут/с}^2 = 0,13825 \text{ Н}.$$

В Британской инженерной системе в качестве основной единицы принимают фунт силы (lb—force); единица же массы является производной единицей и определяется как масса, которая под действием силы в 1 фунт получает ускорение 1 фут/с<sup>2</sup>. Эту единицу массы называют *слаг*;

$$1 \text{ слаг} = 1 \text{ фунт} \cdot \text{с}^2 / \text{фут} = 14,5939 \text{ кг.}$$

Давление в Британской системе единиц измеряют в фунтах — силы на квадратный фут (lbf/ft<sup>2</sup>) или в фунтах — силы на квадратный дюйм (lbf/in<sup>2</sup>); удельный объем измеряют в кубических футах на фунт массы (ft<sup>3</sup>/lb).

В табл. 1 приводятся соотношения между единицами измерения давления технической системы и единицами системы СИ.

1. Соотношения между единицами давления

Единицы измерений	Па	бар	мм рт. ст.
Паскаль . . . . .	1	10 <sup>-5</sup>	7,5024 · 10 <sup>-3</sup>
Бар . . . . .	10 <sup>5</sup>	1	7,5024 · 10 <sup>2</sup>
Миллиметр ртутного столба . . . . .	133,322	1,33322 · 10 <sup>-3</sup>	1
» водяного » . . . . .	9,8067	9,8067 · 10 <sup>-5</sup>	7,35 · 10 <sup>-2</sup>
Килограмм-сила на квадратный сантиметр . . . . .	9,8067 · 10 <sup>4</sup>	0,98067	7,35 · 10 <sup>2</sup>
Фунт-сила на квадратный дюйм . . . . .	6,8948 · 10 <sup>3</sup>	6,8948 · 10 <sup>-2</sup>	52,2
Единицы измерений	мм вод. ст.	кгс/см <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>
Паскаль . . . . .	0,102	1,02 · 10 <sup>-6</sup>	1,45 · 10 <sup>-4</sup>
Бар . . . . .	1,02 · 10 <sup>4</sup>	1,02	14,5
Миллиметр ртутного столба . . . . .	13,6	1,36 · 10 <sup>-3</sup>	1,934 · 10 <sup>-2</sup>
» водяного » . . . . .	1	10 <sup>-4</sup>	1,422 · 10 <sup>-3</sup>
Килограмм-сила на квадратный сантиметр . . . . .	10 <sup>4</sup>	1	14,223
Фунт-сила на квадратный дюйм . . . . .	7,0307 · 10 <sup>2</sup>	7,0307 · 10 <sup>-3</sup>	1

Коэффициенты пересчета, приведенные в табл. 1, даны с большой точностью. В практических расчетах можно использовать их округленные значения.

Для измерения давления применяют *барометры*, *манометры* и *вакуумметры*. *Барометрами* измеряют атмосферное давление, *манометры* служат для измерения давления выше атмосферного. Их показания дают избыток давления измеряемой среды над атмосферным давлением — манометрическое ( $p_{\text{ман}}$ ) или избыточное ( $p_{\text{изб}}$ ) давление.

В термодинамике параметром состояния рабочего тела является только *абсолютное давление*.

Абсолютное давление определяют из соотношения

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B, \quad (3)$$

где  $B$  — атмосферное (барометрическое) давление.

*Вакуумметры* служат для измерения давления ниже атмосферного. По их показаниям судят, насколько давление рассматриваемой среды меньше атмосферного (вакуум, разрежение). Абсолютное давление в этом случае находят из равенства

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}}. \quad (4)$$

При измерении давления высотой ртутного столба следует иметь в виду, что показание прибора (барометра, ртутного манометра) зависит не только от давления измеряемой среды, но и от температуры ртути, так как с изменением последней изменяется также и плотность ртути. При температуре ртути выше  $0^{\circ}\text{C}$  плотность ее меньше, а следовательно, показания прибора выше, чем при том же давлении и при температуре ртути  $0^{\circ}\text{C}$ . При температуре ртути ниже  $0^{\circ}\text{C}$  будут иметь место обратные соотношения. Это следует иметь в виду при переводе давления, измеренного высотой ртутного столба, в другие единицы измерения давления. Проще всего это делается приведением высоты столба ртути к  $0^{\circ}\text{C}$  путем введения поправок на температуру ртути в приборе.

Величина поправки на 1000 мм рт. ст. для различных температур указана ниже.

Температура столба ртути в $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30
Поправка на 1000 мм	0,00	0,87	1,73	2,59	3,45	4,31	5,17

При температуре ртути выше  $0^{\circ}\text{C}$  указанную поправку нужно вычитать из показаний прибора; при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  данную поправку нужно прибавлять к показаниям прибора.

Приведение показаний ртутного барометра к  $0^\circ \text{C}$  также легко получить из следующего соотношения:

$$B_0 = B (1 - 0,000172t), \quad (5)$$

где  $B_0$  — барометрическое давление, приведенное к  $0^\circ \text{C}$ ;

$B$  — действительное давление при температуре воздуха  $t^\circ \text{C}$ ;

0,000172 — коэффициент объемного расширения ртути.

3. *Температура* характеризует степень нагретого тела. Ее измеряют или по *термодинамической температурной шкале*, или по *международной практической температурной шкале*. Единицей термодинамической температуры является кельвин (К), представляющий собой  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды. Эта температура равна  $273,16 \text{ K}$  и является единственной воспроизводимой опытным путем постоянной точкой термодинамической температурной шкалы (реперная точка).

Тройная точка воды — это температура, при которой все три фазы воды (твердая, жидкая, газообразная) находятся в равновесии. Нижним пределом шкалы является *абсолютный нуль*. Термодинамическую температурную шкалу называют также *абсолютной шкалой*. Параметром состояния рабочего тела является абсолютная температура, обозначаемая символом  $T$  и измеренная в кельвинах (К).

Термодинамическая температура может быть также выражена в градусах Цельсия ( $^\circ \text{C}$ ); она обозначается символом  $t$ . Температура таяния льда на  $0,01^\circ$  ниже температуры тройной точки воды. Поэтому температура в градусах Цельсия определяется выражением

$$t = T - T_0,$$

где  $T$  — абсолютная температура, выраженная в кельвинах;

$$T_0 = 273,15 \text{ K}.$$

Цена деления стоградусной шкалы Цельсия равна цене деления абсолютной шкалы Кельвина.

В Международной практической температурной шкале (установлена в 1968 г.) различают международную практическую температуру Кельвина ( $T_{98}$ ) и международную

практическую температуру Цельсия ( $t_{68}$ ). Единицами  $T_{68}$  и  $t_{68}$ , как и для термодинамической температуры  $T$  и температуры Цельсия  $t$  являются соответственно кельвин и градус Цельсия. Обычно индекс 68 опускается.

Для практических целей пользуются международной практической температурной шкалой, которая основана на значениях температур определенного числа постоянных и воспроизводимых опытным путем температурах.

В США и Англии для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. На этой шкале ( $^{\circ}\text{F}$ ) температура таяния льда и температура кипения воды обозначены соответственно через  $32^{\circ}$  и  $212^{\circ}$ . Для перевода показаний этой шкалы в  $^{\circ}\text{C}$  и обратно служат соотношения

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}); \quad (6)$$

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}. \quad (7)$$

### Задачи

1. Масса  $1 \text{ м}^3$  метана при определенных условиях составляет  $0,7 \text{ кг}$ .

Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

$$\text{Отв. } \rho = 0,7 \text{ кг/м}^3; \nu = 1,429 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Плотность воздуха при определенных условиях равна  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

$$\text{Отв. } \nu = 0,773 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. В сосуде объемом  $0,9 \text{ м}^3$  находится  $1,5 \text{ кг}$  окиси углерода.

Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

$$\text{Отв. } \nu = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho = 1,67 \text{ кг/м}^3.$$

4. Давление воздуха по ртутному барометру равно  $770 \text{ мм рт. ст.}$  при  $0^{\circ}\text{C}$ .

Выразить это давление в паскалях.

$$\text{Отв. } p = 102\,660 \text{ Па} = 102,7 \text{ кПа}.$$

5. Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, равно 765 мм рт. ст. при температуре ртути  $t = 20^\circ \text{C}$ . Выразить это давление в паскалях.

Отв.  $B = 101\ 640$  Па.

6. Определить абсолютное давление в сосуде (см. рис. 1), если показание присоединенного к нему ртутного манометра равно 66,7 кПа (500 мм рт. ст.), а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 100 кПа (750 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки приборов равна  $0^\circ \text{C}$ .

Отв.  $p_{\text{абс}} = 0,1667$  МПа.

7. Найти абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает  $p = 0,13$  МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $B = 680$  мм рт. ст. (90 660 Па) при  $t = 25^\circ \text{C}$ .

### Р е ш е н и е

По формуле (3)

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

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

$$\begin{aligned} B_0 &= 680 - \frac{4,31 \cdot 680}{1000} = 680 - 2,93 = \\ &= 677,1 \text{ мм рт. ст.} = 90\ 270 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Тот же результат будем иметь, если воспользуемся уравнением (5):

$$B_0 = B (1 - 0,000172t) = 90\ 660 \cdot 0,9957 = 90\ 270 \text{ Па.}$$

Тогда абсолютное давление пара в котле

$$p_{\text{абс}} = 0,13 + 0,09 = 0,22 \text{ МПа.}$$

8. Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает 0,245 МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет  $B = 93\ 325$  Па (700 мм рт. ст.) при  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Отв.  $p = 0,338$  МПа.

9. Давление в паровом котле  $p = 0,04$  МПа при барометрическом давлении  $B_0 = 96\ 660$  Па (725 мм рт. ст.).

Чему будет равно избыточное давление в котле, если показание барометра повысится до  $B_{02} = 104\,660$  Па (785 мм рт. ст.), а состояние пара в котле останется прежним?

Барометрическое давление приведено к  $0^\circ\text{C}$ .

### Решение

Абсолютное давление в котле

$$P_{\text{абс}} = 40\,000 + 96\,660 = 136\,660 \text{ Па.}$$

Избыточное давление при показании барометра  $B_{02} = 104\,660$  Па. Следовательно,

$$p_{\text{изб}} = 136\,660 - 104\,660 = 0,032 \text{ МПа.}$$

10. Какая высота водяного столба соответствует 10 Па?

Отв.  $h = 1$  мм.

11. Какая высота ртутного столба соответствует 100 кПа?

Отв.  $h \approx 750$  мм.

12. Определить абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра равно 94 кПа (705 мм рт. ст.), а показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ\text{C}$ ,  $B_0 = 99,6$  кПа (747 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки приборов  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Отв.  $p = 60$  кПа.

13. Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой (рис. 3). Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Длина столба воды, отсчитанная по шкале,  $l = 160$  мм.

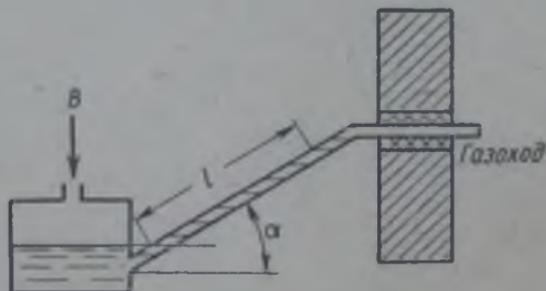


Рис. 3

Определить абсолютное давление газов, если показание ртутного барометра, приведенное к  $0^\circ \text{C}$ ,  $B_0 = 98,7$  кПа (740 мм рт. ст.).

Отв.  $p = 97,9$  кПа (734,1 мм рт. ст.).

14. Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду (см. рис. 2), показывает разрежение  $p = 56$  кПа (420 мм рт. ст.) при температуре ртути в вакуумметре  $t = 20^\circ \text{C}$ . Давление атмосферы по ртутному барометру  $B = 102,4$  кПа (768 мм рт. ст.) при температуре ртути  $t = 18^\circ \text{C}$ .

Определить абсолютное давление в сосуде.

### Р е ш е н и е

На основании формулы (5) получаем, что разрежение в сосуде, приведенное к  $0^\circ \text{C}$ ;

$$\begin{aligned} p_0 &= 56 (1 - 0,000172 \cdot 20) = 56 \cdot 0,99656 = \\ &= 55,8 \text{ кПа (418,5 мм рт. ст.),} \end{aligned}$$

а барометрическое давление, приведенное к  $0^\circ \text{C}$ ,

$$\begin{aligned} B_0 &= 102,4 (1 - 0,000172 \cdot 18) = 102,4 \cdot 0,9969 = \\ &= 102,1 \text{ кПа (765,6 мм рт. ст.).} \end{aligned}$$

Абсолютное давление в сосуде по формуле (4)

$$p = 102,1 - 55,8 = 46,3 \text{ кПа.}$$

15. На высоте  $H = 2000$  м над уровнем моря давление воздуха  $p_1 = 79$  кПа, на высоте 5000 м давление  $p_2 = 54$  кПа и на высоте 10 000 м давление  $p_3 = 29$  кПа.

По этим данным, а также принимая, что на уровне моря давление воздуха  $p_0 = 101,3$  кПа, составить приближенное интерполяционное уравнение вида

$$p = a + bH + cH^2 + dH^3,$$

дающее зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря.

### Р е ш е н и е

Составление интерполяционного уравнения вида

$$p = a + bH + cH^2 + dH^3$$

сводится к определению постоянных  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , которые могут быть найдены на основании заданных четырех точек. Для этого составляем четыре уравнения:

$$\begin{aligned} \text{для } H = 0 & \quad 101,3 = a; \\ \text{для } H = 2 \text{ км} & \quad 79 = a + 2b + 4c + 8d; \\ \text{для } H = 5 \text{ км} & \quad 54 = a + 5b + 25c + 125d; \\ \text{для } H = 10 \text{ км} & \quad 29 = a + 10b + 100c + 1000d. \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений, получаем

$$a = 101,3; \quad b = -12,43; \quad c = 0,67; \quad d = -0,0147.$$

Следовательно, приближенное уравнение, выражающее зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря, найденное на основании четырех заданных точек, имеет следующий вид:

$$p = 101,3 - 12,43H + 0,67H^2 - 0,0147H^3.$$

Значения  $H$  в данном уравнении выражены в км.

16. Пользуясь формулой, полученной в предыдущей задаче, определить давление воздуха на высоте 7000 м над уровнем моря

$$\text{Отв. } p = 42 \text{ кПа.}$$

17. Для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное действие на человеческий организм, обычно при пользовании ртутными манометрами над уровнем ртути наливают слой воды.

Определить абсолютное давление в сосуде, если разность столбов ртути в U-образном манометре составляет 580 мм при температуре ртути  $25^\circ \text{C}$ , а высота столба воды над ртутью равна 150 мм. Атмосферное давление по ртутному барометру  $B = 102,7$  кПа при  $t = 25^\circ \text{C}$ .

$$\text{Отв. } p = 0,18 \text{ МПа.}$$

18. В трубке вакуумметра высота столба ртути составляет 570 мм при температуре ртути  $20^\circ \text{C}$ . Над ртутью находится столб воды высотой 37 мм. Барометрическое давление воздуха 97,1 кПа при  $15^\circ \text{C}$ .

Найти абсолютное давление в сосуде.

$$\text{Отв. } p = 20,7 \text{ кПа.}$$

19. На рис. 4 показана схема измерения расхода жидкостей и газов при помощи дроссельных диафрагм. Вследствие мятня (дросселирования) жидкости при прохожде-

нии через диафрагму 1 давление ее за диафрагмой всегда меньше, чем перед ней. По разности давлений (перепаду) перед и за диафрагмой, измеряемой дифференциальным U-образным манометром 2, можно определить массовый расход жидкости по формуле

$$M = \alpha f \sqrt{2(\rho_1 - \rho_2) \rho},$$

где  $\alpha$  — коэффициент расхода, определяемый экспериментальным путем;

$f$  — площадь входного отверстия диафрагмы в  $\text{м}^2$ ;

$\rho_1 - \rho_2$  — перепад давления на диафрагме в Па;

$\rho$  — плотность жидкости, протекающей по трубе в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Определить массовый расход воды, измеряемый дроссельным устройством (рис. 4), если  $\alpha = 0,8$ ; показание дифференциального манометра  $p = 4,53$  кПа (34 мм рт. ст.),  $\rho = 1000$   $\text{кг}/\text{м}^3$ , а диаметр входного отверстия диафрагмы  $d = 10$  мм.

Отв.  $M = 1,89$  кг/с.

20. Присоединенный к газоходу парового котла тягомер показывает разрежение, равное 780 Па (80 мм вод. ст.).

Определить абсолютное давление дымовых газов, если показание барометра  $B = 102\,658$  Па (770 мм рт. ст.) при  $t = 0^\circ \text{C}$ .

Отв.  $p = 101\,870$  Па (764,1 мм рт. ст.).

21. Тягомер показывает разрежение в газоходе, равное 412 Па (42 мм вод. ст.). Атмосферное давление по ртутному барометру  $B = 100\,925$  Па (757 мм рт. ст.) при  $t = 15^\circ \text{C}$ .

Определить абсолютное давление дымовых газов.

Отв.  $p = 100\,250$  Па  
(751,96 мм рт. ст.).

22. Найти абсолютное давление в газоходе котельного агрегата при помощи тягомера с наклонной трубкой, изображенного на рис. 3. Жидкость, используемая в тягомере, — спирт с плотностью  $\rho = 800$   $\text{кг}/\text{м}^3$ . Отсчет ведут

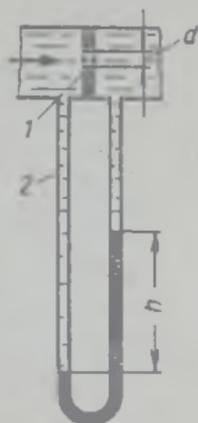


Рис. 4

по наклонной шкале  $l = 200$  мм. Угол наклона трубки  $\alpha = 30^\circ$ . Барометрическое давление  $B_0 = 99\,325$  Па (745 мм рт. ст.) приведено к  $0^\circ$  С.

*Отв.*  $p = 98\,525$  Па (739 мм рт. ст.).

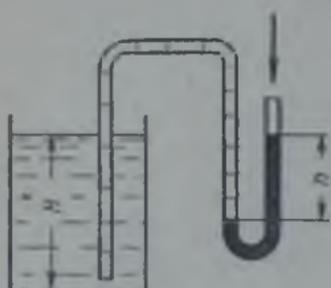


Рис. 5

23. Для измерения уровня жидкости в сосуде иногда используется устройство, схема которого изображена на рис. 5.

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

*Отв.*  $H = 3,56$  м.

24. В газгольдер объемом  $V = 200$  м<sup>3</sup> подается газ по трубопроводу диаметром  $d = 0,1$  м со скоростью  $3$  м/с. Удельный объем газа  $v = 0,4$  м<sup>3</sup>/кг.

За какое время наполнится газгольдер, если плотность газа, заполнившего газгольдер, равна  $1,3$  кг/м<sup>3</sup>?

*Отв.* 4407 с.

25. Перевести давление  $p = 15$  МПа в lb/in<sup>2</sup>.

*Отв.*  $p = 2175$  lb/in<sup>2</sup>.

26. Давление в сосуде равно 200 кПа. Выразить это давление в lb/in<sup>2</sup>.

*Отв.*  $p = 290$  lb/in<sup>2</sup>.

27. Какая единица больше и во сколько раз; lb/in<sup>2</sup> или мм вод. ст.?

*Отв.* 1 lb/in<sup>2</sup> больше 1 мм вод. ст. в 703 раза.

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

*Отв.*  $t = 510^\circ$  С.

29. Какая температура в градусах Фаренгейта соответствует абсолютному нулю?

*Отв.*  $t = -459^\circ$  F.

30. Скольким градусам шкалы Цельсия соответствуют температуры  $100^\circ$  и  $-4^\circ$  F и скольким градусам шкалы Фаренгейта соответствуют температуры  $600^\circ$  и  $-5^\circ$  C?

$$\begin{aligned} \text{Отв. } 100^\circ \text{ F} &= 37,8^\circ \text{ C}; \quad -4^\circ \text{ F} = \\ &= -20^\circ \text{ C}; \quad 600^\circ \text{ C} = 1112^\circ \text{ F}; \quad -5^\circ \text{ C} = \\ &= +23^\circ \text{ F}. \end{aligned}$$

31. Водяной пар перегрет на  $45^\circ$  C. Чему соответствует этот перегрев по термометру Фаренгейта?

### Р е ш е н и е

При переводе разности температур, выраженной градусами шкалы Цельсия, в градусы Фаренгейта и наоборот надо исходить только из цены деления того и другого термометров. Поэтому формулы (6) и (7) принимают следующий вид;

$$\Delta t^\circ \text{ C} = \frac{5}{9} \Delta t^\circ \text{ F}; \quad \Delta t^\circ \text{ F} = \frac{9}{5} \Delta t^\circ \text{ C}.$$

Следовательно, для нашего случая

$$\Delta t^\circ \text{ F} = \frac{9}{5} \Delta t^\circ \text{ C} = \frac{9}{5} 45 = 81^\circ \text{ F}.$$

32. Температура пара после прохождения его через пароперегреватель котельного агрегата увеличилась на  $450^\circ$  F.

Чему равно увеличение температуры пара, выраженное в  $^\circ\text{C}$ ?

$$\text{Отв. } \Delta t = 250^\circ \text{ C}.$$

33. Котельные агрегаты сверхвысоких параметров, сконструированные и изготовленные советскими котлостроительными заводами, предназначены для производства водяного пара, имеющего давление  $p = 25$  МПа и температуру  $t = 550^\circ$  C.

Перевести давление в  $\text{lb/in}^2$ , а температуру — в  $^\circ\text{F}$ .

$$\text{Отв. } p = 3625 \text{ lb/in}^2, \quad t = 1049^\circ \text{ F}.$$

## Глава II

### ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Под *идеальным газом* понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул исчезающе мал по сравнению с объемом междумолекулярного пространства. Таким образом, молекулы идеального газа принимают за материальные точки. В действительно существующих газах при высоких температурах и малых давлениях можно пренебречь силами притяжения и объемом самих молекул. Поэтому такие газы можно также считать идеальными.

В тех газах, которые находятся в состояниях, достаточно близких к сжижению, нельзя пренебречь силами притяжения между молекулами и объемом последних. Такие газы нельзя отнести к идеальным, и их называют *реальными газами*.

Основное уравнение кинетической теории газов имеет вид

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\omega^2}{2}, \quad (8)$$

где  $p$  — давление идеального газа;

$n$  — число молекул в  $1 \text{ м}^3$  газа (концентрация молекул);

$m$  — масса одной молекулы;

$\omega$  — так называемая *средняя квадратичная скорость* поступательного движения молекул;

$\frac{m\omega^2}{2}$  — средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы.

Таким образом, основное уравнение кинетической теории газов устанавливает связь между давлением газа, средней кинетической энергией поступательного движения молекул и их концентрацией.

Основные элементы кинетической теории материи были разработаны М. В. Ломоносовым и блестяще им приме-

нены в целом ряде химических и физических исследований, связанных с тепловыми явлениями.

Основные зависимости, характеризующие соотношение между параметрами идеального газа при некоторых вполне определенных условиях изменения его состояния, легко получаются из основного уравнения кинетической теории газов. До этого они были получены экспериментальным путем.

Так, если температура газа не изменяется ( $T = \text{const}$ ), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью (закон Бойля—Мариотта);

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

Если давление газа остается постоянным ( $p = \text{const}$ ), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой подчиняется закону Гей-Люссака:

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

или

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

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

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

где  $\mu$  — молекулярная масса газа.

Так как

$$\rho = \frac{1}{v},$$

то

$$\mu v = \text{const}. \quad (13)$$

Величина  $\mu v$  представляет собой объем килограмм-молекулы или киломоля (кмоль) газа.

Так как в  $1 \text{ м}^3$  газа могут содержаться, в зависимости от параметров его состояния, разные количества газа, принято относить  $1 \text{ м}^3$  газа к так называемым *нормальным условиям*, при которых рабочее вещество находится под давлением  $p = 101\,325 \text{ Па}$  и  $T = 273,15 \text{ К}$  (760 мм рт. ст. и  $0^\circ \text{ С}$ ).

329021

БИБЛИОТЕКА  
Павлодарского  
ПРОМЫШЛЕННОГО ИНСТИТУТА

Объем 1 кмоль всех идеальных газов равен  $22,4136 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  при нормальных условиях.

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} \text{ кг/м}^3. \quad (14)$$

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

$$v_n = \frac{22,4}{\mu} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (15)$$

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

$$pV = MRT; \quad (16)$$

$$pv = RT; \quad (17)$$

$$pV_\mu = \mu RT, \quad (18)$$

где  $p$  — давление газа в Па;

$V$  — объем газа в  $\text{м}^3$ ;

$M$  — масса газа в кг;

$v$  — удельный объем газа в  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$V_\mu$  — объем 1 кмоль газа в  $\text{м}^3/\text{кмоль}$ ;

$R$  — газовая постоянная для 1 кг газа в  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\mu R$  — универсальная газовая постоянная 1 кмоль газа в  $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным массам газа: первое — к Мкг; второе — к 1 кг, третье — 1 кмолью газа.

Численное значение универсальной газовой постоянной легко получить из уравнения (18) при подстановке значений входящих в него величин при нормальных условиях:

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

Газовую постоянную, отнесенную к 1 кг газа, определяют из уравнения

$$R = \frac{8314}{\mu} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (19)$$

где  $\mu$  — масса 1 кмоль газа в кг (численно равная молекулярной массе газа).

В табл. IV (см. приложения) даны молекулярные массы, плотности, объемы кмолей и газовые постоянные важнейших для техники газов.

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

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}; \quad (20)$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (21)$$

Уравнение (21) часто применяют для «приведения объема к нормальным условиям», т. е. для определения объема, занимаемого газом, при  $p = 101\,325$  Па и  $T = 273,15$  К ( $p = 760$  мм рт. ст. и  $t = 0^\circ$  С), если объем его при каких-либо значениях  $p$  и  $t$  известен. Для этого случая уравнение (21) обычно представляют в виде

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_n V_n}{T_n}. \quad (22)$$

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

Уравнение (20) можно переписать следующим образом:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2},$$

следовательно,

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}. \quad (23)$$

Уравнение (23) позволяет найти плотность газа при любых условиях, если значение его для определенных условий известно.

### Задачи

34. Определить плотность окиси углерода (CO) при  $p = 0,1$  МПа и  $t = 15^\circ$  С.

Отв.  $\rho = 1,169$  кг/м<sup>3</sup>.

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

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

36. Определить удельный объем кислорода при давлении  $p = 2,3$  МПа и температуре  $t = 280^\circ \text{C}$ .

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

37. Плотность воздуха при нормальных условиях  $\rho_n = 1,293 \text{ кг/м}^3$ .

Чему равна плотность воздуха при давлении  $p = 1,5$  МПа и температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ .

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

38. Определить массу углекислого газа в сосуде с объемом  $V = 4 \text{ м}^3$  при  $t = 80^\circ \text{C}$ . Давление газа по манометру равно  $0,04$  МПа. Барометрическое давление  $B = 103\,990$  Па.

$$\text{Отв. } M = 8,6 \text{ кг}.$$

39. В цилиндре с подвижным поршнем находится  $0,8 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,5$  МПа. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до  $0,8$  МПа температура воздуха не изменилась?

$$\text{Отв. } V = 0,5 \text{ м}^3.$$

40. Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с  $1200$  до  $250^\circ \text{C}$ .

Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаково?

$$\text{Отв. } V = 2,82 \text{ раза}.$$

41. Во сколько раз объем определенной массы газа при  $-20^\circ \text{C}$  меньше, чем при  $+20^\circ \text{C}$ , если давление в обоих случаях одинаковое?

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

$$\frac{v}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

следовательно,

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

42. Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра уменьшится от  $p_1 = 1,8$  МПа до  $p_2 = 0,3$  МПа?

Барометрическое давление принять равным 0,1 МПа.

$$\text{Отв. } \rho_2 = \frac{1}{6} \rho_1.$$

43. В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором 130 000 м<sup>3</sup>/ч воздуха при температуре 30° С.

Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если он нагревается до 400° С при постоянном давлении.

$$\text{Отв. } V = 288\,700 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

44. Найти газовую постоянную для кислорода, водорода и метана (СН<sub>4</sub>).

$$\text{Отв. } R_{O_2} = 259,8; R_{H_2} = 4124; \\ R_{CH_4} = 518,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

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

#### Р е ш е н и е

Из характеристического уравнения для 1 кг газа имеем

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

46. Определить массу кислорода, содержащегося в баллоне емкостью 60 л, если давление кислорода по манометру равно 1,08 МПа, а показание ртутного барометра — 99 325 Па при температуре 25° С.

$$\text{Отв. } M = 0,91 \text{ кг}.$$

47. В сосуде находится воздух под разрежением 10 кПа при температуре 0° С. Ртутный барометр показывает 99 725 Па при температуре ртути 20° С.

Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

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

48. Какой объем будут занимать 11 кг воздуха при давлении  $p = 0,44$  МПа и температуре  $t = 18^\circ \text{С}$ ?

$$\text{Отв. } V = 2,088 \text{ м}^3.$$

49. Найти массу 5 м<sup>3</sup> водорода, 5 м<sup>3</sup> кислорода и 5 м<sup>3</sup> углекислоты при давлении 0,6 МПа и температуре 100° С.

## Р е ш е н и е

Воспользуемся характеристическим уравнением для произвольного количества газа

$$pV = MRT.$$

Следовательно,

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 5}{R \cdot 373} = \frac{8042,8}{R}.$$

Значения газовых постоянных берем из табл. IV (см. приложения):

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

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

Тогда

$$M_{H_2} = \frac{8042,8}{24124} = 1,95 \text{ кг};$$

$$M_{O_2} = \frac{8042,8}{259,8} = 30,9 \text{ кг};$$

$$M_{CO_2} = \frac{8042,8}{188,9} = 42,6 \text{ кг}.$$

50. В цилиндре диаметром 0,6 м содержится 0,41 м<sup>3</sup> воздуха при  $p = 0,25$  МПа и  $t_1 = 35^\circ \text{C}$ .

До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 0,4 м?

$$\text{Отв. } t_2 = 117,6^\circ \text{C}.$$

51. В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр  $d = 0,6$  м и высоту  $h = 2,4$  м, находится воздух при температуре  $18^\circ \text{C}$ . Давление воздуха составляет 0,765 МПа. Барометрическое давление (приведенное к нулю) равно 101 858 Па.

Определить массу воздуха в сосуде.

$$\text{Отв. } M = 7,04 \text{ кг}.$$

52. Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при  $15^\circ \text{C}$ . После израсходования части кислорода давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до  $10^\circ \text{C}$ .

Определить массу израсходованного кислорода.

## Р е ш е н и е

Из характеристического уравнения

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

Следовательно, до расходования кислорода масса его составляла

$$M_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг},$$

а после израсходования

$$M_2 = \frac{7,5 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг}.$$

Таким образом, расход кислорода

$$2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг}.$$

53. В сосуде объемом  $0,5 \text{ м}^3$  находится воздух при давлении  $0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $20^\circ \text{С}$ .

Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило  $56 \text{ кПа}$  при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно  $102,4 \text{ кПа}$  при температуре ртути в нем, равной  $18^\circ \text{С}$ ; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути  $20^\circ \text{С}$ .

$$\text{Отв. } M = 1,527 \text{ кг}.$$

54. Резервуар объемом  $4 \text{ м}^3$  заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа  $p = 40 \text{ кПа}$ , температура его  $t = 80^\circ \text{С}$ , а барометрическое давление воздуха  $B = 102,4 \text{ кПа}$ .

$$\text{Отв. } M = 8,64 \text{ кг}; G = 84,8 \text{ Н}.$$

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

$$\text{Отв. } \rho_{\text{н}} = 0,804 \text{ кг/м}^3; v = 1,243 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

56. Какой объем занимают  $10 \text{ кмоль}$  азота при нормальных условиях?

$$\text{Отв. } 224 \text{ м}^3.$$

57. Какой объем займет 1 кмоль газа при  $p = 2$  МПа и  $t = 200^\circ \text{C}$ ?

Отв.  $1,97 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .

58. При какой температуре 1 кмоль газа занимает объем  $V = 4 \text{ м}^3$ , если давление газа  $p = 1$  кПа?

Отв.  $t = 198^\circ \text{C}$ .

59. Сосуд емкостью  $V = 10 \text{ м}^3$  заполнен 25 кг углекислоты. Определить абсолютное давление в сосуде, если температура в нем  $t = 27^\circ \text{C}$ .

### Р е ш е н и е

Из характеристического уравнения имеем

$$p = \frac{MRT}{V} = \frac{25 \cdot 8314 \cdot 300}{44 \cdot 10} = 141\,700 \text{ Па} = 141,7 \text{ кПа}.$$

60. При какой температуре плотность азота при давлении 1,5 МПа будет равна  $3 \text{ кг/м}^3$ ?

Отв.  $t = 1422^\circ \text{C}$ .

61. Какова будет плотность окиси углерода при  $t = 20^\circ \text{C}$  и  $p = 94,7$  кПа, если при  $0^\circ \text{C}$  и  $101,3$  кПа она равна  $1,251 \text{ кг/м}^3$ ?

### Р е ш е н и е

Согласно уравнению (23)

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно,

$$\rho_2 = 1,251 \frac{94,7}{101,3} \cdot \frac{273}{273 + 20} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

62. Какова будет плотность кислорода при  $0^\circ \text{C}$  и давлении 80 кПа, если при  $101,3$  кПа и  $15^\circ \text{C}$  она равна  $1,310 \text{ кг/м}^3$ ?

Отв.  $\rho = 1,09 \text{ кг/м}^3$ .

63. Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает резервуар при  $10^\circ \text{C}$ , чем при  $50^\circ \text{C}$ , если давление остается неизменным?

Отв. В 1,14 раза.

64. Баллон емкостью  $0,9 \text{ м}^3$  заполнен воздухом при температуре  $17^\circ \text{С}$ . Присоединенный к нему вакуумметр показывает разрежение  $80 \text{ кПа}$ .

Определить массу воздуха в баллоне, если показание барометра равно  $98,7 \text{ кПа}$ .

$$\text{Отв. } M = 0,2018 \text{ кг.}$$

65. Масса пустого баллона для кислорода емкостью  $0,05 \text{ м}^3$  равна  $80 \text{ кг}$ .

Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре  $t = 20^\circ \text{С}$  до давления  $10 \text{ МПа}$ .

$$\text{Отв. } M = 86,57 \text{ кг.}$$

66. Для автогенной сварки использован баллон кислорода емкостью  $100 \text{ л}$ .

Найти массу кислорода, если его давление  $p = 12 \text{ МПа}$  и температура  $t = 16^\circ \text{С}$ .

$$\text{Отв. } M = 16 \text{ кг.}$$

67. Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если объем его на поверхности земли равен  $1 \text{ м}^3$  при давлении  $p = 100 \text{ кПа}$  и температуре  $t = 15^\circ \text{С}$ .

### Р е ш е н и е

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

$$G = G_{\text{возд}} - G_{\text{H}_2} = M_{\text{возд}}g - M_{\text{H}_2}g = gV(\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}),$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Значения плотностей воздуха и водорода могут быть определены из уравнения состояния

$$pv = RT,$$

откуда

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{p}{RT}.$$

Значения газовых постоянных могут быть легко вычислены или взяты из табл. IV (см. приложения);

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

Так как давление водорода и воздуха равно 0,1 МПа, то

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{0,1 \cdot 10^6}{287 \cdot 288} = 1,210 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{H}_2} = \frac{0,1 \cdot 10^6}{4124 \cdot 288} = 0,084 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно, подъемная сила шара

$$\begin{aligned} \Delta G &= gV (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}) = \\ &= 9,81 \cdot 1 (1,210 - 0,084) = 11,1 \text{ Н.} \end{aligned}$$

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

Насколько уменьшится подъемная сила аэростата при заполнении его гелием? Чему равен объем аэростата  $V_2$  на поверхности земли при давлении  $p = 98,1$  кПа и температуре  $t = 30^\circ \text{C}$ ?

*Отв.*  $V_1 = 7311 \text{ м}^3$ ;  $\Delta G = -177 \text{ Н}$ ;  
 $V_2 = 3738 \text{ м}^3$ .

69. Газохранилище объемом  $V = 100 \text{ м}^3$  наполнено газом коксовых печей (рис. 6).

Определить массу газа в газохранилище, если  $t = 20^\circ \text{C}$ ,  $B = 100$  кПа, а показание манометра, установленного на газохранилище,  $p = 133,3$  кПа. Газовую постоянную коксового газа принять равной 721 Дж/(кг·К).

*Отв.*  $M = 47,6 \text{ кг}$ .

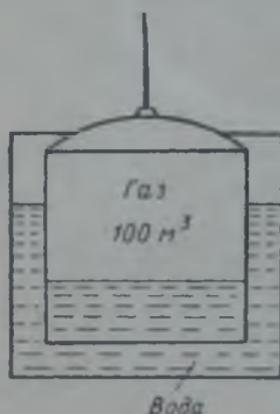


Рис. 6

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

Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа? Начальное давление  $p_1 = 4,8$  МПа.

*Отв.* Да.

71. Сосуд емкостью  $4,2 \text{ м}^3$  наполнен  $15 \text{ кг}$  окиси углерода.

Определить давление в сосуде, если температура газа в нем  $t = 27^\circ \text{С}$ .

*Отв.*  $p = 0,318 \text{ МПа}$ .

72. Воздух, заключенный в баллон емкостью  $0,9 \text{ м}^3$ , выпускают в атмосферу. Температура его вначале равна  $27^\circ \text{С}$ .

Найти массу выпущенного воздуха, если начальное давление в баллоне составляло  $9,32 \text{ МПа}$ , после выпуска —  $4,22 \text{ МПа}$ , а температура воздуха снизилась до  $17^\circ \text{С}$ .

*Отв.*  $51,8 \text{ кг}$ .

73. По трубопроводу протекает  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  кислорода при температуре  $t = 127^\circ \text{С}$  и давлении  $p = 0,4 \text{ МПа}$ .

Определить массовый расход газа в секунду.

*Отв.*  $M = 38,5 \text{ кг/с}$ .

74. Поршневой компрессор всасывает в минуту  $3 \text{ м}^3$  воздуха при температуре  $t = 17^\circ \text{С}$  и барометрическом давлении  $B = 100 \text{ кПа}$  и нагнетает его в резервуар, объем которого равен  $8,5 \text{ м}^3$ .

За сколько минут компрессор поднимет давление в резервуаре до  $0,7 \text{ МПа}$ , если температура в нем будет оставаться постоянной? Начальное давление воздуха в резервуаре составляло  $100 \text{ кПа}$  при температуре  $17^\circ \text{С}$ .

*Отв.* За  $17 \text{ мин}$ .

75. Дутьевой вентилятор подает в топку парового котла  $102\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $300^\circ \text{С}$  и давлении  $20,7 \text{ кПа}$ . Барометрическое давление воздуха в помещении  $B = 100,7 \text{ кПа}$ .

Определить часовую производительность вентилятора в  $\text{м}^3$  (при нормальных условиях).

*Отв.*  $Q = 48\,940 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

76. Компрессор подает сжатый воздух в резервуар, причем за время работы компрессора давление в резервуаре повышается от атмосферного до  $0,7 \text{ МПа}$ , а температура — от  $20$  до  $25^\circ \text{С}$ . Объем резервуара  $V = 56 \text{ м}^3$ . Барометрическое давление, приведенное к  $0^\circ \text{С}$ ,  $B_0 = 100 \text{ кПа}$ .

Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар.

*Отв.*  $M = 391,7 \text{ кг}$ .

### Глава III

## ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

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

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

$$m_1 = \frac{M_1}{M}, \quad m_2 = \frac{M_2}{M},$$
$$m_3 = \frac{M_3}{M}, \quad \dots, \quad m_n = \frac{M_n}{M},$$

где  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$  — массы отдельных газов и  $M$  — масса всей смеси.

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

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, \quad r_2 = \frac{V_2}{V}, \quad r_3 = \frac{V_3}{V}, \quad \dots,$$
$$r_n = \frac{V_n}{V},$$

где  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  — приведенные объемы компонентов газов, входящих в смесь;  
 $V$  — общий объем газовой смеси.

Очевидно, что

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = M;$$
$$m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = 1,$$

а также

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V;$$
$$r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = 1.$$

Для перевода массовых долей в объемные пользуются формулой

$$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} \quad (24)$$

Объемные доли переводят в массовые по формуле

$$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i} \quad (25)$$

Плотность смеси определяют из выражения

$$\rho_{\text{см}} = \sum r_i \rho_i \text{ кг/м}^3 \quad (26)$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}} \text{ кг/м}^3 \quad (27)$$

Удельный объем смеси представляет величину, обратную  $\rho_{\text{см}}$ ; поэтому, если дан объемный состав смеси, то

$$v_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i} \text{ м}^3/\text{кг} \quad (28)$$

Если же известен массовый состав, то

$$v_{\text{см}} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i} \text{ м}^3/\text{кг} \quad (29)$$

Из уравнения (26) легко получить значение так называемой кажущейся молекулярной массы газовой смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu_i \quad (30)$$

или через массовый состав

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}} \quad (31)$$

Газовую постоянную смеси газов ( $R_{см}$ ) можно выразить или через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, или через кажущуюся молекулярную массу смеси

$$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (32)$$

или

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \quad (33)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью (закон Дальтона), легко получаемой из основного уравнения кинетической теории газов:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n, \quad (34)$$

где  $p$  — общее давление газовой смеси;  
 $p_1, p_2, \dots, p_n$  — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

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

$$p_1 = p r_1, \quad p_2 = p r_2 \text{ и т. д.}$$

или вообще

$$p_i = p r_i, \quad (35)$$

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

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

$$p_i = m_i \frac{R_i}{R_{см}} p.$$

В табл. 2 даны формулы для расчета газовых смесей.

### Задачи

77. Атмосферный воздух имеет примерно следующий массовый состав:

$$m_{O_2} = 23,2\%; \quad m_{N_2} = 76,8\%.$$

## 2. Формулы для расчета газовых смесей

Задание состава смеси	Перевод из одного состава в другой	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовыми долями	$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$v_{\text{см}} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}$ $\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}}$	$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{\text{см}} = \sum_1^n m_i R_i$	$p_i = m_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} p$
Объемными долями	$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$\rho_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \rho_i$ $v_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i}$	$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$

Определить объемный состав воздуха, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру  $B = 101\ 325$  Па.

### Решение

По уравнению (24) получаем

$$r_{O_2} = \frac{\frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{23,2}{32}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28,02}} = 0,21;$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{76,8}{28,02}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28,02}} = 0,79.$$

Газовую постоянную воздуха находим по уравнению (32)

$$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i = m_{O_2} R_{O_2} + m_{N_2} R_{N_2} = \\ = 0,232 \cdot 260 + 0,768 \cdot 295 = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Кажущуюся молекулярную массу смеси определяем из уравнения (30)

$$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i = r_{O_2} \mu_{O_2} + r_{N_2} \mu_{N_2} = \\ = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9$$

или из уравнения (33)

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}.$$

Отсюда

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

Парциальные давления получим из уравнения (35)

$$p_i = r_i p,$$

следовательно,

$$p_{O_2} = r_{O_2} p = 0,21 \cdot 101\ 325 = 21\ 278 \text{ Па};$$

$$p_{N_2} = r_{N_2} p = 0,79 \cdot 101\ 325 = 80\ 047 \text{ Па}.$$

78. В  $1 \text{ м}^3$  сухого 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.

$$\text{Отв. } m_{\text{O}_2} = 0,232; m_{\text{N}_2} = 0,768; R = \\ = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \rho_{\text{N}_2} = 0,79 \rho_{\text{см}}; \\ \rho_{\text{O}_2} = 0,21 \rho_{\text{см}}.$$

79. Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода  $m_{\text{H}_2} = 0,67\%$ .

Найти газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

### Решение

Из уравнения (32)

$$R_{\text{см}} = \sum_i^n m_i R_i = m_1 R_1 + m_2 R_2 = 0,0667 \cdot 4124 + \\ + 0,9333 \cdot 296,8 = 552 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Удельный объем газовой смеси получим из характеристического уравнения

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

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

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

81. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий:  $\text{CO}_2 = 12,3\%$ ;  $\text{O}_2 = 7,2\%$ ;  $\text{N}_2 = 80,5\%$ .

Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при  $B = 100 \text{ кПа}$  и  $t = 800^\circ \text{C}$ .

$$\text{Отв. } \mu_{\text{см}} = 30,3; R_{\text{см}} = \\ = 274 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ \rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

82. Генераторный газ имеет следующий объемный состав:  $H_2 = 7,0\%$ ;  $CH_4 = 2,0\%$ ;  $CO = 27,6\%$ ;  $CO_2 = 4,8\%$ ;  $N_2 = 58,6\%$ .

Определить массовые доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при  $15^\circ C$  и  $0,1$  МПа.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } m_{H_2} &= 0,005; m_{CH_4} = 0,012; \\ m_{CO} &= 0,289; m_{CO_2} = 0,079; m_{N_2} = \\ &= 0,615; \mu_{см} = 26,72; R_{см} = \\ &= 310,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \rho_{см} = \\ &= 1,095 \text{ кг}/\text{м}^3; p_{H_2} = 7 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

83. Газ коксовых печей имеет следующий объемный состав:  $H_2 = 57\%$ ;  $CH_4 = 23\%$ ;  $CO = 6\%$ ;  $CO_2 = 2\%$ ;  $N_2 = 12\%$ .

Найти кажущуюся молекулярную массу, массовые доли, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при  $15^\circ C$  и  $100$  кПа.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } \mu_{см} &= 10,77; m_{H_2} = 0,107; \\ m_{CO_2} &= 0,082; R_{см} = 772 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \\ \rho_{см} &= 0,45 \text{ кг}/\text{м}^3. \end{aligned}$$

84. Генераторный газ состоит из следующих объемных частей:  $H_2 = 18\%$ ;  $CO = 24\%$ ;  $CO_2 = 6\%$ ;  $N_2 = 52\%$ .

Определить газовую постоянную генераторного газа и массовый состав входящих в смесь газов.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } R_{см} &= 342 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); m_{CO_2} = \\ &= 10,86\%; m_{N_2} = 60,03\%; m_{H_2} = \\ &= 1,48\%; m_{CO} = 27,63\%. \end{aligned}$$

85. В цилиндр газового двигателя засасывается газовая смесь, состоящая из 20 массовых долей воздуха и одной доли коксового газа.

Найти плотность и удельный объем смеси при нормальных условиях, а также парциальное давление воздуха в смеси (данные о коксовом газе приведены в табл. IV, см. приложения).

$$\begin{aligned} \text{Отв. } \rho &= 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3; v_{см}'' = \\ &= 0,833 \text{ м}^3/\text{кг}; p_{\text{возд}} = 0,884p. \end{aligned}$$

86. Анализ продуктов сгорания топлива, произведенный с помощью аппарата Орса, показал следующий их состав:  $r_{CO_2} = 12,2\%$ ;  $r_{O_2} = 7,1\%$ ;  $r_{CO} = 0,4\%$ ;  $r_{N_2} = 80,3\%$ .

Найти массовый состав входящих в смесь газов.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } m_{CO_2} &= 17,7\%; m_{O_2} = 7,5\%; \\ m_{CO} &= 0,37\%; m_{N_2} = 74,43\%. \end{aligned}$$

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

*Отв.*  $R_{см} = 717$  Дж/(кг·К);  $r_{O_2} = 0,017$ ;  $r_{N_2} = 0,028$ ,  $r_{H_2} = 0,484$ ;  $r_{CO_2} = 0,02$ ;  $\rho_H = 0,518$  кг/м<sup>3</sup>.

88. Найти газовую постоянную, удельный объем газовой смеси и парциальные давления ее составляющих, если объемный состав смеси следующий:  $CO_2 = 12\%$ ;  $CO = 1\%$ ;  $H_2O = 6\%$ ;  $O_2 = 7\%$ ;  $N_2 = 74\%$ , а общее давление ее  $p = 100$  кПа.

*Отв.*  $R_{см} = 281$  Дж/(кг·К);  $v = 0,76$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_{CO_2} = 1200$  Па.

89. В резервуаре емкостью 125 м<sup>3</sup> находится коксовый газ при давлении  $p = 0,5$  МПа и температуре  $t = 18^\circ$  С. Объемный состав газа следующий:  $r_{H_2} = 0,46$ ;  $r_{CH_4} = 0,32$ ;  $r_{CO} = 0,15$ ;  $r_{N_2} = 0,07$ . После израсходования некоторого количества газа давление его понизилось до 0,3 МПа, а температура — до  $12^\circ$  С.

Определить массу израсходованного коксового газа.

*Отв.*  $M = 2167$  кг.

90. Массовый состав смеси следующий:  $CO_2 = 18\%$ ;  $O_2 = 12\%$  и  $N_2 = 70\%$ .

До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при  $t = 180^\circ$  С 8 кг ее занимали объем, равный 4 м<sup>3</sup>.

*Отв.*  $p = 0,24$  МПа.

91. Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа  $p_{CO_2} = 120$  кПа, а давление смеси  $p_{см} = 300$  кПа.

*Отв.*  $m_{CO_2} = 0,512$ ;  $m_{N_2} = 0,488$ .

92. Газовая смесь имеет следующий массовый состав:  $CO_2 = 12\%$ ;  $O_2 = 8\%$  и  $N_2 = 80\%$ .

До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы плотность ее составляла 1,6 кг/м<sup>3</sup>?

*Отв.* До 0,213 МПа.

## Глава IV

### ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

*Теплоемкостью* называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на  $1^\circ\text{C}$ .

За единицу количества энергии в системе СИ применяют джоуль (Дж). В системе СИ джоуль является универсальной единицей, применяемой для измерения всех видов энергии: тепловой, механической, лучистой и пр. В качестве тепловой единицы 1 Дж представляет собой такое ее количество, которое появляется в результате превращения механической работы 1 Дж в теплоту. В качестве единицы механической энергии джоуль представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 ньютону при перемещении ею тела на расстояние 1 м в направлении действия силы ( $1 \text{ Дж} = \text{Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$ ).

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость  $\mu c$  — кДж/(кмоль  $\cdot$  К), массовую теплоемкость  $c$  — кДж/(кг  $\cdot$  К) и объемную теплоемкость  $c'$  — кДж/(м<sup>3</sup>  $\cdot$  К).

Как было указано выше, 1 м<sup>3</sup> газа в зависимости от параметров его состояния имеет разные массы. В связи с этим объемную теплоемкость всегда относят к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> его при нормальных условиях ( $p_n = 101\,325 \text{ Па}$  (760 мм рт. ст.) и  $T_n = 273 \text{ К}$  ( $t_n = 0^\circ\text{C}$ )).

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Удобнее всего иметь величину мольной теплоемкости. Тогда массовая теплоемкость

$$c = \frac{\mu c}{\mu}, \quad (36)$$

а объемная теплоемкость

$$c' = \frac{\mu c}{22,4}. \quad (37)$$

Объемная и массовая теплоемкости связаны между собой зависимостью

$$c' = c\rho_n,$$

где  $\rho_n$  — плотность газа при нормальных условиях.

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

Если  $q$  — количество теплоты, сообщаемой единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$  (или, что то же, от  $T_1$  до  $T_2$ ), то

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad (38)$$

представляет собой *среднюю теплоемкость* в пределах  $t_1$ — $t_2$ . Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют *истинной теплоемкостью*. Аналитически последняя определяется как

$$c = \frac{dq}{dt}.$$

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления.

Для газов особо важное значение имеют следующие два случая нагревания (охлаждения):

- 1) изменение состояния при постоянном объеме;
- 2) изменение состояния при постоянном давлении.

Обоим этим случаям соответствуют различные значения теплоемкостей.

Таким образом, различают истинную и среднюю теплоемкости:

а) мольную — при постоянном объеме ( $\mu c_v$  и  $\mu c_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $\mu c_p$  и  $\mu c_{pm}$ );

б) массовую — при постоянном объеме ( $c_v$  и  $c_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $c_p$  и  $c_{pm}$ );

в) объемную — при постоянном объеме ( $c'_v$  и  $c'_{vm}$ ) и постоянном давлении ( $c'_p$  и  $c'_{pm}$ ).

Между мольными теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существует следующая зависимость:

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R \approx 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}). \quad (39)$$

Для приближенных расчетов при невысоких температурах можно принимать следующие значения молярных теплоемкостей (табл. 3).

3. Приближенные значения молярных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении ( $c = \text{const}$ )

Газы	Теплоемкость в кДж/(кмоль·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$
Одноатомные . . . . .	12,56	20,93
Двухатомные . . . . .	20,93	29,31
Трех- и многоатомные . . . . .	29,31	37,68

В технической термодинамике большое значение имеет отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, обозначаемое буквой  $k$ :

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

Если принять теплоемкость величиной постоянной, то на основании данных табл. 3 получаем: для одноатомных газов  $k = 1,67$ ; для двухатомных газов  $k = 1,4$ ; для трех- и многоатомных газов  $k = 1,29$ .

Теплоемкость газов изменяется с изменением температуры, причем эта зависимость имеет криволинейный характер. В табл. V—XII (см. приложения) приведены теплоемкости для наиболее часто встречающихся в теплотехнических расчетах двух- и трехатомных газов.

При пользовании таблицами значения истинных теплоемкостей, а также средних теплоемкостей в пределах от  $0^\circ$  до  $t$  берут непосредственно из этих таблиц, причем в необходимых случаях производится интерполирование.

Количество теплоты, которое необходимо затратить в процессе нагревания 1 кг газа в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ ,

$$q = (c_m)_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_{m2} t_2 - c_{m1} t_1, \quad (40)$$

где  $c_{m1}$  и  $c_{m2}$  — соответственно средние теплоемкости в пределах  $0^\circ - t_1$  и  $0^\circ - t_2$ .

Из формулы (40) легко получить выражения для определения количества теплоты, затрачиваемой в процессе при постоянном объеме и в процессе при постоянном давлении, т. е.

$$q_v = c_{vm2}t_2 - c_{vm1}t_1; \quad (41)$$

$$q_p = c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1. \quad (42)$$

Если в процессе участвуют  $M$  кг или  $V_n$  м<sup>3</sup> газа, то:

$$Q_v = M (c_{vm2}t_2 - c_{vm1}t_1) = V_n (c_{vm2}t_2 - c_{vm1}t_1); \quad (43)$$

$$Q_p = M (c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1) = V_n (c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1). \quad (44)$$

Нелинейную зависимость истинной теплоемкости от температуры представляют обычно уравнением вида

$$c = a + bt + dt^2,$$

где  $a$ ,  $b$  и  $d$  — величины, постоянные для данного газа.

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

$$c = a + bt,$$

а средняя теплоемкость при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$

$$c_m = a + \frac{b}{2} (t_1 + t_2),$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для данного газа.

Для средней теплоемкости в пределах  $0^\circ$  —  $t$  эта формула принимает вид

$$c_m = a + \frac{b}{2} t. \quad (45)$$

В табл. 4 приведены интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей при постоян-

4. Интерполяционные формулы  
для истинных и средних молярных теплоемкостей газов

Газ	Молярная теплоемкость при $p = \text{const}$ в кДж/(кмоль·К)	
	истинная	средняя
В пределах 0—1000° С		
O <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 29,5802 + 0,0069706t$	$\mu_{c_{pm}} = 29,2080 + 0,0040717t$
N <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 28,5372 + 0,0053905t$	$\mu_{c_{pm}} = 28,7340 + 0,0023488t$
CO	$\mu_{c_p} = 28,7395 + 0,0058862t$	$\mu_{c_{pm}} = 28,8563 + 0,0026808t$
Воздух	$\mu_{c_p} = 28,7558 + 0,0057208t$	$\mu_{c_{pm}} = 28,8270 + 0,0027080t$
H <sub>2</sub> O	$\mu_{c_p} = 32,8367 + 0,0116611t$	$\mu_{c_{pm}} = 33,1494 + 0,0052749t$
SO <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 42,8728 + 0,0132043t$	$\mu_{c_{pm}} = 40,4386 + 0,0099562t$
В пределах 0—1500° С		
H <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 28,3446 + 0,0031518t$	$\mu_{c_{pm}} = 28,7210 + 0,0012008t$
CO <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 41,3597 + 0,0144985t$	$\mu_{c_{pm}} = 38,3955 + 0,0105838t$
В пределах 1000—2700° С		
O <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 33,8603 + 0,021951t$	$\mu_{c_{pm}} = 31,5731 + 0,0017572t$
N <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 32,7466 + 0,0016517t$	$\mu_{c_{pm}} = 29,7815 + 0,0016835t$
CO	$\mu_{c_p} = 33,6991 + 0,0013406t$	$\mu_{c_{pm}} = 30,4242 + 0,0015579t$
Воздух	$\mu_{c_p} = 32,9564 + 0,0017806t$	$\mu_{c_{pm}} = 30,1533 + 0,0016973t$
H <sub>2</sub> O	$\mu_{c_p} = 40,2393 + 0,0059854t$	$\mu_{c_{pm}} = 34,5118 + 0,0045979t$
В пределах 1500—3000° С		
H <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 31,0079 + 0,0020243t$	$\mu_{c_{pm}} = 28,6344 + 0,0014821t$
CO <sub>2</sub>	$\mu_{c_p} = 56,8768 + 0,0021738t$	$\mu_{c_{pm}} = 48,4534 + 0,0030032t$

ном давлении, а в табл. 5 — для средних массовых объемных теплоемкостей при постоянном объеме.

Теплоемкость газовой смеси  
массовая

$$c_{cm} = \sum_1^n m_i c_i \quad (46)$$

объемная

$$c'_{cm} = \sum_1^n r_i c_i \quad (47)$$

молярная

$$\mu_{c_{cm}} = \sum_1^n r_i \mu_{c_i} \quad (48)$$

5. Интерполяционные формулы  
для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Теплоемкость в кДж/(кг·К)	
	массовая	объемная
В пределах 0—1000° С		
O <sub>2</sub>	$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t$	$c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183t$
	$c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724t$	$c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183t$
N <sub>2</sub>	$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$	$c'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492t$
	$c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382t$	$c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492t$
CO	$c_{pm} = 1,0304 + 0,00009575t$	$c_{pm} = 1,2883 + 0,00011966t$
	$c_{vm} = 0,7335 + 0,00009575t$	$c_{vm} = 0,9173 + 0,00011966t$
Воздух	$c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349t$	$c_{pm} = 1,2870 + 0,00012091t$
	$c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349t$	$c_{vm} = 0,9161 + 0,00012091t$
H <sub>2</sub> O	$c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278t$	$c_{pm} = 1,4800 + 0,00023551t$
	$c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278t$	$c_{vm} = 1,1091 + 0,00023551t$
SO <sub>2</sub>	$c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541t$	$c_{pm} = 1,8472 + 0,00004547t$
	$c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541t$	$c_{vm} = 1,4763 + 0,00004547t$
В пределах 0—1500° С		
H <sub>2</sub>	$c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574t$	$c_{pm} = 1,2803 + 0,00005355t$
	$c_{vm} = 10,1241 + 0,00059574t$	$c_{vm} = 0,9094 + 0,00005355t$
CO <sub>2</sub>	$c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053t$	$c_{pm} = 1,7250 + 0,00004756t$
	$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053t$	$c_{vm} = 1,3540 + 0,00004756t$

### Задачи

93. Найти объемную теплоемкость кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая  $c = \text{const}$ .

### Решение

По табл. 3 для двухатомных газов

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

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

Следовательно, для кислорода (и любого двухатомного газа)

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

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

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

$$\text{Отв. } c_p = 0,916 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad c_v = \\ = 0,654 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

95. Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур  $0-1200^\circ \text{C}$ , если известно, что для окиси углерода  $(\mu c_{pm})_0^{1200} = 32,192 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Сопоставить полученные результаты с данными табл. VII.

### Решение

На основании формул (36), (37) и (39) имеем

$$(\mu c_v)_0^{1200} = 32,192 - 8,314 = 23,877 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

$$(c_{vm})_0^{1200} = \frac{(\mu c_v)_0^{1200}}{28} = \frac{23,877}{28} = 0,8528 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$(c'_{vm})_0^{1200} = \frac{(\mu c_v)_0^{1200}}{22,4} = \frac{23,877}{22,4} = 1,0659 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Из табл. VII

$$(c_{vm})_0^{1200} = 0,8566 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$(c'_{vm})_0^{1200} = 1,0651 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

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

$$\text{Отв. } (c_{pm})_0^{825} = 1,090 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

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

$$\text{Отв. } \mu c_p = 36,55 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}); \\ \varepsilon = 1,79\%.$$

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

### Решение

По уравнениям (38) и (42)

$$(c_{pm})_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm,2} t_2 - c_{pm,1} t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь табл. XII, получим для воздуха

$$(c_{pm})_0^{600} = 1,0710 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

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

отсюда

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

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

### Решение

Из табл. 4 для воздуха

$$\begin{aligned} \mu c_{pm} &= 28,8270 + 0,0027080t = 28,8270 + \\ &+ 0,0027080(200 + 800) = 28,8270 + 2,7080 = \\ &= 31,535 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Средняя массовая теплоемкость для воздуха

$$c_{pm} = \frac{\mu c_{pm}}{\mu} = \frac{31,535}{28,96} = 1,088 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

100. Определить среднюю массовую теплоемкость  $c_{pm}$  для кислорода при постоянном давлении в пределах от 350—1000° С, считая зависимость теплоемкости от температуры: а) нелинейной; б) линейной.

### Решение

а) Из формул (38) и (42)

$$(c_{pm})_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm,2} t_2 - c_{pm,1} t_1}{t_2 - t_1}.$$

Пользуясь табл. V, получим для кислорода

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

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

отсюда

$$(c_{pm})_{350}^{1000} = \frac{1.035 \cdot 1000 - 0.9576 \cdot 350}{650} = \frac{700}{650} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) пользуясь табл. 5 и формулой (45), найдем

$$(c_{pm})_0^t = 0,9127 + 0,00012724t;$$

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

101. Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  и  $c_{vm}^*$  в пределах  $200\text{—}800^\circ \text{C}$  для  $\text{CO}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

$$\text{Отв. } c_{pm} = 1,1262 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); c_{vm}^* = \\ = 1,0371 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

102. Найти среднюю теплоемкость  $c_{pm}^*$  и  $c_{vm}^*$  для воздуха в пределах  $400\text{—}1200^\circ \text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

### Р е ш е н и е

Из формул (38) и (42) находим

$$c_{pm}^* = \frac{c_{pm2}^* t_2 - c_{pm1}^* t_1}{t_2 - t_1}; \quad c_{vm}^* = \frac{c_{vm2}^* t_2 - c_{vm1}^* t_1}{t_2 - t_1}.$$

Подставляя в эти выражения значения соответствующих теплоемкостей из табл. XII, получим

$$c_{pm}^* = \frac{1,4327 \cdot 1200 - 1,3289 \cdot 400}{800} = 1,4846 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_{vm}^* = \frac{1,0618 \cdot 1200 - 0,9579 \cdot 400}{800} = 1,1137 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

103. Найти среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  и  $c_{pm}^*$  углекислого газа в пределах  $400\text{—}1000^\circ \text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

$$\text{Отв. } c_{pm} = 1,2142 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); c_{pm}^* = \\ = 2,3865 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

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

$$\text{Отв. } c_{vm} = 0,8164 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

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

$$\mu c_{pm} = 28,7340 + 0,0023488t.$$

Отв.  $c_{cm} = 0,8122$  кДж/(кг·К).

106. Воздух в количестве  $6 \text{ м}^3$  при давлении  $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 25^\circ \text{С}$  нагревается при постоянном давлении до  $t_2 = 130^\circ \text{С}$ .

Определить количество подведенной к воздуху теплоты, считая  $c = \text{const}$ .

### Р е ш е н и е

Для данного случая формула (40) примет вид

$$Q_p = Mc_p(t_2 - t_1) = V_n c_p'(t_2 - t_1).$$

Массу газа найдем из уравнения (16)

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT} = \frac{0,3 \cdot 10^6 \cdot 6}{287 \cdot 298} = 21 \text{ кг},$$

а объем газа при нормальных условиях — из уравнения (22)

$$V_n = \frac{p_1 V_1 T_n}{p_n T_1} = \frac{0,3 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 273}{0,1013 \cdot 10^6 \cdot 298} = 16,3 \text{ м}^3.$$

На основании формул (36) и (37) и табл. 5 имеем

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,31}{28,96} = 1,012 \text{ кДж/(кг·К)};$$

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

Следовательно,

$$Q_p = Mc_p(t_2 - t_1) = 21 \cdot 1,012 \cdot 105 = 2231 \text{ кДж},$$

или

$$Q_p = V_n c_p'(t_2 - t_1) = 16,3 \cdot 1,308 \cdot 105 = 2239 \text{ кДж}.$$

107. В закрытом сосуде объемом  $V = 300 \text{ л}$  находится воздух при давлении  $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ .

Какое количество теплоты необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до  $t_2 = 120^\circ \text{С}$ ? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоян-

ной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получающую в первом случае.

### Решение

Пользуясь уравнением состояния, определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$M = \frac{V_p}{RT} = \frac{0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 1,07 \text{ кг.}$$

Для двухатомных газов, считая теплоемкость величиной постоянной, имеем

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

следовательно, теплоемкость воздуха

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,93}{28,96} = 0,7226 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Количество подведенной теплоты

$$Q = M c_v (t_2 - t_1) = 1,07 \cdot 0,7227 \cdot 100 = 77,3 \text{ кДж.}$$

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

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

Следовательно, относительная ошибка

$$\frac{0,7227 - 0,7209}{0,7209} 100 = 0,25\%.$$

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

108. Воздух охлаждается от 1000 до 100° С в процессе с постоянным давлением.

Какое количество теплоты теряет 1 кг воздуха? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получающую в первом случае.

Отв. 1)  $q_{c_p=\text{const}} = -911,9 \text{ кДж/кг;}$

2)  $q_{c_p=f(t)} =$   
 $= -990,1 \text{ кДж/кг; } \epsilon \approx 8\%.$

109. Опытным путем найдены следующие значения истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении:

$$\text{для } 0^\circ \text{ C } \mu_{c_p} = 29,2741 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K});$$

$$\text{для } 500^\circ \text{ C } \mu_{c_p} = 33,5488 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K});$$

$$\text{для } 1000^\circ \text{ C } \mu_{c_p} = 35,9144 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K}).$$

По этим данным составить приближенное интерполяционное уравнение вида

$$\mu_{c_p} = a + bt + dt^2,$$

дающее зависимость истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении от температуры.

### Р е ш е н и е

Составление интерполяционного уравнения указанного выше вида сводится к нахождению постоянных  $a$ ,  $b$  и  $d$ . Последние могут быть получены на основании трех заданных точек. Для этого составим три уравнения:

$$\text{для } 0^\circ \text{ C } 29,2741 = a;$$

$$\text{для } 500^\circ \text{ C } 33,5488 = a + 5 \cdot 10^2 \cdot b + 25 \cdot 10^4 \cdot d;$$

$$\text{для } 1000^\circ \text{ C } 35,9144 = a + 1 \cdot 10^3 \cdot b + 1 \cdot 10^6 \cdot d.$$

Решая эту систему уравнений, найдем

$$a = 29,2741; \quad b = 0,010459;$$

$$d = -0,000003818.$$

Следовательно, приближенное уравнение, выражающее температурную зависимость истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении, имеет следующий вид:

$$\mu_{c_p} = 29,2741 + 0,010459t - 0,000003818t^2.$$

110. Пользуясь формулой, полученной в предыдущей задаче, определить истинную мольную теплоемкость кислорода при постоянном давлении для температуры  $700^\circ \text{ C}$ .

Сравнить полученное значение теплоемкости со значением его, взятым из таблиц.

$$\text{Отв. } \mu_{c_p} = 34,725 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K}).$$

111. В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{ C}$ .

Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до  $t_2 = 300^\circ \text{C}$ ? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

### Решение

Количество теплоты, сообщаемое газу при  $v = \text{const}$ , на основании формулы (43)

$$Q_v = V_n (c'_{vm2} t_2 - c'_{vm1} t_1).$$

Объем газа  $V_n$  в сосуде, приведенного к нормальным условиям, определяем по уравнению (22):

$$V_n = \frac{pVT_n}{p_n T} = \frac{0,2 \cdot 0,3 \cdot 273}{0,1013 \cdot 293} = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значения теплоемкостей находим по табл. V, тогда

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

Конечное давление можно получить, если воспользоваться характеристическими уравнениями для начального и конечного состояний кислорода;

$$p_1 v = RT_1; \quad p_2 v = RT_2.$$

Следовательно,

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,2 \frac{573}{293} = 0,39 \text{ МПа}.$$

112. Найти количество теплоты, 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  $1200^\circ \text{C}$  при  $p = \text{const}$  и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

### Решение

Пользуясь формулами (42) и (47), получаем

$$\begin{aligned} q_p &= c'_{pm2cm} t_2 - c'_{pm1cm} t_1 = \sum_1^n c'_{pm2i} r_i t_2 - \sum_1^n c'_{pm1i} r_i t_1 = \\ &= (c'_{pm2\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + c'_{pm2\text{O}_2} r_{\text{O}_2} + c'_{pm2\text{N}_2} r_{\text{N}_2}) t_2 - \\ &- (c'_{pm1\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + c'_{pm1\text{O}_2} r_{\text{O}_2} + c'_{pm1\text{N}_2} r_{\text{N}_2}) t_1. \end{aligned}$$

Подставляя значения соответствующих теплоемкостей из табл. IX, V и VI, находим

$$q_p = (2,2638 \cdot 0,145 + 1,5005 \cdot 0,065 + \\ + 1,4202 \cdot 0,79) 1200 - (1,7873 \cdot 0,145 + \\ + 1,3352 \cdot 0,065 + 1,3038 \cdot 0,79) 200 = 1582,2 \text{ кДж/м}^3.$$

113. Газовая смесь имеет следующий состав по объему:

$$\text{CO}_2 = 0,12; \quad \text{O}_2 = 0,07; \quad \text{N}_2 = 0,75;$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,06.$$

Определить среднюю массовую теплоемкость  $c_{pm}$ , если смесь нагревается от 100 до 300° С.

$$\text{Отв. } c_{pm} = 1,0928 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

114. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от 150 до 600° С.

Найти количество теплоты, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 360 кг/ч. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной

$$\text{Отв. } Q = 47,84 \text{ кДж/с}.$$

115. В калориметре с идеальной тепловой изоляцией находится вода в количестве  $M_b = 0,8$  кг при температуре  $t' = 15^\circ \text{С}$ . Калориметр изготовлен из серебра, теплоемкость которого  $c_c = 0,2345$  кДж/(кг·К).

Масса калориметра  $M_c = 0,25$  кг. В калориметр опускают 0,2 кг алюминия при температуре  $t_a = 100^\circ \text{С}$ . В результате этого температура воды повышается до  $t'' = 19,24^\circ \text{С}$ . Определить теплоемкость алюминия.

### Р е ш е н и е

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

$$(M_b c_b + M_c c_c) t' + M_a c_a t_a = (M_b c_b + M_c c_c + M_a c_a) t''.$$

Производя простейшие преобразования, решим это уравнение относительно  $c_a$ , тогда

$$c_a = \frac{(M_b c_b + M_c c_c) (t'' - t')}{M_a (t_a - t'')}.$$

Подставляя в полученное выражение значения входящих в него величин, получим

$$c_a = \frac{(0,8 \cdot 4,1868 + 0,25 \cdot 0,2345) (19,24 - 15)}{0,2 (100 - 19,24)} =$$

$$= 0,8946 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

116. Продукты сгорания топлива поступают в газоход парового котла при температуре газов  $t'_r = 1100^\circ \text{C}$  и покидают газоход при температуре  $t''_r = 700^\circ \text{C}$ . 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 теплоты теряет  $1 \text{ м}^3$  газовой смеси, взятой при нормальных условиях.

Отв.  $Q_p = 697,5 \text{ кДж/м}^3$ .

117. Для использования теплоты газов, уходящих из паровых котлов, в газоходах последних устанавливают воздухоподогреватели. Газы протекают внутри труб и подогревают воздух, проходящий поперек тока (рис. 7).

При испытании котельного агрегата были получены следующие данные:

температура газов соответственно на входе и на выходе из воздухоподогревателя  $t'_r = 350^\circ \text{C}$ ,  $t''_r = 160^\circ \text{C}$ ;

температура воздуха соответственно на входе и на выходе из воздухоподогревателя  $t'_в = 20^\circ \text{C}$ ,  $t''_в = 250^\circ \text{C}$ ;

объемный состав газов, проходящих через воздухоподогреватель;  $\text{CO}_2 = 12\%$ ;  $\text{O}_2 = 6\%$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 8\%$ ;  $\text{N}_2 = 74\%$ ;

расход газов  $V_{\text{гн}} = 66\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Определить расход воздуха. Принять, что вся отданная газами теплота воспринята воздухом. Потерями давления воздуха в воздухоподогревателе пренебречь.

Отв.  $V_{\text{вн}} = 59\,500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

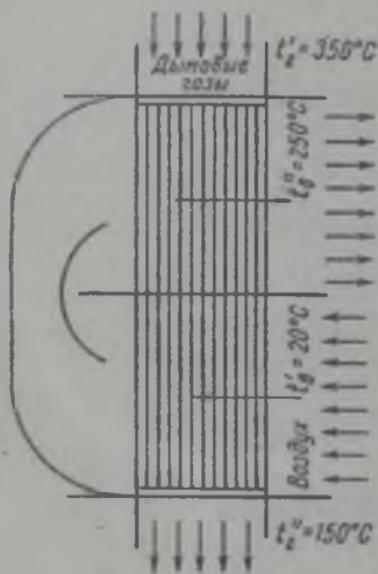


Рис. 7

## Глава V

### ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики является частным случаем закона сохранения и превращения энергии, впервые установленного основоположником русской науки М. В. Ломоносовым в замечательной по своей широте и значению формулировке *закона сохранения и неуничтожаемости материи, движения и силы*.

Первый закон термодинамики устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии и математически может быть выражен следующим образом:

$$Q = L,$$

где  $Q$  — количество теплоты, превращенной в работу;  
 $L$  — работа, полученная за счет теплоты  $Q$ .

Количества теплоты  $Q$  и работы  $L$  измерены в данном случае в соответствии с системой единиц СИ — в одних и тех же единицах — в джоулях.

Так как за единицу работы принят Дж, то единицей мощности будет являться Дж/с. Эта единица носит название ватт (Вт). В технике применяют более крупные единицы энергии (работы) и мощности: килоджоуль (кДж), мегаджоуль (МДж), киловатт (кВт), мегаватт (МВт), киловатт-час (кВт·ч).

В промышленности до последнего времени за единицу тепловой энергии принимали калорию (кал), за единицу механической работы килограмм-силу-метр, или килограммометр (кгс·м), а за единицу мощности — килограммометр в секунду (кгс·м/с). Так как эти единицы слишком малы, то в качестве практических единиц были приняты килокалория (ккал), мегакалория (Мкал), лошадиная сила (л. с.) и киловатт (кВт). Соответствующими единицами работы (энергии) были приняты киловатт-час

(кВт·ч), лошадиная сила-час (л. с. ч.), а мощности — килограммометр в секунду (кгс·м/с).

Соотношения между различными единицами энергии и мощности даны соответственно в табл. 6 и 7.

6. Соотношения между единицами энергии

Единицы измерения	Дж	кгс·м	кал
Джоуль . . . . .	1	0,102	0,239
Килограмм-сила-метр . . . . .	9,8067	1	2,343
Калория . . . . .	4,1868	0,42686	1
Килокалория . . . . .	$4,1868 \cdot 10^3$	$4,2686 \cdot 10^2$	$10^3$
Киловатт-час . . . . .	$3,6 \cdot 10^6$	$3,67 \cdot 10^5$	$8,6 \cdot 10^5$
Фут-фунт-сила . . . . .	1,356	0,138	0,325

Единицы измерения	ккал	кВт·ч	ft·lbf
Джоуль . . . . .	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,7376
Килограмм-сила-метр . . . . .	$2,343 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	7,233
Калория . . . . .	$10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	3,088
Килокалория . . . . .	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$3,088 \cdot 10^3$
Киловатт-час . . . . .	$8,6 \cdot 10^3$	1	$2,653 \cdot 10^6$
Фут-фунт-сила . . . . .	$3,25 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-7}$	1

7. Соотношения между единицами мощности

Единицы измерения	Вт	кгс·м/с	кал/с	ft·lbf/s	л. с.
Ватт . . . . .	1	0,102	0,239	0,7376	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Килограмм-сила-метр в секунду . . . . .	9,8067	1	2,343	7,233	$1,33 \cdot 10^{-2}$
Калория в секунду . . . . .	4,1868	0,427	1	3,088	$5,69 \cdot 10^{-3}$
Фут-фунт-сила в секунду . . . . .	1,3558	0,138	0,3246	1	$1,84 \cdot 10^{-3}$
Лошадиная сила . . . . .	736	75	175,5	542,5	1

Пользуясь первым законом термодинамики, можно определить коэффициент полезного действия (к. п. д.) теплосиловых установок  $\eta_{ст}$ , характеризующий степень совершенства превращения ими теплоты в работу.

К. п. д. может быть вычислен, если известны расход топлива на 1 кВт·ч и теплота сгорания топлива, т. е. то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании массовой или объемной единицы топлива.

Если расход топлива на 1 кВт·ч (удельный расход топлива)  $b$  выражен в кг/(кВт·ч), а теплота сгорания

топлива  $Q_H^0$  — в кДж/кг, то к. п. д. теплосиловой установки

$$\eta_{ст} = \frac{3600}{Q_H^0 p_b}. \quad (49)$$

Аналитическое выражение первого закона термодинамики или основное уравнение теплоты в дифференциальной форме для любого тела

$$dQ = dU + dL, \quad (50)$$

где  $dQ$  — количество теплоты, сообщенное извне рабочему телу массой  $M$  кг;

$dU$  — изменение внутренней энергии рабочего тела;

$dL$  — работа, совершенная рабочим телом по преодолению внешнего давления, «внешняя работа» расширения.

Каждый из трех членов этого уравнения может быть в зависимости от характера изменения состояния положительным, или отрицательным, или равным нулю.

Для бесконечно малого изменения состояния 1 кг любого газа уравнение (50) примет следующий вид:

$$dq = du + dl. \quad (51)$$

Так как

$$dl = p dv,$$

то

$$dq = du + p dv. \quad (52)$$

Для конечного изменения состояния уравнения (50) и (51) соответственно имеют вид

$$Q = \Delta U + L \quad (53)$$

и

$$q = \Delta u + l. \quad (54)$$

Работа расширения 1 кг газа

$$dl = p dv;$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (55)$$

Изменение внутренней энергии идеального газа для любого процесса при бесконечно малом изменении состояния (для 1 кг)

$$du = c_p dt. \quad (56)$$

В теплотехнических расчетах обычно требуется знать изменение внутренней энергии  $\Delta u$ , а не ее абсолютное значение; поэтому начало отсчета (0 К или 0° С) для конечного результата ( $\Delta u$ ) не имеет значения.

Интегрируя уравнение (56) в пределах  $t_1$  —  $t_2$ , получаем

$$\Delta u = c_{vm} (t_2 - t_1), \quad (57)$$

где  $c_{vm}$  — средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме в пределах  $t_1$  —  $t_2$ .

Таким образом, изменение внутренней энергии идеального газа для любого процесса равно произведению средней теплоемкости при постоянном объеме на разность температур газа.

### ЭНТАЛЬПИЯ ГАЗОВ

Заменяя в основном уравнении первого закона

$$dq = du + pdv$$

величину  $pdv$  через  $d(pv) - vdp$ , получаем

$$dq = du + d(pv) - vdp = d(u + pv) - vdp.$$

Выражение  $u + pv$  является параметром состояния. В технической термодинамике этот параметр называют *энтальпией* и обозначают буквой  $i$ . Таким образом,

$$i = u + pv, \quad (58)$$

и, следовательно, основное уравнение первого закона, выраженное через энтальпию, имеет вид

$$dq = di - vdp. \quad (59)$$

Для идеальных газов

$$di = c_d dT.$$

Следовательно,

$$i = \int_0^T c_p dT = c_{pm} T, \quad (60)$$

где  $c_{pm}$  — средняя массовая теплоемкость при постоянном давлении в пределах от 0 до  $T$ .

В теплотехнических расчетах обычно требуется знать изменение энтальпии, а не ее абсолютное значение, поэтому начало отсчета (0 К или 0° С) для конечного результата ( $\Delta i$ ) не имеет значения.

Интегрируя уравнение (59) при  $p = \text{const}$ , получаем

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (61)$$

Таким образом, количество теплоты в процессе  $p = \text{const}$  численно можно найти как разность энтальпии конечного и начального состояния.

### СМЕШЕНИЕ ГАЗОВ

При смешении химически невзаимодействующих газов, имеющих различные давления и температуры, обычно приходится определять конечное состояние смеси. При этом различают два случая.

1. *Смешение газов при  $V = \text{const}$ .* Если суммарный объем, занимаемый газами до и после смешения, остается неизменным и газы до смешения занимают объемы  $V_1, V_2, \dots, V_n$  м<sup>3</sup> при давлениях  $p_1, p_2, \dots, p_n$  и температурах  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а отношения теплоемкостей этих газов  $c_p/c_v$  равны  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то параметры смеси определяют по формулам:

температура

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{k_i - 1}}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{(k_i - 1) T_i}}; \quad (62)$$

давление

$$p = \frac{T}{V} \sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}; \quad (63)$$

объем

$$V = \sum_1^n V_i.$$

Для газов, у которых молярные теплоемкости равны, а следовательно, равны и значения  $k$ , формулы (62) и (63) принимают вид

$$T = \frac{\sum_1^n p_i V_i}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}}; \quad (64)$$

$$p = \frac{\sum_1^n p_i V_i}{V}. \quad (65)$$

2. Смещение газовых потоков. Если массовые расходы смешивающихся потоков равны  $M_1, M_2, \dots, M_n$  кг/ч, объемные расходы —  $V_1, V_2, \dots, V_n$  м<sup>3</sup>/ч, давления газов —  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , температуры —  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , а отношения теплоемкостей отдельных газов равны соответственно  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , то температуры смеси определяют по формуле

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{k_i}{k_i - 1} p_i V_i}{\sum_1^n \frac{k_i}{k_i - 1} \frac{p_i V_i}{T_i}}. \quad (66)$$

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

$$V = \frac{T}{p} \sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}. \quad (67)$$

Для газов, у которых значения  $k$  равны, температуру смеси определяют по формуле (64). Если газовые потоки, помимо одинаковых значений  $k$ , имеют также равные давления, то формулы (66) и (67) принимают вид

$$T = \frac{\sum_1^n V_i}{\sum_1^n \frac{V_i}{T_i}}; \quad (68)$$

$$V = T \sum_1^n \frac{V_i}{T_i}. \quad (69)$$

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

### Задачи

118. Найти часовой расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 25 МВт, если теплота сгорания топлива  $Q_p^0 = 33,85$  МДж/кг и известно, что на превращение тепловой энергии в механическую используется только 35% теплоты сожженного топлива.

Отв. 7,59 т/ч.

119. В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28 900 кДж/кг.

Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% теплоты, полученной при сгорании угля.

### Решение

Количество теплоты, превращенной в электрическую энергию за 20 ч работы,

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28\,900 \cdot 0,18 \text{ кДж.}$$

Эквивалентная ему электрическая энергия или работа

$$L = \frac{62 \cdot 1000 \cdot 28\,900 \cdot 0,18}{3600} = 89\,590 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Следовательно, средняя электрическая мощность станции

$$N = \frac{89\,590}{20} = 4479 \text{ кВт.}$$

120. Мощность турбогенератора 12 000 кВт, к. п. д. генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55° С?

Температура в машинном отделении равна 20° С; среднюю теплоемкость воздуха  $c_{pm}$  принять равной 1,0 кДж/(кг·К).

Отв. 10,3 кг/с.

121. Во многих странах за единицу количества теплоты принята так называемая британская тепловая единица (BTU), представляющая собой количество теплоты, необходимое для нагрева 1 английского фунта ( $1 \text{ lb} = 0,4536 \text{ кг}$ ) воды на  $1^\circ \text{ F}$ .

Выразить 1 BTU, 1 BTU/lb и 1 BTU/lb $^\circ \text{ F}$  соответственно в кДж, кДж/кг, кДж/(кг $\cdot$ К).

$$\begin{aligned} \text{Отв. } 1 \text{ BTU} &= 1,055 \text{ кДж}; \\ 1 \text{ BTU/lb} &= 2,326 \text{ кДж/кг}; \\ 1 \text{ BTU/lb}^\circ \text{ F} &= 4,187 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}. \end{aligned}$$

122. Теплота сгорания топлива, выражаемая в кДж/кг, может быть также выражена в кВт $\cdot$ ч/кг.

Принимая теплоту сгорания нефти равной 41 900 кДж/кг, каменного угля 29 300 кДж/кг, подмосковного бурого угля 10 600 кДж/кг, выразить теплоту сгорания перечисленных топлив в кВт $\cdot$ ч/кг.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } Q_{\text{нефти}} &= 11,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}; \\ Q_{\text{угля}} &= 8,14 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}; \quad Q_{\text{б. у}} = \\ &= 2,94 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}. \end{aligned}$$

123. Использование атомной энергии для производства тепловой или электрической энергии в техническом отношении означает применение новых видов топлив — ядерных горючих. Количество энергии, выделяющейся при расщеплении 1 кг ядерных горючих, может быть условно названо их теплотой сгорания. Для урана эта величина равна 22,9 млн. кВт $\cdot$ ч/кг.

Во сколько раз уран как горючее эффективнее каменного угля с теплотой сгорания 27 500 кДж/кг?

Отв. В 3 млн. раз.

124. Важнейшим элементом атомной электростанции является реактор, или атомный котел. Тепловой мощностью реактора называют полное количество теплоты, которое выделяется в нем в течение 1 ч. Обычно эту мощность выражают в киловаттах.

Определить годовой расход ядерного горючего для реактора с тепловой мощностью 500 000 кВт, если теплота сгорания применяемого для расщепления урана равна  $22,9 \cdot 10^6$  кВт $\cdot$ ч/кг, а число часов работы реактора составляет 7000.

Отв.  $B = 153 \text{ кг}$  в год.

125. Первая в мире атомная электростанция, построенная в СССР, превращает атомную энергию, выделяющуюся при реакциях цепного деления ядер урана, в тепловую, а затем в электрическую энергию. Тепловая мощность реактора атомной электростанции равна 30 000 кВт, а электрическая мощность электростанции составляет при этом 5000 кВт.

Найти суточный расход урана, если выработка электроэнергии за сутки составила 120 000 кВт·ч. Теплоту сгорания урана принять равной  $22,9 \cdot 10^6$  кВт·ч/кг. Определить также, какое количество угля, имеющего теплоту сгорания 25 800 кДж/кг, потребовалось бы для выработки того же количества электроэнергии на тепловой электростанции, если бы к. п. д. ее равнялся к. п. д. атомной электростанции.

$$\text{Отв. } V_{\text{урана}} = 31 \text{ г/сут; } V_{\text{угля}} = 100 \text{ т/сут.}$$

126. Теплоемкость газа при постоянном давлении опытным путем может быть определена в проточном калориметре. Для этого через трубопровод пропускают

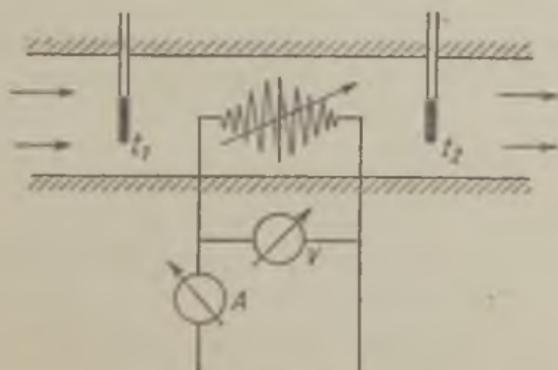


Рис. 8

исследуемый газ и нагревают его электронагревателем (рис. 8). При этом измеряют количество газа, пропускаемое через трубопровод, температуры газа перед и за электронагревателем и расход электроэнергии. Давление воздуха в трубопроводе принимают неизменным.

Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом проточного калориметрирования, если расход воздуха через трубопровод  $M = 690$  кг/ч, мощность электронагревателя  $N_{\text{эл}} = 0,5$  кВт, температура

воздуха перед электронагревателем  $t_1 = 18^\circ \text{C}$ , а температура воздуха за электронагревателем  $t = 20,6^\circ \text{C}$ .

Отв.  $c_{\text{пр}} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

127. Метод проточного калориметрирования, описанный в предыдущей задаче, может быть также использован для определения количества газа или воздуха, протекающего через трубопровод.

Найти часовой расход воздуха  $M$  кг/ч, если мощность электронагревателя  $N_{\text{эл}} = 0,8 \text{ кВт}$ , а приращение температуры воздуха  $t_2 - t_1 = 1,8^\circ \text{C}$ . Определить также скорость воздуха  $c$  в трубопроводе за электронагревателем, если давление воздуха  $120 \text{ кПа}$ , температура его за электронагревателем  $20,2^\circ \text{C}$ , а диаметр трубопровода  $0,125 \text{ м}$ .

Отв.  $M = 1600 \text{ кг/ч}$ ;  $c = 25,4 \text{ м/с}$ .

128. При испытании двигателей внутреннего сгорания широким распространением пользуются так называемые гидротормоза. Работа двигателя при торможении превращается в теплоту трения, и для уменьшения нагрева тормозного устройства применяют водяное охлаждение.

Определить часовой расход воды на охлаждение тормоза, если мощность двигателя  $N = 33 \text{ кВт}$ , начальная температура воды  $t_0 = 15^\circ \text{C}$ , конечная  $t_1 = 60^\circ \text{C}$ ; принять, что вся теплота трения передается охлаждающей воде.

Отв.  $M_{\text{воды}} = 632 \text{ кг/ч}$ .

129. При испытании нефтяного двигателя было найдено, что удельный расход топлива равен  $231 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ .

Определить эффективный к. п. д. этого двигателя, если теплота сгорания топлива  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 41\,000 \text{ кДж/кг}$  ( $9800 \text{ ккал/кг}$ ).

Отв.  $\eta_{\text{е}} = 0,38$ .

130. Паросиловая установка мощностью  $4200 \text{ кВт}$  имеет к. п. д.  $\eta_{\text{ст}} = 0,20$ .

Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 25\,000 \text{ кДж/кг}$ .

Р е ш е н и е

Из формулы (49)

$$b = \frac{3600}{\eta_{\text{ст}} Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{3600}{0,2 \cdot 25\,000} = 0,72 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Тогда часовой расход топлива составит

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

131. В котельной электростанции за 10 ч работы сожжено 100 т каменного угля с теплотой сгорания  $Q_{II}^{\text{н}} = 29\,300 \text{ кДж/кг}$ .

Найти количество выработанной электроэнергии и среднюю мощность станции, если к. п. д. процесса преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 20%.

$$\text{Отв. } 162\,780 \text{ кВт}\cdot\text{ч}; N_{\text{ср}} = 16\,278 \text{ кВт.}$$

132. В сосуд, содержащий 5 л воды при температуре  $20^\circ \text{C}$ , помещен электронагреватель мощностью 800 Вт.

Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагревалась до температуры кипения  $100^\circ \text{C}$ . Потерями теплоты сосуда в окружающую среду пренебречь.

$$\text{Отв. } \tau = 30 \text{ мин.}$$

133. В калориметр, содержащий 0,6 кг воды при  $t = 20^\circ \text{C}$ , опускают стальной образец массой в 0,4 кг, нагретый до  $200^\circ \text{C}$ . Найти теплоемкость стали, если повышение температуры воды составило  $12,5^\circ$ . Массой собственно калориметра пренебречь.

$$\text{Отв. } c = 0,469 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

134. Свинцовый шар падает с высоты  $h = 100 \text{ м}$  на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в теплоту. Одна треть образовавшейся теплоты передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание шара. Теплоемкость свинца  $c = 0,126 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Определить повышение температуры шара.

$$\text{Отв. } \Delta t = 5,2^\circ.$$

135. Автомобиль массой 1,5 т останавливается под действием тормозов при скорости 40 км/ч.

Вычислить конечную температуру тормозов  $t_2$ , если их масса равна 15 кг, начальная температура  $t_1 = 10^\circ \text{C}$ , а теплоемкость стали, из которой изготовлены тормозные части, равна  $0,46 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

$$\text{Отв. } t_2 = 23,4^\circ \text{C.}$$

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

*Отв.*  $\eta = 78,6\%$ .

137. В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание 200 кг стали на  $40^{\circ}\text{C}$  в течение 20 мин.

Определить вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять равной  $0,46\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

*Отв.* 3,07 кВт.

138. Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при переходе его от начального состояния  $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$  до конечного при  $t_2 = 50^{\circ}\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Ответ дать в кДж.

### Р е ш е н и е

Изменение внутренней энергии найдем по формуле (57):

$$\Delta u = c_{vm} (t_2 - t_1).$$

Пользуясь табл. 5, получим для воздуха

$$(c_{vm})_0^t = 0,7084 + 0,00009349t \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\begin{aligned} (c_{vm})_{50}^{300} &= 0,7084 + 0,00009349(50 + 300) = \\ &= 0,7411 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\Delta u = 0,7411(50 - 300) = -185,3 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

139. Найти изменение внутренней энергии  $2\text{ м}^3$  воздуха, если температура его понижается от  $t_1 = 250^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = 70^{\circ}\text{C}$ . Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,6\text{ МПа}$ .

*Отв.*  $\Delta U = -1063\text{ кДж}$ .

140. К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне  $100\text{ кДж}$  теплоты. Величина произведенной работы при этом составляет  $115\text{ кДж}$ .

Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно  $0,8\text{ кг}$ .

*Отв.*  $\Delta U = -18,2\text{ кДж}$ .

141.  $2 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $0,5 \text{ МПа}$  и температуре  $50^\circ \text{С}$  смешиваются с  $10 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $0,2 \text{ МПа}$  и температуре  $100^\circ \text{С}$ .

Определить давление и температуру смеси.

Отв.  $t_{\text{см}} = 82^\circ \text{С}$ ;  $p_{\text{см}} = 0,25 \text{ МПа}$ .

142. В двух разобренных между собой сосудах  $A$  и  $B$  (рис. 9) содержатся следующие газы: в сосуде  $A$  —  $50 \text{ л}$  азота при давлении  $p_1 = 2 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 =$

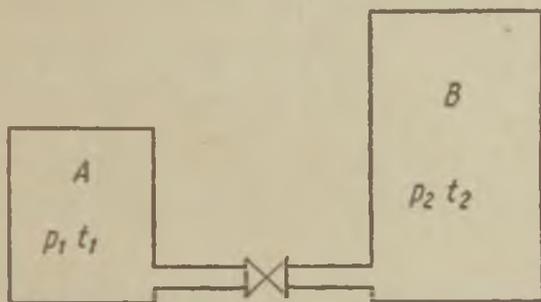


Рис. 9

$= 200^\circ \text{С}$ , в сосуде  $B$  —  $200 \text{ л}$  углекислого газа при давлении  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$  и температуре  $t_2 = 600^\circ \text{С}$ .

Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

### Решение

Температуру смеси определяем по формуле (62)

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{k_i - 1}}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{(k_i - 1) T_i}}$$

Значения  $k$  для азота и углекислоты находим из табл. VI и IX:

$$k_{N_2, 200} = \frac{c_{p200}}{c_{v200}} = \frac{29,471}{21,156} = 1,39;$$

$$k_{CO_2, 600} = \frac{c_{p600}}{c_{v600}} = \frac{52,452}{44,137} = 1,19.$$

Следовательно,

$$T = \frac{\left( \frac{2 \cdot 0,05}{0,39} + \frac{0,5 \cdot 0,2}{0,19} \right) 10^6}{\left( \frac{2 \cdot 0,05}{0,39 \cdot 473} + \frac{0,5 \cdot 0,2}{0,19 \cdot 873} \right) 10^6} = \frac{2,53 + 5,27}{\frac{2,53}{473} + \frac{5,27}{873}} =$$

$$= \frac{7,8}{0,0114} = 684 \text{ K} = 411^\circ \text{ C}.$$

Давление смеси получим, пользуясь формулой (63):

$$p = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^n \frac{p_i V_i}{T_i} = \frac{685}{0,25} \left( \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 10^6}{473} + \frac{0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^6}{873} \right) =$$

$$= \frac{685}{0,25} (21,1 + 11,4) = 0,89 \text{ МПа}.$$

143. При решении задач на смешение газов пользуются иногда формулами (64) и (65) в качестве приближенных. Решите предыдущую задачу, пользуясь приближенными формулами, и сравните полученные результаты по точным и приближенным формулам.

$$\text{Отв. } t = 341^\circ \text{ C}; p = 0,8 \text{ МПа}; \epsilon_p =$$

$$= 10,1\%; \epsilon_T = 17\%.$$

144. Три разобренных между собой сосуда *A*, *B*, *C* заполнены различными газами. В сосуде *A* имеющем объем 10 л, находится сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$  при давлении 6 МПа и температуре  $100^\circ \text{ C}$ , в сосуде *B* с объемом 5 л — азот при давлении 0,4 МПа и температуре  $200^\circ \text{ C}$  и в сосуде *C* с объемом 5 л — азот при давлении 2 МПа и температуре  $300^\circ \text{ C}$ .

Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов между собой. Считать, что теплообмен со средой отсутствует.

$$\text{Отв. } p_2 = 2,18 \text{ МПа}, t_2 = 118^\circ \text{ C}.$$

145. В сосуде *A* находится 100 л водорода при давлении 1,5 МПа и температуре  $1200^\circ \text{ C}$ , а в сосуде *B* — 50 л азота при давлении 3 МПа и температуре  $200^\circ \text{ C}$ .

Найти давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

$$\text{Отв. } p = 2,08 \text{ МПа}; t = 467^\circ \text{ C}.$$

146. В сборном газоходе котельной смешиваются уходящие газы трех котлов, имеющие атмосферное давление. Для упрощения принимается, что эти газы имеют одинаковый состав, а именно:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 11,8\%; \text{O}_2 = 6,8\%; \text{N}_2 = 75,6\%; \\ \text{H}_2\text{O} &= 5,8\%. \end{aligned}$$

Часовые расходы газов составляют

$$V_1 = 7100 \text{ м}^3/\text{ч}; V_2 = 2600 \text{ м}^3/\text{ч}; V_3 = 11\,200 \text{ м}^3/\text{ч},$$

а температуры газов соответственно

$$t_1 = 170^\circ \text{ C}; t_2 = 220^\circ \text{ C}; t_3 = 120^\circ \text{ C}.$$

Определить температуру газов после смешения и их объемный расход через дымовую трубу при этой температуре.

$$\text{Отв. } t = 147^\circ \text{ C}; V = 20\,900 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

147. Уходящие газы из трех паровых котлов при давлении 0,1 МПа смешиваются в сборном газоходе и через дымовую трубу удаляются в атмосферу. Объемный состав уходящих газов из отдельных котлов следующий: из первого

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 10,4\%; \text{O}_2 = 7,2\%; \text{N}_2 = 77,0\%; \\ \text{H}_2\text{O} &= 5,4\%; \end{aligned}$$

из второго

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 11,8\%; \text{O}_2 = 6,9\%; \text{N}_2 = 75,6\%; \\ \text{H}_2\text{O} &= 5,8\%; \end{aligned}$$

из третьего

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 12,0\%; \text{O}_2 = 4,1\%; \text{N}_2 = 77,8\%; \\ \text{H}_2\text{O} &= 6,1\%. \end{aligned}$$

Часовые расходы газов составляют

$$M_1 = 12\,000 \text{ кг/ч}; M_2 = 6500 \text{ кг/ч}; M_3 = 8400 \text{ кг/ч},$$

а температуры газов соответственно

$$t_1 = 130^\circ \text{ C}; t_2 = 180^\circ \text{ C}; t_3 = 200^\circ \text{ C}.$$

Определить температуру уходящих газов после смешения в сборном газоходе. Принять, что молярные теплоемкости этих газов одинаковы.

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

148. В газоходе смешиваются три газовых потока, имеющих одинаковое давление, равное 0,2 МПа. Первый поток представляет собой азот с объемным расходом  $V_1 = 8200 \text{ м}^3/\text{ч}$  при температуре  $200^\circ \text{С}$ , второй поток — двуокись углерода с расходом  $7600 \text{ м}^3/\text{ч}$  при температуре  $500^\circ \text{С}$  и третий поток — воздух с расходом  $6400 \text{ м}^3/\text{ч}$  при температуре  $800^\circ \text{С}$ .

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

$$\text{Отв. } t_1 = 423^\circ \text{С}; V = 23\,000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

149. Продукты сгорания из газохода парового котла в количестве  $400 \text{ кг/ч}$  при температуре  $900^\circ \text{С}$  должны быть охлаждены до  $500^\circ \text{С}$  и направлены в сушильную установку. Газы охлаждаются смешением газового потока с потоком воздуха при температуре  $20^\circ \text{С}$ . Давление в обоих газовых потоках одинаковое.

Определить часовой расход воздуха, если известно, что  $R_{\text{газ}} = R_{\text{возд}}$ . Теплоемкость продуктов сгорания принять равной теплоемкости воздуха.

$$\text{Отв. } M_{\text{возд}} = 366 \text{ кг/ч}.$$

## Глава VI

### ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Основными термодинамическими процессами являются:

1) процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянном объеме газа ( $v = \text{const}$ ) — изохорный процесс;

2) процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ) — изобарный процесс;

3) процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянной температуре ( $t = \text{const}$ ) — изотермический процесс;

4) процесс без сообщения или отнятия теплоты извне ( $dq = 0$ ) — адиабатный процесс;

5) процесс, в котором изменение параметров подчиняется уравнению

$$pv^m = \text{const},$$

где  $m$  — величина, постоянная для данного процесса, — политропный процесс.

#### ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

В диаграмме  $pv$  этот процесс изображается прямой  $1-2$ , параллельной оси ординат. Уравнение прямой  $1-2$  (рис. 10), называемой изохорой,

$$v = \text{const}.$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (70)$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u_v = q_v = c_{vm}(t_2 - t_1). \quad (71)$$

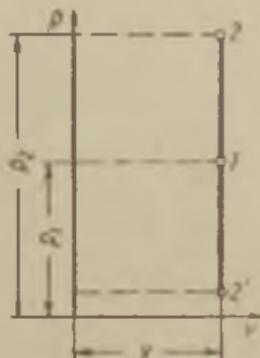


Рис. 10

Если в процессе участвует  $M$  кг или  $V_n$  м<sup>3</sup> газа, то количество теплоты или изменение внутренней энергии газа

$$Q_v = \Delta U_v = Mc_{vm}(t_2 - t_1) = V_n c'_{vm}(t_2 - t_1), \quad (72)$$

где  $V_n$  — количество газа в м<sup>3</sup> при нормальных условиях.

Если количество теплоты необходимо подсчитать, пользуясь нелинейной зависимостью теплоемкости от температуры, то следует пользоваться формулой (41) или (43).

В изохорном процессе газ работы не совершает ( $L = 0$ ).

### Задачи

150. Газ при давлении  $p_1 = 1$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  нагревается при постоянном объеме до  $t_2 = 300^\circ \text{C}$ . Найти конечное давление газа.

Отв.  $p_2 = 1,956$  МПа.

151. В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,3$  м<sup>3</sup> содержится 2,75 кг воздуха при давлении  $p_1 = 0,8$  МПа и температуре  $t_1 = 25^\circ \text{C}$ .

Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до  $0^\circ \text{C}$ .

Отв.  $p_2 = 0,732$  МПа,  $v_2 = 0,109$  м<sup>3</sup>/кг.

152. В закрытом сосуде заключен газ при разрежении  $p_1 = 6667$  Па и температуре  $t_1 = 70^\circ \text{C}$ . Показание барометра — 101 325 Па.

До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало  $p_2 = 13\,332$  Па?

### Решение

Так как процесс происходит при  $v = \text{const}$ , то согласно формуле (70)

$$\frac{101\,325 - 6667}{101\,325 - 13\,332} = \frac{273 + 70}{T_2}.$$

Отсюда

$$T_2 = \frac{87\,993 \cdot 343}{94\,658} = 318,8 \text{ К}; t_2 = 45,8^\circ \text{C}.$$

153. В закрытом сосуде заключен газ при давлении  $p_1 = 2,8$  МПа и температуре  $t_1 = 120^\circ \text{C}$ .

Чему будет равно конечное давление  $p_2$ , если температура снизится до  $t_2 = 25^\circ \text{C}$ ?

Отв.  $p_2 = 2,12 \text{ МПа}$ .

154. В закрытом сосуде находится газ при разрежении  $p_1 = 2666 \text{ Па}$  и температуре  $t_1 = 10^\circ \text{C}$ . Показание барометра —  $100 \text{ кПа}$ . После охлаждения газа разрежение стало равным  $20 \text{ кПа}$ .

Определить конечную температуру газа  $t_2$ .

Отв.  $t_2 = -40,4^\circ \text{C}$ .

155. До какой температуры  $t_2$  нужно нагреть газ при  $v = \text{const}$ , если начальное давление газа  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$  и температура  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ , а конечное давление  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ .

Отв. До  $t_2 = 459,5^\circ \text{C}$ .

156. В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,6 \text{ м}^3$  содержится воздух при давлении  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет  $105 \text{ кДж}$ .

Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

### Р е ш е н и е

Пользуясь уравнением состояния, находим массу воздуха в сосуде:

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

Количество теплоты, отводимой от воздуха в процессе, определяется уравнением (72):

$$Q = Mc_{vm} (t_2 - t_1),$$

откуда

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{Q}{Mc_{vm}} + t_1 = \frac{-105}{3,57 \cdot 0,723} + 20 = \\ &= -40,7 + 20 = -20,7^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

Значение  $c_{vm} = 0,723$  получено из выражения  $c_{vm} = \frac{\mu c_{vm}}{\mu} = \frac{20,93}{28,96}$  (для двухатомных газов).

Из соотношения параметров в изохорном процессе имеем

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,5 \frac{273 - 20,7}{293} = 0,43 \text{ МПа.}$$

157. В закрытом сосуде емкостью  $V = 0,5 \text{ м}^3$  содержится двуокись углерода при  $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 527^\circ \text{ С}$ .

Как изменится давление газа, если от него отнять 420 кДж? Принять зависимость  $c = f(t)$  линейной.

*Отв.*  $p_2 = 0,42 \text{ МПа.}$

158. Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 0,8 МПа и температуре  $30^\circ \text{ С}$ .

Определить количество теплоты, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при  $v = \text{const}$  до 1,6 МПа. Принять зависимость  $c = f(t)$  нелинейной.

### Решение

Из соотношения параметров изохорного процесса получим

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

$$t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{ С.}$$

По уравнению (41)  $q_v = c_{vm2} t_2 - c_{vm1} t_1$ .

Пользуясь табл. XII, находим

$$c_{vm1} = 0,7173 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; c_{vm2} = 0,7351 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Следовательно,

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

Массу воздуха, находящегося в резервуаре, определяем из уравнения (16):

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг,}$$

а сообщенное ему количество теплоты

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

159. До какой температуры нужно охладить  $0,8 \text{ м}^3$  воздуха с начальным давлением 0,3 МПа и температурой

15° С, чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 0,1 МПа? Какое количество теплоты нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

$$\text{Отв. До } t_2 = -177^\circ \text{ С; } Q = -402 \text{ кДж.}$$

160. Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении  $p_1 = 12,5$  МПа.

Определить конечное давление кислорода и количество сообщенной ему теплоты, если начальная температура кислорода  $t_1 = 10^\circ \text{ С}$ , а конечная  $t_2 = 30^\circ \text{ С}$ . Теплоемкость кислорода считать постоянной.

$$\text{Отв. } p_2 = 13,4 \text{ МПа; } Q = 133 \text{ кДж.}$$

161. В цилиндре диаметром 0,4 м содержится 80 л воздуха при давлении  $p_1 = 0,29$  МПа и температуре  $t_1 = 15^\circ \text{ С}$ .

Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, до какой величины должна увеличиться сила, действующая на поршень, чтобы последний оставался неподвижным, если к воздуху подводятся 83,7 кДж теплоты.

$$\text{Отв. } F = 51,1 \text{ кН.}$$

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

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

### Р е ш е н и е

Так как конечное давление газа неизвестно, то для определения конечной температуры нельзя воспользоваться соотношением параметров в изохорном процессе. Обратимся поэтому к выражению, определяющему количество отведенной теплоты в изохорном процессе. Согласно формуле (72)

$$Q_v = Mc_{vm} (t_2 - t_1).$$

В этом уравнении

$$Q_v = -436 \text{ кДж,}$$

а масса газа согласно формуле (16)

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

В пределах от  $527^\circ \text{C}$  до  $t_2$  согласно табл. 5 средняя теплоемкость углекислого газа

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

Подставляя соответствующие значения величин в уравнение 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 или, как говорят, подбором. Для этого задают значение  $t_2$ , после чего определяют теплоемкости  $c_{vm}$ , и, подставляя в уравнение для  $Q_v$ , проверяют, получается ли тождество. Очевидно, что только в этом случае выбранная температура  $t_2$  является правильной.

Указанным путем температура  $t_2$  получается равной  $276^\circ \text{C}$ .

163. В калориметрической бомбе емкостью  $300 \text{ см}^3$  находится кислород при давлении  $p_1 = 2,6 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 22^\circ \text{C}$ .

Найти температуру кислорода  $t_2$  после подвода к нему теплоты в количестве  $4,19 \text{ кДж}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Отв.  $t_2 = 593^\circ \text{C}$ .

### ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

В диаграмме  $p\nu$  этот процесс изображается прямой 1—2, параллельной оси абсцисс. Уравнение прямой 1—2 (рис. 11), называемой изобарой,

$$p = \text{const.}$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (73)$$

Работа 1 кг газа

$$l = p (v_2 - v_1), \quad (74)$$

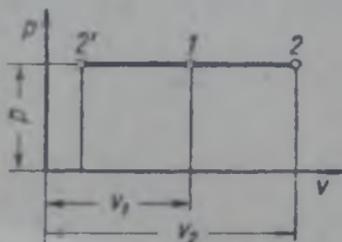


Рис. 11

или

$$l = R (T_2 - T_1). \quad (75)$$

Для  $M$  кг газа

$$L = Mp (v_2 - v_1) = p (V_2 - V_1), \quad (76)$$

или

$$L = MR (t_2 - t_1). \quad (77)$$

Если в процессе  $p = \text{const}$  участвует  $M$  кг или  $V_n$  м<sup>3</sup> газа, то количество теплоты

$$Q_p = Mc_{pm}(t_2 - t_1) = V_n c_{pm}^*(t_2 - t_1), \quad (78)$$

где  $V_n$  — количество газа в м<sup>3</sup> при нормальных условиях.

Если количество теплоты необходимо подсчитать, пользуясь нелинейной зависимостью теплоемкости от температуры, то следует пользоваться формулой (42) или (44).

Изменение внутренней энергии газа определяют по формуле (71) или (41).

### Задачи

**164.** Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы нагреть 2 м<sup>3</sup> воздуха при постоянном избыточном давлении  $p = 0,2$  МПа от  $t_1 = 100^\circ \text{C}$  до  $t_2 = 500^\circ \text{C}$ ? Какую работу при этом совершит воздух?

Давление атмосферы принять равным 101 325 Па.

### Решение

Согласно уравнению (42):

$$q_p = c_{pm2} t_2 - c_{pm1} t_1.$$

Пользуясь табл. XII, находим

$$c_{pm1} = 1,0061 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad c_{pm2} = 1,0387 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

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

Массу воздуха определяем из характеристического уравнения

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{(0,2 + 0,1013) 10^6 \cdot 2}{287 \cdot 373} = 5,63 \text{ кг}.$$

Таким образом,

$$Q_p = M q_p = 5,63 \cdot 418,7 = 2357 \text{ кДж.}$$

Количество теплоты можно получить не только по массе воздуха, но и по его объему. В этом случае уравнение (42) следует написать так:

$$q_p = c_{pm2}^* t_2 - c_{pm1}^* t_1.$$

Пользуясь табл. XII, получаем

$$c_{pm1}^* = (c_{pm}^*)_0^{100} = 1,3004 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_{pm2}^* = (c_{pm}^*)_0^{500} = 1,3427 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Тогда

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

Объем воздуха должен быть приведен к нормальным условиям. Согласно уравнению (22)

$$V_u = \frac{pV T_u}{T p_u} = \frac{0,3013 \cdot 2 \cdot 273}{373 \cdot 0,1013} = 4,35 \text{ м}^3.$$

Таким образом,

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

Работа газа по уравнению (77)

$$L = MR (t_2 - t_1) = 5,63 \cdot 287 \cdot 400 = 646,3 \text{ кДж.}$$

165. Определить количество теплоты, необходимое для нагревания  $2000 \text{ м}^3$  воздуха при постоянном давлении  $p = 0,5 \text{ МПа}$  от  $t_1 = 150^\circ \text{С}$  до  $t_2 = 600^\circ \text{С}$ . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

$$\text{Отв. } Q_p = 3937 \text{ МДж.}$$

166. В установке воздушного отопления внешний воздух при  $t_1 = -15^\circ \text{С}$  нагревается в калорифере при  $p = \text{const}$  до  $60^\circ \text{С}$ . Какое количество теплоты надо затратить для нагревания  $1000 \text{ м}^3$  наружного воздуха? Теплоемкость воздуха считать постоянной.

Давление воздуха принять равным  $101325 \text{ Па}$ .

$$\text{Отв. } 103 \text{ МДж.}$$

167. В цилиндре находится воздух при давлении  $p = 0,5 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 400^\circ \text{С}$ . От воздуха отнимается теплота при постоянном давлении таким

образом, что в конце процесса устанавливается температура  $t_2 = 0^\circ \text{C}$ . Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л.

Определить количество отнятой теплоты, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

### Р е ш е н и е

Количество отнятой теплоты по формуле (78)

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

Объем воздуха при нормальных условиях определим из выражения (22):

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

По табл. XII находим

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

Следовательно,

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

Это же количество теплоты на основании формулы (78) можно вычислить не только по объему воздуха, но и по его массе:

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

Массу воздуха определяем из характеристического уравнения

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

Из табл. XII находим

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

Следовательно,

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

Конечный объем получим из уравнения (73):

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

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = V_{\text{н}} c_{\text{вн}}^* (t_2 - t_1).$$

Пользуясь табл. XII, находим

$$c_{\text{вн}}^* = 0,9579 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

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

Работа, затраченная на сжатие, по формуле (76)

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

168. 0,2 м<sup>3</sup> воздуха с начальной температурой 18° С подогревают в цилиндре диаметром 0,5 м при постоянном давлении  $p = 0,2$  МПа до температуры 200° С.

Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченной теплоты, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } L &= 25\,000 \text{ Дж}; \quad h = 0,64 \text{ м}; \\ Q &= 88,3 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

169. Для использования отходящих газов двигателя мощностью  $N = 2500$  кВт установлен подогреватель, через который проходит 60 000 м<sup>3</sup>/ч воздуха при температуре  $t_1 = 15^\circ \text{С}$  и давлении  $p = 0,101$  МПа. Температура воздуха после подогревателя равна 75° С.

Определить, какая часть теплоты топлива использована в подогревателе? К. п. д. двигателя принять равным 0,33. Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

$$\text{Отв. } 17,4\%.$$

170. К 1 м<sup>3</sup> воздуха, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении 335 кДж теплоты. Объем воздуха при этом увеличивается до 1,5 м<sup>3</sup>.

Начальная температура воздуха равна 15° С.

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

$$\text{Отв. } t_2 = 159^\circ \text{С}; \quad L = 95,1 \text{ кДж}.$$

171. 2 м<sup>3</sup> воздуха с начальной температурой  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  расширяются при постоянном давлении до 3 м<sup>3</sup> вследствие сообщения газу 837 кДж теплоты.

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

$$\text{Отв. } t_2 = 159^\circ \text{C}; p = 0,24 \text{ МПа}; \\ L = 239 \text{ кДж.}$$

172. Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура газов  $t_{г1} = 300^\circ \text{C}$ , конечная  $t_{г2} = 160^\circ \text{C}$ ; расход газов равен 1000 кг/ч. Начальная температура воздуха составляет  $t_{в1} = 15^\circ \text{C}$ , а расход его равен 910 кг/ч.

Определить температуру нагретого воздуха  $t_{в2}$ , если потери воздухоподогревателя составляют 4%.

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

$$\text{Отв. } t_{в2} = 168,9^\circ \text{C.}$$

173. Определить, какая часть теплоты, подводимой к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая — на изменение внутренней энергии.

### Р е ш е н и е

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

$$dq = du + dl$$

может быть представлено в виде

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

Величина

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

определяет ту долю от всей подводимой к газу теплоты, которая превращается в работу расширения. Так как для идеального газа в процессе  $p = \text{const}$

$$du = c_v dt \text{ и } dq = c_p dt,$$

то

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{c_v dt}{c_p dt}.$$

Принимая  $k = 1,4$ , получаем

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

Следовательно, в изобарном процессе только 28,5% теплоты, подводимой к газу, превращается в работу. Вся остальная теплота, т. е. 71,5%, расходуется на увеличение внутренней энергии.

174. В цилиндре двигателя внутреннего сгорания находится воздух при температуре  $500^\circ\text{C}$ . Вследствие подвода теплоты конечный объем воздуха увеличился в 2,2 раза. В процессе расширения воздуха давление в цилиндре практически оставалось постоянным.

Найти конечную температуру воздуха и удельные количества теплоты и работы, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } t_2 &= 1428^\circ\text{C}; \quad q_p = \\ &= 1088,7 \text{ кДж/кг}; \quad l = 266,3 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

175. Воздух, выходящий из компрессора с температурой  $190^\circ\text{C}$ , охлаждается в охладителе при постоянном давлении  $p = 0,5 \text{ МПа}$  до температуры  $20^\circ\text{C}$ . При этих параметрах производительность компрессора равна  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Определить часовой расход охлаждающей воды, если она нагревается на  $10^\circ\text{C}$ .

$$\text{Отв. } 733 \text{ л/ч.}$$

176. К газообразным продуктам сгорания, находящимся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, подводится при постоянном давлении столько теплоты, что температура смеси поднимается с  $500$  до  $1900^\circ\text{C}$ . Состав газовой смеси следующий;  $m_{\text{CO}_2} = 15\%$ ;  $m_{\text{O}_2} = 5\%$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 6\%$ ;  $m_{\text{N}_2} = 74\%$ .

Найти количество теплоты, подведенной к  $1 \text{ кг}$  газообразных продуктов сгорания, считая теплоемкость нелинейно зависящей от температуры.

### Р е ш е н и е

Так как рассматриваемый процесс изобарный, то количество теплоты, участвующее в нем, на основании формулы (61) равно разности энтальпий конечного и начального состояний, т. е.

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Но по формуле (60)

$$i = c_{pm} t.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} q &= \sum_1^n c_{pm} m_i t_2 - \sum_1^n c_{pm} m_i t_1 = \\ &= (c_{pmCO_2} m_{CO_2} + c_{pmO_2} m_{O_2} + c_{pmH_2O} m_{H_2O} + \\ &\quad + c_{pmN_2} m_{N_2}) t_2 - (c_{pmCO_2} m_{CO_2} + \\ &\quad + c_{pmO_2} m_{O_2} + c_{pmH_2O} m_{H_2O} + c_{pmN_2} m_{N_2}) t_1. \end{aligned}$$

На основании табл. V, IX и X, VI получаем

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

177. Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав:  $CO_2 = 14\%$ ;  $O_2 = 6\%$ ;  $N_2 = 75\%$ ;  $H_2O = 5\%$ , нагревается при постоянном давлении от  $t_1 = 600^\circ C$  до  $t_2 = 2000^\circ C$ .

Определить количество теплоты, подведенной к 1 кг газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

$$\text{Отв. } q_p = 1841 \text{ кДж/кг.}$$

178. При сжигании в топке парового котла каменного угля объем продуктов сгорания составляет

$$V_{\text{в}} = 11,025 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

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 теплоты, теряемой с уходящими газами (на 1 кг топлива), если на выходе из котла температура газов равна  $180^\circ C$ , а температура окружающей среды  $20^\circ C$ . Давление продуктов сгорания принято равным атмосферному.

$$\text{Отв. } q_{\text{ух}} = 2418 \text{ кДж/кг.}$$

## ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Кривая изотермического процесса, называемая изотермой, в диаграмме  $p v$  изображается равнобокой гиперболой (рис. 12). Уравнение изотермы в координатах  $p v$

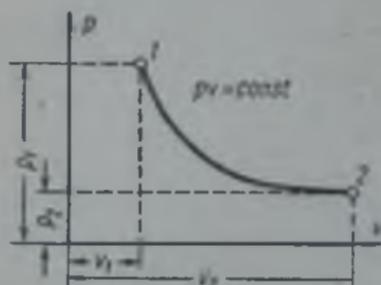


Рис. 12

$$p v = \text{const.}$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами определяется формулами:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}; \quad (79)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (80)$$

Работу 1 кг идеального газа находят из уравнений:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (81)$$

$$l = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (82)$$

$$l = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (83)$$

$$l = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (84)$$

Если в процессе участвуют  $M$  кг газа, то полученные из формул (81)—(84) значения нужно увеличить в  $M$  раз. Можно также для этого случая в формулах (83) и (84) заменить удельный объем  $v$  полным объемом  $V$ . Тогда получим

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (85)$$

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (86)$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то для идеального газа

$$\Delta u = c_{vm} (t_2 - t_1) = 0.$$

Количество теплоты, сообщаемой газу или отнимаемой от него,

$$q_t = l \quad (87)$$

или для  $M$  кг газа

$$Q_t = L. \quad (88)$$

Натуральный логарифм, входящий в формулы, может быть заменен десятичным по соотношению

$$\lg N = 2,303 \lg N.$$

### Задачи

179. 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  и начальном давлении  $p_1 = 0,1$  МПа сжимается изотермически до конечного давления  $p_2 = 1$  МПа.

Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество теплоты, отводимой от газа.

### Решение

Найдем начальный объем воздуха из уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 303}{0,1 \cdot 10^6} = 0,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как в изотермическом процессе

$$p_1 v_1 = p_2 v_2,$$

то конечный объем

$$v_2 = v_1 \frac{p_1}{p_2} = 0,87 \frac{1}{10} = 0,087 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха, получается из уравнения (82):

$$\begin{aligned} l &= RT \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,303RT \lg \frac{p_1}{p_2} = \\ &= -2,303 \cdot 287 \cdot 303 \lg 10 = -200 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Количество теплоты, отводимой от газа, равно работе, затраченной на сжатие. Следовательно,

$$q = -200 \text{ кДж/кг}.$$

180. Воздух в количестве 0,5 кг при  $p_1 = 0,5$  МПа и  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  расширяется изотермически до пятикратного объема.

Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество теплоты, сообщаемой газу.

$$\text{Отв. } p_2 = 0,1 \text{ МПа; } L = Q = 70 \text{ кДж.}$$

181. Для осуществления изотермического сжатия  $0,8 \text{ кг}$  воздуха при  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t = 25^\circ \text{C}$  затрачена работа в  $100 \text{ кДж}$ .

Найти давление  $p_2$  сжатого воздуха и количество теплоты, которое необходимо при этом отвести от газа?

$$\text{Отв. } p_2 = 0,322 \text{ МПа; } Q = -90 \text{ кДж.}$$

182.  $8 \text{ м}^3$  воздуха при  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  сжимаются при постоянной температуре до  $0,81 \text{ МПа}$ .

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

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

183. При изотермическом сжатии  $0,3 \text{ м}^3$  воздуха с начальными параметрами  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 300^\circ \text{C}$  отводится  $500 \text{ кДж}$  теплоты.

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

$$\text{Отв. } V_2 = 0,057 \text{ м}^3; p_2 = 5,26 \text{ МПа.}$$

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

Определить мощность, полученную при изотермическом расширении воздуха в машине, если  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ .

$$\text{Отв. } L = 11,188 \text{ кВт.}$$

185. Воздух при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 27^\circ \text{C}$  сжимается в компрессоре до  $p_2 = 3,5 \text{ МПа}$ .

Определить величину работы  $L$ , затраченной на сжатие  $100 \text{ кг}$  воздуха, если воздух сжимается изотермически.

$$\text{Отв. } L = -30\,576 \text{ кДж.}$$

186. Построить в координатах  $p$  и  $v$  изотерму сжатия, если дана точка  $I$ , характеризующая начальное состояние газа (рис. 13).

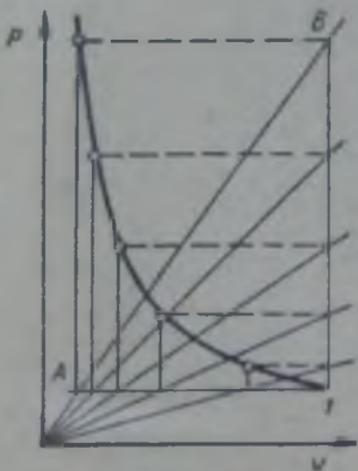


Рис. 13

## Решение

Проводим прямую  $IA$ , параллельную оси  $v$ , и  $IB$ , параллельную ось  $p$ . Из начала координат проводим ряд лучей и из точек пересечения каждого луча с прямыми  $IB$  и  $IA$  восстанавливаем перпендикуляры. Пересечение их дает точки, принадлежащие изотерме.

187. Воздуху в количестве  $0,1 \text{ м}^3$  при  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 200^\circ \text{С}$  сообщается  $125 \text{ кДж}$  теплоты; температура его при этом не изменяется.

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

$$\text{Отв. } p_2 = 0,286 \text{ МПа}; V_2 = 0,35 \text{ м}^3; \\ L = 125 \text{ кДж.}$$

188. При изотермическом сжатии  $2,1 \text{ м}^3$  азота, взятого при  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , от газа отводится  $335 \text{ кДж}$  теплоты.

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

$$\text{Отв. } V_2 = 0,426 \text{ м}^3; L = -335 \text{ кДж}; \\ p_2 = 0,49 \text{ МПа.}$$

189.  $0,5 \text{ м}^3$  кислорода при давлении  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 30^\circ \text{С}$  сжимаются изотермически до объема в 5 раз меньше начального.

Определить объем и давление кислорода после сжатия, работу сжатия и количество теплоты, отнятого у газа.

$$\text{Отв. } p_2 = 5 \text{ МПа}; V_2 = 0,1 \text{ м}^3; L = \\ = -805 \text{ кДж.}$$

190. Газ расширяется в цилиндре изотермически до объема в 5 раз больше первоначального.

Сравнить величины работ: полного расширения и расширения на первой половине хода поршня.

$$\text{Отв. } \frac{L_2}{L_1} = 0,684.$$

191. Начальное состояние газа характеризуется параметрами:  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и  $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ . Построить изотерму расширения.

192. Начальное состояние газа определяется параметрами:  $p_1 = 0,05 \text{ МПа}$  и  $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$ . Построить изотерму сжатия.

193. 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:

$$l_1 = R_1 T \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$l_2 = R_2 T \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$l_3 = R_3 T \ln \frac{p_2}{p_1} \text{ и т. д.,}$$

поэтому

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

т. е. работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

194. 10 кг воздуха при давлении  $p_1 = 0,12$  МПа и температуре  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  сжимаются изотермически; при этом в результате сжатия объем увеличивается в 2,5 раза.

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

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

### АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

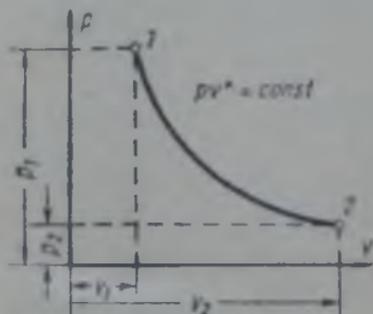


Рис. 14

Уравнение адиабаты в системе координат  $pv$  (рис. 14) при постоянной теплоемкости ( $c_v = \text{const}$ ) для идеального газа

$$pv^k = \text{const},$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  — показатель адиабаты.

Зависимости между начальными и конечными параметрами процесса:

между  $p$  и  $v$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k, \quad (89)$$

между  $T$  и  $v$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad (90)$$

между  $p$  и  $T$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (91)$$

Работу 1 кг газа находят по следующим формулам:

$$l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2); \quad (92)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right]; \quad (93)$$

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2); \quad (94)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (95)$$

Для определения работы  $M$  кг газа нужно в формулах (92), (93) и (95) заменить удельный объем  $v$  общим объемом  $V$  газа. Тогда получим

$$L = \frac{1}{k-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2); \quad (96)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right]; \quad (97)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (98)$$

Формула (94) для  $M$  кг газа примет следующий вид:

$$L = \frac{MR}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (99)$$

Уравнение первого закона для адиабатного процесса имеет вид

$$0 = du + dl,$$

следовательно,

$$du = -dl$$

или

$$\Delta u = -l, \quad (100)$$

т. е. изменение внутренней энергии газа и работа адиабатного процесса равны по величине и противоположны по знаку.

Изменение внутренней энергии идеального газа в адиабатном процессе может быть также выражено уравнением

$$\Delta u = c_{vm} (t_2 - t_1). \quad (101)$$

### Задачи

195. 1 кг воздуха при начальной температуре  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  и давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  сжимается адиабатно до конечного давления  $p_2 = 1 \text{ МПа}$ .

Определить конечный объем, конечную температуру и затрачиваемую работу.

### Решение

Из соотношения параметров в адиабатном процессе по уравнению (91) 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

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

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

$$N = 1,931;$$

$$T_2 = 303 \cdot 1,931 = 585 \text{ К}; \quad t_2 = 312^\circ \text{C}.$$

Значение величины  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$  можно взять из табл. XIX. Как видно из этой таблицы, для адиабатного сжатия при  $\frac{p_2}{p_1} = 10$  величина  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1,931$ .

Затраченная работа по уравнению (94)

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

Конечный объем определяется из уравнения состояния

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

196. 1 кг воздуха при температуре  $t_i = 15^\circ \text{C}$  и начальном давлении  $p_i = 0,1 \text{ МПа}$  адиабатно сжимается до  $0,8 \text{ МПа}$ .

Найти работу, конечный объем и конечную температуру.

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

197. Воздух при давлении  $p_i = 0,45 \text{ МПа}$ , расширяясь адиабатно до  $0,12 \text{ МПа}$ , охлаждается до  $t_2 = -45^\circ \text{C}$ .

Определить начальную температуру и работу, совершенную 1 кг воздуха.

$$\text{Отв. } t_i = 61^\circ \text{C}; l = 75,3 \text{ кДж/кг.}$$

198. 1 кг воздуха, занимающий объем  $v_i = 0,0887 \text{ м}^3/\text{кг}$  при  $p_i = 1 \text{ МПа}$ , расширяется до 10-кратного объема.

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

$$\text{Отв. 1) } T = \text{const}; p_2 = 0,1 \text{ МПа}; \\ l = 204 \text{ кДж/кг}; 2) dQ = 0; p_2 = \\ = 0,04 \text{ МПа}; l = 133,5 \text{ кДж/кг.}$$

199. Воздух при температуре  $t_i = 25^\circ \text{C}$  адиабатно охлаждается до  $t_2 = -55^\circ \text{C}$ ; давление при этом падает до  $0,1 \text{ МПа}$ .

Определить начальное давление и работу расширения 1 кг воздуха.

$$\text{Отв. } p_i = 0,3 \text{ МПа}; l = 57,4 \text{ кДж/кг.}$$

200.  $0,8 \text{ м}^3$  углекислого газа при температуре  $t_1 = 20^\circ \text{С}$  и давлении  $p_1 = 0,7 \text{ МПа}$  адиабатно расширяются до трехкратного объема.

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

$$\text{Отв. } p_2 = 0,17 \text{ МПа}; t_2 = -57,6^\circ \text{С}; \\ L = 535,7 \text{ кДж.}$$

201. В газовом двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на  $200^\circ \text{С}$  ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 70^\circ \text{С}$ . Показатель адиабаты  $k = 1,36$ ,  $R = 314 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , температура самовоспламенения равна  $650^\circ \text{С}$ .

Определить величину работы сжатия и степень сжатия  $\epsilon = v_1/v_2$ .

### Р е ш е н и е

Из соотношения параметров в адиабатном процессе [формула (90)] имеем

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

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

Работа сжатия по уравнению (94)

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

202. До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси?

Начальные параметры:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 15^\circ \text{С}$ . Температура воспламенения смеси  $t_2 = 550^\circ \text{С}$ ;  $k = 1,39$ .

$$\text{Отв. } p_2 = 0,42 \text{ МПа.}$$

203. 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  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 100^\circ \text{С}$ .

## Решение

Конечную температуру определяем по формуле (90):

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 373 \cdot 14^{0.4} = \\ &= 373 \cdot 2,86 = 1067 \text{ К.} \end{aligned}$$

Конечное давление находим из уравнения (91):

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,1 \left( \frac{1067}{373} \right)^{\frac{1.4}{0.4}} = \\ &= 0,1 \cdot 2,86^{3.5} = 4 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

204. Работа, затраченная на адиабатное сжатие 3 кг воздуха, составляет 471 кДж. Начальное состояние воздуха характеризуется параметрами:  $t_1 = 15^\circ \text{C}$ ;  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ .

Определить конечную температуру и изменение внутренней энергии.

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

205. В баллоне емкостью 100 л находится воздух при давлении  $p_1 = 5 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Давление окружающей среды  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ .

Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и по адиабате. Найти 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 (86):

$$\begin{aligned} L &= p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = \\ &= 2,303 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot \lg 5 = 1956 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Конечный объем воздуха

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} = 0,1 \cdot 50 = 5 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$p_2 (V_2 - V_1) = 0,1 \cdot 10^6 (5 - 0,1) = 490 \text{ кДж.}$$

Таким образом, полезная работа воздуха  $1956 - 490 = 1466$  кДж.

2. Работу адиабатного расширения найдем по формуле (98):

$$\begin{aligned} L_{ад} &= \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \\ &= \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0,1}{0,4} \left[ 1 - \left( \frac{0,1}{5} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] = \\ &= 1\,250\,000 (1 - 0,02^{0,386}) = 1\,250\,000 \cdot 0,672 = \\ &= 840\,000 \text{ Дж} = 840 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Конечный объем воздуха

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

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$p_2 (V_2 - V_1) = 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1,536 = 153,6 \text{ кДж,}$$

и, таким образом, полезная работа воздуха составит  $840 - 153,6 = 686,4$  кДж.

Минимальная температура определяется из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}; \quad T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \\ &= 293 \cdot 0,0611^{0,4} = 293 \cdot 0,327 = 96 \text{ К} = -177^\circ \text{С.} \end{aligned}$$

206. В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа 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 принять равным 1,38.

Отв.  $p_2 = 1,54$  МПа;  $t_2 = 412^\circ \text{C}$ .

207. В двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимается выше температуры воспламенения нефти.

Какое минимальное давление должен иметь воздух в конце процесса сжатия, если температура воспламенения нефти равна  $800^\circ \text{C}$ ? Во сколько раз при этом уменьшится объем воздуха?

Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,1$  МПа, начальная температура воздуха  $t_1 = 80^\circ$ . Сжатие воздуха считать адиабатным.

Отв.  $p_2 = 4,9$  МПа;  $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = 16$ .

208. 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.

### Р е ш е н и е

Величину работы полного расширения (рис. 15) находим по уравнению (97):

$$l_1 = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_5} \right)^{k-1} \right].$$

Работа на первой половине поршня

$$l_2 = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right)^{k-1} \right].$$

Следовательно,

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right)^{k-1}}{1 - \left( \frac{V_1}{V_5} \right)^{k-1}} = \frac{1 - \left( \frac{1}{3} \right)^{0,4}}{1 - \left( \frac{1}{5} \right)^{0,4}} = 0,554.$$

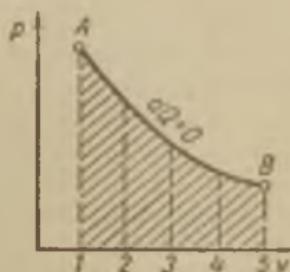


Рис. 15

209. Объем воздуха при адиабатном сжатии в цилиндре двигателя внутреннего сгорания уменьшается в 13 раз. Начальная температура воздуха перед сжатием  $t_1 = 77^\circ \text{C}$ , а начальное давление  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$ .

Определить температуру и давление воздуха после сжатия.

$$\text{Отв. } t_2 = 703^\circ \text{C}; \quad p_2 = 3,27 \text{ МПа.}$$

210. 2 кг воздуха при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления  $p_2 = 0,7 \text{ МПа}$ .

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

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

211. 1 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 0,095 МПа и начальной температуре  $10^\circ \text{C}$  сжимается по адиабате до 0,38 МПа.

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

$$\text{Отв. } t_2 = 148^\circ \text{C}; \quad V_2 = 0,373 \text{ м}^3; \\ L = -117,5 \text{ кДж.}$$

212. Из сосуда, содержащего углекислоту при давлении 1,2 МПа и температуре  $20^\circ \text{C}$ , вытекает  $\frac{2}{3}$  содержимого.

Вычислить конечное давление и температуру, если в процессе истечения не происходит теплообмена со средой ( $k$  принять равным 1,28).

### Решение

Если из сосуда вытекает  $\frac{2}{3}$  содержимого, то удельный объем оставшейся в сосуде углекислоты возрастает втрое. Поэтому

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

Следовательно,

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

$$t_2 = -57,6^\circ \text{C.}$$

Конечное давление

$$p_2 = p_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = \frac{1,2}{4,081} = 0,29 \text{ МПа.}$$

Это давление можно также определить из уравнения

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

отсюда

$$p_2 = p_1 \frac{v_1}{v_2} \frac{T_2}{T_1} = 1,2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1,36} = 0,29 \text{ МПа.}$$

213. Воздух при температуре  $127^\circ \text{C}$  изотермически сжимается так, что объем его становится равным  $\frac{1}{4}$  начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления.

Найти температуру воздуха в конце адиабатного расширения. Представить процесс расширения и сжатия воздуха в диаграмме  $p, v$ .

$$\text{Отв. } t_2 = -4^\circ \text{C.}$$

214. Воздушный буфер состоит из цилиндра, плотно закрытого подвижным поршнем. Длина цилиндра 50 см, а диаметр 20 см. Параметры воздуха, находящегося в цилиндре, соответствуют параметрам окружающей среды:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ .

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

### Р е ш е н и е

Начальный объем воздуха

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

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

$$\begin{aligned} L &= \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right] = \\ &= \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,0157}{0,4} (1 - 0,5^{0,4}) = \frac{1570}{0,4} (1 - 1,91) = \\ &= - \frac{1570 \cdot 0,91}{0,4} = -3570 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Затрата работы для преодоления атмосферного давления составит

$$p_1(V_2 - V_1) = 0,1 \cdot 10^6 \left(-\frac{4}{5}\right) 0,0157 = 1256 \text{ Дж.}$$

Следовательно, аккумулированная в воздушном буфере энергия составит

$$3570 - 1256 = 2314 \text{ Дж.}$$

Температуру и давление в конце процесса определяют из соотношения параметров адиабатного процесса:

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

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

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = 0,1 \cdot 1,5^{1,4} = 0,95 \text{ МПа.}$$

215. 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 17^\circ\text{C}$  сжимается адиабатно до объема, составляющего  $\frac{1}{8}$  начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема.

Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

$$\text{Отв. } l = 67 \text{ кДж/кг.}$$

216. Воздух при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  должен быть охлажден посредством адиабатного расширения до температуры  $t_2 = -60^\circ\text{C}$ . Конечное давление воздуха при этом должно составлять 0,1 МПа.

Определить начальное давление воздуха  $p_1$  и удельную работу расширения  $l$ .

$$\text{Отв. } p_1 = 0,3 \text{ МПа; } l = 57,8 \text{ кДж/кг}$$

### ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС

Уравнение политропы в системе координат  $p v$  (рис. 16) при постоянной теплоемкости

$$p v^m = \text{const},$$

где  $m$  — показатель политропы.

Характеристикой политропного процесса является величина

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q}, \quad (102)$$

которая может быть определена из выражения

$$\varphi = \frac{m-1}{m-k}, \quad (103)$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$ .

Пользуясь рис. 17, можно по величине показателя политропы определить ее относительное расположение

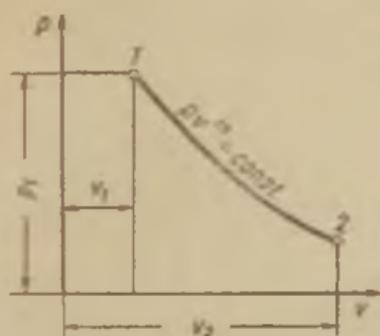


Рис. 16

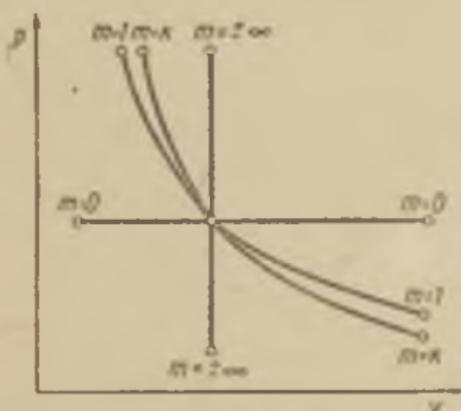


Рис. 17

в диаграмме  $pv$ , а также выяснить характер процесса, т. е. имеет ли место подвод или отвод теплоты и увеличение или уменьшение внутренней энергии газа.

#### Для процессов расширения

а)  $m < 1$  — теплота подводится ( $q > 0$ ), внутренняя энергия газа увеличивается ( $\Delta u > 0$ );

б)  $k > m > 1$  — теплота подводится ( $q > 0$ ), внутренняя энергия газа уменьшается ( $\Delta u < 0$ );

в)  $m > k$  — теплота отводится ( $q < 0$ ), внутренняя энергия газа уменьшается ( $\Delta u < 0$ ).

#### Для процессов сжатия

а)  $m < 1$  — теплота отводится, внутренняя энергия газа уменьшается;

б)  $k > m > 1$  — теплота отводится, внутренняя энергия газа увеличивается;

в)  $m > k$  — теплота подводится, внутренняя энергия газа увеличивается.

Зависимости между начальными и конечными параметрами процесса:

между  $p$  и  $v$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^m; \quad (104)$$

между  $T$  и  $v$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{m-1}; \quad (105)$$

между  $p$  и  $T$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}. \quad (106)$$

Работу 1 кг газа в политропном процессе определяют по следующим формулам:

$$l = \frac{1}{m-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2); \quad (107)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{m-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{m-1} \right]; \quad (108)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{m-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]; \quad (109)$$

$$l = \frac{R}{m-1} (T_1 - T_2). \quad (110)$$

Если количество теплоты, участвующей в процессе, известно, то работа может быть также вычислена по формуле

$$l = \frac{k-1}{k-m} q. \quad (111)$$

Для определения работы  $M$  кг газа нужно в формулах (107)—(109) заменить удельный объем  $v$  полным объемом газа  $V$ . Тогда

$$L = \frac{1}{m-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2); \quad (112)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{m-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{m-1} \right]; \quad (113)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{m-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]. \quad (114)$$

Формулы (110) и (111) для  $M$  кг имеют следующий вид:

$$L = \frac{MR}{m-1} (T_1 - T_2); \quad (115)$$

$$L = \frac{k-1}{k-m} Q. \quad (116)$$

Теплоемкость политропного процесса можно найти из уравнения (102)

$$c = \frac{c_p}{\varphi},$$

или, заменяя  $\varphi$  его значением из уравнения (103),

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

Количество теплоты, сообщаемой газу или отнимаемой от него:

$$q = c(t_2 - t_1) = c_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1); \quad (117)$$

$$Q = Mc(t_2 - t_1) = Mc_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1). \quad (118)$$

Величину  $Q$  можно также определить из формулы (116), если известна работа политропного процесса:

$$Q = L \frac{k-m}{k-1}. \quad (119)$$

Изменение внутренней энергии газа в политропном процессе находим или по общей для всех процессов формуле

$$\Delta u = c_{vm} (t_2 - t_1),$$

или по формулам

$$\Delta u = \varphi q = \frac{m-1}{m-k} q;$$

$$\Delta u = \frac{m-1}{1-k} l.$$

Показатель политропного процесса  $m$  определяется из уравнения

$$m = \frac{c_p - c}{c_p - c}.$$

Если известны значения двух параметров в начальном и конечном состоянии, то, пользуясь уравнениями (104)—(106), можно найти значение  $m$  из формул:

$$m = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{v_2}{v_1}}; \quad (120)$$

$$m - 1 = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{v_1}{v_2}}; \quad (121)$$

$$\frac{m - 1}{m} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}}. \quad (122)$$

Показатель политропы может быть также определен из уравнения (103). Решая его относительно  $m$ , получаем

$$m = \frac{k\varphi - 1}{\varphi - 1}. \quad (123)$$

В табл. XIX для облегчения расчетов приведены наиболее часто встречающиеся значения величин

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{и} \quad \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{m-1}{m}}.$$

### Задачи

217. 1 кг воздуха при  $p_1 = 0,5$  МПа и  $t_1 = 111^\circ \text{C}$  расширяется политропно до давления  $p_2 = 0,1$  МПа.

Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты и полученную работу, если показатель политропы  $m = 1,2$ .

### Решение

Определяем начальный объем воздуха:

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

Конечный объем воздуха находим из уравнения (104):

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

Конечную температуру проще всего получить из характеристического уравнения

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

Величину работы находим из уравнения (110):

$$l = \frac{R}{m-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{0,2} (384 - 293) = \\ = 130\,600 \text{ Дж/кг} = 130,6 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = \frac{20,93}{28,96} (293 - 384) = \\ = -65,8 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, сообщенной воздуху, по уравнению (117)

$$q = c_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1) = 0,72 \frac{1,2-1,4}{1,2-1} (20 - 111) = \\ = 65,8 \text{ кДж/кг.}$$

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

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

Этот же результат нами получен выше другим путем.

218. 1,5 кг воздуха сжимают политропно от  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 18^\circ \text{С}$  до  $p_2 = 1 \text{ МПа}$ ; температура при этом повышается до  $t_2 = 125^\circ \text{С}$ .

Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенной теплоты.

### Р е ш е н и е

По формуле (122)

$$\frac{m-1}{m} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{100}{9}} = 0,13,$$

отсюда

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

Конечный объем находим из характеристического уравнения

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

Затраченная работа по уравнению (115)

$$\begin{aligned} L &= \frac{MR}{m-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \cdot 287}{0,149} (18 - 125) = \\ &= -309\,200 \text{ Дж} = -309,2 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Количество отведенной теплоты по уравнению (118)

$$\begin{aligned} Q &= Mc_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1) = \\ &= 1,5 \frac{20,93}{28,96} \cdot \frac{1,149 - 1,4}{1,149 - 1} (125 - 18) = -195,4 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

219. Воздух в количестве  $3 \text{ м}^3$  расширяется политропно от  $p_1 = 0,54 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 45^\circ \text{С}$  до  $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$ . Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным  $10 \text{ м}^3$ .

Найти показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенной теплоты.

$$\text{Отв. } m = 1,064; \quad t_2 = 21,4^\circ \text{С}; \quad L = \\ = 1875 \text{ кДж}; \quad Q = 1575 \text{ кДж}.$$

220. В цилиндре двигателя с изобарным подводом теплоты сжимается воздух по политропе с показателем  $m = 1,33$ .

Определить температуру и давление воздуха в конце сжатия, если степень сжатия ( $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$ ) равна 14,  $t_1 = 77^\circ \text{С}$  и  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ .

$$\text{Отв. } t_2 = 564^\circ \text{С}; \quad p_2 = 3,39 \text{ МПа}.$$

221.  $5 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 60^\circ \text{С}$  расширяются по политропе до трехкратного объема и давления  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ .

Найти показатель политропы, работу расширения, количество сообщенной извне теплоты и изменение внутренней энергии.

### Р е ш е н и е

Показатель политропы по уравнению (120)

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

Работа расширения по формуле (112)

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{m-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \\ &= \frac{1}{0,26} (0,4 \cdot 10^6 \cdot 5 - 0,1 \cdot 10^6 \cdot 15) = 1923 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Для определения количества теплоты вычисляем по уравнению (103)

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

но так как

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

то

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

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

Изменение внутренней энергии

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

Знак минус (—) показывает, что внутренняя энергия убывает. В данном процессе работа совершается за счет подводимой извне теплоты, а также внутренней энергии газа.

222. 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.

Отв. 1)  $m = 0,9$ ; 2)  $m = 1,49$ .

223.  $1,5 \text{ м}^3$  воздуха сжимаются от 0,1 МПа и  $17^\circ \text{С}$  до 0,7 МПа; конечная температура при этом равна  $100^\circ \text{С}$ .

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

Отв.  $Q = -183 \text{ кДж}$ ;  $L = -290 \text{ кДж}$ ;  
 $m = 1,147$ .

224.  $0,01 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 25^\circ \text{С}$  расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до 0,1 МПа.

Найти конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенную теплоту, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателями  $m = 1,3$ .

### Решение

а) Изотермическое расширение. Конечный объем определяют по формуле (80):

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

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

$$t_2 = t_1 = 25^\circ \text{С}.$$

Работа газа по уравнению (86)

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 1 \cdot 10^6 \cdot 0,01 \cdot 2,303 \lg 10 = 23\,000 \text{ Дж}.$$

Количество подведенной теплоты по формуле (88)

$$Q = L = 23 \text{ кДж}.$$

б) Адиабатное расширение. Конечный объем определяется по уравнению (89):

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

Пользуясь табл. XIX, получаем

$$10^{\frac{1}{1,4}} = 5,188.$$

Следовательно,

$$V_2 = 0,01 \cdot 5,188 = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха на основании уравнения (91)

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \left( \frac{0,1}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 298 \frac{1}{1,931} = 154,3 \text{ К};$$

$$t_2 = -118,7^\circ \text{ С.}$$

Работа газа по уравнению (98)

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,01}{0,4} \left( 1 - \frac{1}{1,931} \right) = \\ = 25\,000 \cdot 0,48 = 12\,000 \text{ Дж} = 12 \text{ кДж.}$$

в) **Политропное расширение.** Конечный объем найдем из уравнения (104):

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

Конечная температура по уравнению (106)

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

$$t_2 = -97,8^\circ \text{ С.}$$

Работа газа по уравнению (114)

$$L = \frac{p_1 V_1}{m-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right] = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,01}{0,3} \times \\ \times \left[ 1 - \left( \frac{0,1}{1} \right)^{\frac{0,3}{1,3}} \right] = 33\,333 \left( 1 - \frac{1}{1,701} \right) = \\ = 13\,700 \text{ Дж} = 13,7 \text{ кДж.}$$

Подведенная теплота по уравнению (119)

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

225. Горючая смесь в цилиндре двигателя, имеющая температуру  $t_1 = 100^\circ \text{C}$  и давление  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$ , подвергается сжатию по политропе с показателем  $m = 1,33$ .

Определить конечное давление и степень сжатия в момент, когда температура достигнет  $400^\circ \text{C}$ .

$$\text{Отв. } \varepsilon = 5,9; p_2 = 0,95 \text{ МПа.}$$

226. В процессе политропного расширения воздуха сообщается  $83,7 \text{ кДж}$  тепла.

Найти изменение внутренней энергии воздуха и произведенную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а давление его уменьшилось в 8 раз.

$$\text{Отв. } \Delta U = 16,7 \text{ кДж}; L = 6702 \text{ кДж.}$$

227. Воздух расширяется по политропе, совершая при этом работу, равную  $270 \text{ кДж}$ , причем в одном случае ему сообщается  $420 \text{ кДж}$  теплоты, а в другом — от воздуха отводится  $92 \text{ кДж}$  теплоты.

Определить в обоих случаях показатели политропы.

$$\text{Отв. 1) } m = 0,78; 2) m = 1,88.$$

228.  $20 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 18^\circ \text{C}$  сжимают по политропе до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$ , причем показатель политропы  $m = 1,25$ .

Какую работу надо затратить для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха и какое количество теплоты отводится при сжатии?

### Р е ш е н и е

Температуру в конце сжатия определяют по уравнению (106);

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

$$t_2 = -166^\circ \text{C.}$$

Массу газа находят из характеристического уравнения для начального состояния газа;

$$p_1 V_1 = MRT_1;$$

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 20}{287 \cdot 291} = 23,95 \text{ кг.}$$

Объем воздуха в конце сжатия

$$V_2 = \frac{MRT_2}{p_2} = \frac{23,95 \cdot 287 \cdot 439}{0,8 \cdot 10^6} = 3,77 \text{ м}^3.$$

Работа газа по формуле (112)

$$L = \frac{1}{m-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{10^6}{0,25} = (0,1 \cdot 20 - 0,8 \cdot 3,77) = \\ = -4\,064\,000 \text{ Дж} = -4064 \text{ кДж.}$$

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

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

Количество теплоты, отводимой при сжатии воздуха, по уравнению (118) составит

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

**229.** Смесь коксового газа с воздухом сжимается по политропе с показателем  $m = 1,38$ ; начальное давление  $p_1 = 0,1$  МПа, начальная температура  $t_1 = 50^\circ \text{C}$ .

Определить конечную температуру и давление, если степень сжатия  $\varepsilon = 4$ .

$$\text{Отв. } t_2 = 276^\circ \text{C}; \quad p_2 = 0,68 \text{ МПа.}$$

**230.** В газовом двигателе политропно сжимается горючая смесь [ $R = 340$  Дж/(кг·К)] до температуры  $450^\circ \text{C}$ . Начальное давление смеси  $p_1 = 0,09$  МПа, начальная температура  $t_1 = 80^\circ \text{C}$ . Показатель политропы  $m = 1,35$ .

Найти работу сжатия и степень сжатия.

$$\text{Отв. } l = -360 \text{ кДж/кг}; \quad \varepsilon = 7,82.$$

231. 2 м<sup>3</sup> воздуха при давлении  $p_1 = 0,2$  МПа и температуре  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  сжимаются до давления  $p_2 = 1,1$  МПа и объема  $V_2 = 0,5$  м<sup>3</sup>.

Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенной теплоты.

$$\text{Отв. } m = 1,23; L = -652 \text{ кДж}; \\ Q = -272 \text{ кДж.}$$

232. Находящийся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания воздух при давлении  $p_1 = 0,09$  МПа и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  должен быть так сжат, чтобы конечная температура его поднялась до  $650^\circ\text{C}$ .

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

$$\text{Отв. } V_2 = 0,0512V_h.$$

233. 1 кг воздуха при давлении  $p_1 = 0,4$  МПа и температуре  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  расширяется до давления  $p_2 = 0,1$  МПа.

Найти конечную температуру, количество теплоты и совершенную работу, если расширение происходит:

а) изохорно, б) изотермически, в) адиабатно и г) политропно с показателем  $m = 1,2$ .

$$\text{Отв. а) } t_2 = -180^\circ\text{C}; l = 0; q = \\ = -202 \text{ кДж/кг}; \text{ б) } t_2 = t_1; l = \\ = 148,2 \text{ кДж/кг}; q = 148,2 \text{ кДж/кг}; \\ \text{ в) } t_2 = -22^\circ\text{C}; l = 87,5 \text{ кДж/кг}; \\ q = 0; \text{ г) } t_2 = 24^\circ\text{C}; l = 10,9 \text{ кДж/кг}; \\ q = 54,5 \text{ кДж/кг.}$$

234. Исследовать политропные процессы расширения, если показатели политропы:  $m = 0,8$ ;  $m = 1,1$ ;  $m = 1,5$  ( $k$  принять равным 1,4).

### Решение

1. Политропный процесс с показателем  $m = 0,8$ . По формуле (103) определяем

$$\varphi = \frac{m-1}{m-k} = \frac{0,8-1}{0,8-1,4} = \frac{1}{3}.$$

Значение коэффициента  $\varphi$  позволяет сделать заключение, что в процессе расширения  $1/3$  внешней теплоты

расходуется на увеличение внутренней энергии, а  $2/3$  — на внешнюю работу.

2. Политропный процесс с показателем  $m = 1,1$ . По формуле (103) находим

$$\varphi = \frac{m-1}{m-k} = \frac{1,1-1}{1,1-1,4} = = \frac{1}{3}.$$

или

$$q = l - \frac{1}{3} q,$$

откуда

$$l = \frac{4}{3} q,$$

т. е. полученная работа больше количества подведенной теплоты, другими словами, в данном процессе работа совершается как за счет подведенной к газу теплоты, так и за счет внутренней энергии. Нетрудно также видеть, что внутренняя энергия газа уменьшается на  $1/3 q$ .

3. Политропный процесс с показателем  $m = 1,5$ . Так как  $m > k$ , то теплота от газа отводится, внутренняя энергия газа уменьшается. Работа в этом процессе получается, очевидно, за счет внутренней энергии газа; теплота отводится также за счет уменьшения внутренней энергии. Определяем  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{m-1}{m-k} = \frac{1,5-1}{1,5-1,4} = 5.$$

По первому закону термодинамики

$$q = \Delta u + l.$$

Для данного процесса имеем

$$-q = -\Delta u + l.$$

Так как

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q} = 5,$$

то

$$q = \frac{\Delta u}{5},$$

следовательно,

$$-\frac{\Delta u}{5} = -\Delta u + l,$$

или

$$l = \frac{4}{5} \Delta u.$$

Полученный результат означает, что  $\frac{4}{5}$  от величины, на которую уменьшается внутренняя энергия газа, расходуется на внешнюю работу; количество же теплоты, отведенной от газа, составляет  $\frac{1}{5}$  уменьшения его внутренней энергии.

235. Исследовать политропные процессы сжатия, если показатели их  $m = 0,9$  и  $m = 1,1$ . Величину  $k$  принять равной 1,4.

236. Определить, является ли политропным процесс сжатия газа, для которого параметры трех точек имеют следующие значения;  $p_1 = 0,12$  МПа;  $t_1 = 30^\circ$  С;  $p_2 = 0,36$  МПа;  $t_2 = 91^\circ$  С;  $p_3 = 0,54$  МПа;  $t_3 = 116^\circ$  С.

*Отв.* Да, процесс — политропный;  
 $m = 1,2$ .

## Глава VII

### ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

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

Второй закон термодинамики математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \quad (124)$$

где  $dS$  — бесконечно малое приращение энтропии системы;  
 $dQ$  — бесконечно малое количество теплоты, полученной системой от источника теплоты;

$T$  — абсолютная температура источника теплоты.

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

$$dQ = TdS, \quad (125)$$

а так как согласно первому закону термодинамики

$$dQ = dU + pdV,$$

то уравнение (125) принимает вид

$$TdS = dU + pdV.$$

#### ЭНТРОПИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Основным уравнением для определения изменения энтропии в обратимом процессе является выражение

$$ds = \frac{dq}{T}. \quad (126)$$

Поскольку в технической термодинамике приходится иметь дело не с абсолютным значением энтропии, а с ее изменением, отсчет значений энтропии можно вести от любого состояния. Для газов принято считать значение энтропии равным нулю при нормальных условиях, т. е. при  $p = 101\,325$  Па и  $T = 273,15$  К (760 мм рт. ст. и  $0^\circ$  С).

Определение энтропии для любого состояния газа, отсчитанной от *нормального* состояния, производят по следующим формулам.

При *переменной теплоемкости*, исходя из линейной зависимости ее от температуры:

$$s = a_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_n} + b(T - 273); \quad (127)$$

$$s = a_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_n} + b(T - 273); \quad (128)$$

$$s = a_v \ln \frac{p}{p_n} + a_p \ln \frac{v}{v_n} + b(T - 273). \quad (129)$$

При *постоянной теплоемкости*

$$s = c_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_n}; \quad (130)$$

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_n}; \quad (131)$$

$$s = c_v \ln \frac{p}{p_n} + c_p \ln \frac{v}{v_n}. \quad (132)$$

Изменение энтропии между двумя произвольными состояниями газа 1 и 2 определяют по следующим формулам.

При *переменной теплоемкости*, считая зависимость ее от температуры линейной:

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} + b(T_2 - T_1); \quad (133)$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} + b(T_2 - T_1); \quad (134)$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{p_2}{p_1} + a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b(T_2 - T_1). \quad (135)$$

При постоянной теплоемкости

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (136)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad (137)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (138)$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат  $Ts$  имеют следующий вид (при постоянной теплоемкости):

*уравнение изохоры*

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (139)$$

*уравнение изобары*

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (140)$$

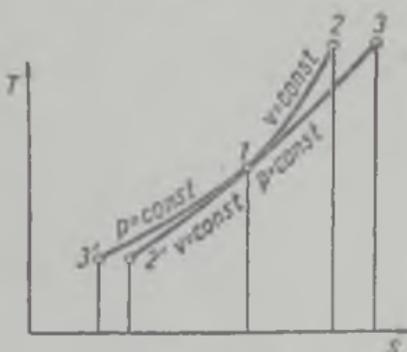


Рис. 18

Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рис. 18;

*уравнение изотермы*

$$T = \text{const}, \quad (141)$$

при этом изменение энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (142)$$

*уравнение адиабаты*

$$s = \text{const}. \quad (143)$$

Изображение изотермы и адиабаты в системе координат  $Ts$  дано соответственно на рис. 19 и 20.

*Уравнение политропы*

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (144)$$

где

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

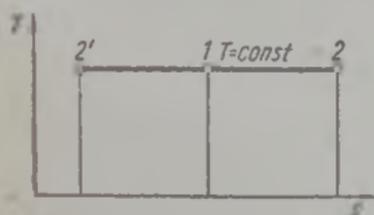


Рис. 19

Широким распространением при решении термодинамических задач пользуется диаграмма  $Ts$ . Адиабаты в этой диаграмме изображаются вертикалями, изотермы — горизонталями, изохоры и изобары идеального газа — логарифмическими кривыми.

На рис. 21 дана небольшая часть диаграммы  $Ts$  для воздуха, на которой нанесены изотермы, адиабаты и изобары (отсутствуют изохоры).

Необходимо иметь в виду, что значения энтропии зависят от теплоемкостей, поэтому для каждого газа нужна отдельная диаграмма  $Ts$ .

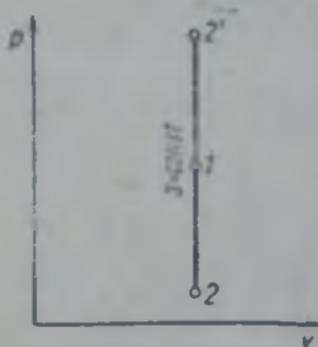


Рис. 20

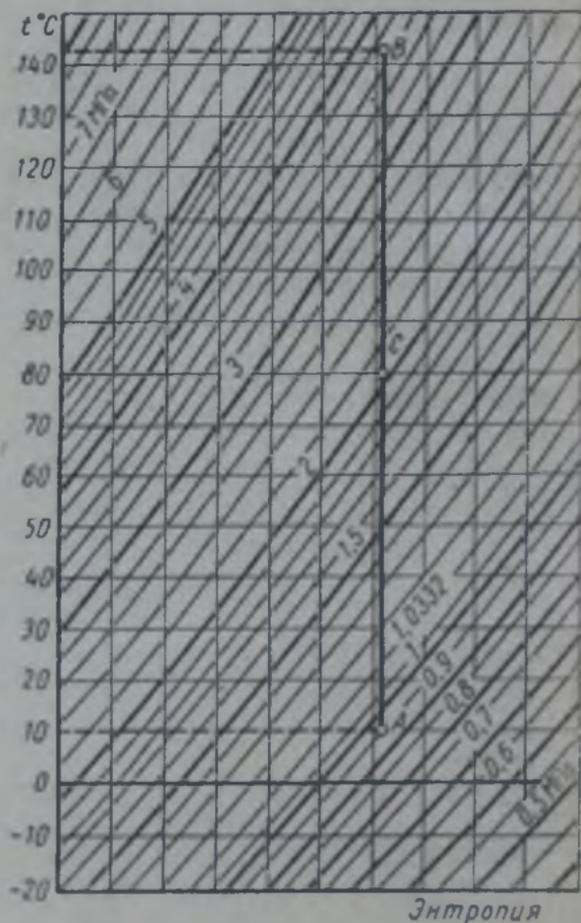


Рис. 21

При пользовании диаграммой  $Ts$  значительно упрощается решение различных термодинамических задач, особенно в тех случаях, когда в расчетах не требуется большая точность.

### МАКСИМАЛЬНАЯ РАБОТА

Если работа совершается с помощью газа, параметры которого отличаются от параметров окружающей среды, то *максимальная работа*, которую может произвести этот газ, достижима лишь при условии его перехода

от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. При этом *максимальная полезная работа* меньше максимальной работы на величину работы вытеснения воздуха окружающей среды.

Величина максимальной полезной работы определяется формулой

$$l_{\text{max (полезн)}} = u_1 - u_2 - T_0(s_1 - s_2) - p_0(v_2 - v_1). \quad (145)$$

В этой формуле параметры, имеющие индекс 1 и 2, относятся соответственно к начальному и конечному состоянию источника работы, а параметры с индексом 0 относятся к рабочей среде.

Так как выражения

$$u_1 - u_2 \text{ и } T_0(s_1 - s_2)$$

представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процесса, то формулу (145) можно представить в виде

$$l_{\text{max (полезн)}} = l_{\text{ад}} - l_{\text{из}} - p_0(v_2 - v_1). \quad (146)$$

### Задачи

237. Определить энтропию 1 кг кислорода при  $p = 0,8$  МПа и  $t = 250^\circ \text{C}$ . Теплоемкость считать постоянной.

### Решение

По формуле (131)

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_n}.$$

Так как для двухатомных газов  $\mu c_p = 29,3$  кДж/(кмоль·К), а  $R = 8,314$  кДж/(кмоль·К), то

$$s = \frac{29,3}{32} 2,303 \lg \frac{523}{273} - \frac{8,314}{32} 2,303 \lg \frac{8}{1,013};$$

$$s = 0,5978 - 0,5373 = 0,0605 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

238. Определить энтропию 6,4 кг азота при  $p = 0,5$  МПа и  $t = 300^\circ \text{C}$ . Теплоемкость считать постоянной.

$$\text{Отв. } s = 1,94 \text{ кДж/К}.$$

239. Найти энтропию 1 кг кислорода при  $p = 0,8$  МПа и  $t = 250^\circ$  С. Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

### Р е ш е н и е

По формуле (128)

$$s = a_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_0} + b(T - 273).$$

Из табл. 5 для кислорода

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

Поэтому формула линейной зависимости истинной теплоемкости будет иметь вид

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448t \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

или

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448(T - 273) \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

следовательно,

$$c_p = 0,8432 + 0,00025448T \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Таким образом,

$$a = 0,8432; \quad b = 0,00025448;$$

значение энтропии

$$s = 0,8432 \cdot 2,303 \lg \frac{523}{273} - \frac{8,314}{32} \cdot 2,303 \lg \frac{0,8}{0,1013} +$$

$$+ 0,00025448(523 - 273);$$

$$s = 0,5476 - 0,5371 + 0,0634 = 0,0739 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Для тех же условий, но при постоянной теплоемкости (см. задачу 237) значение энтропии  $s = 0,0605$  кДж/(кг · К), т. е. меньше на

$$\frac{0,0739 - 0,0605}{0,0739} = \frac{0,0134}{0,0739} = 18,1\%.$$

Этот результат показывает, что для повышенных и высоких температур следует пользоваться зависимостью  $c = f(t)$ .

240. 1 кг кислорода при температуре  $t_1 = 127^\circ \text{C}$  расширяется до пятикратного объема; температура его при этом падает до  $t_2 = 27^\circ \text{C}$ .

Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

### Решение

По уравнению (136)

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \\ &= 2,303 \left( \frac{20,93}{32} \lg \frac{300}{400} + 0,260 \lg 5 \right) = \\ &= 2,303 (-0,0818 + 0,1827) = 0,2324 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

241. 1 кг воздуха сжимается от  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  до  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$  и  $t_2 = 100^\circ \text{C}$ .

Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

$$\text{Отв. } \Delta s = -0,196 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

242. 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при  $v = \text{const}$  давление повышается в 1,5 раза.

Найти общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

### Решение

Изменение энтропии воздуха в адиабатном процессе будет равно нулю.

Изменение энтропии в изохорном процессе определится по формуле (139):

$$\begin{aligned} \Delta s_v &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} = \\ &= c_v \ln 1,5 = 2,303 \frac{20,93}{28,96} \lg 1,5 = 0,293 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

следовательно,

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

243. В диаграмме  $Ts$  для идеального газа нанесены три изобары (рис. 22). Две крайние изобары относятся к давлениям соответственно 0,1 и 10 МПа.

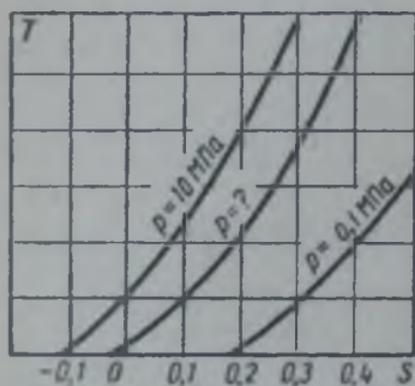


Рис. 22

Определить, какое давление соответствует средней изобаре.

Отв.  $p = 2,15$  МПа.

244.  $10 \text{ м}^3$  воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры  $400^\circ \text{С}$ . Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы  $m = 2,2$ .

Считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, найти энтропию воздуха в конце каждого процесса.

### Решение

Находим массу  $10 \text{ м}^3$  воздуха при нормальных условиях:

$$M = \frac{pV}{RT} = \frac{0,1013 \cdot 10^6 \cdot 10}{287 \cdot 273} = 12,9 \text{ кг.}$$

Определяем изменение энтропии в каждом из перечисленных процессов:

1) изохорное сжатие

$$\begin{aligned} \Delta s_1 = s_1 &= Mc_v \ln \frac{T}{273} = \\ &= 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 8,42 \text{ кДж/К;} \end{aligned}$$

2) изобарное сжатие

$$\begin{aligned} \Delta s_2 = s_2 &= Mc_p \ln \frac{T}{273} = \\ &= 12,9 \cdot 1,0117 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 11,7 \text{ кДж/К;} \end{aligned}$$

3) адиабатное сжатие

$$\Delta s_3 = s_3 = 0;$$

4) политропное сжатие

$$\Delta s_1 = s_1 = M c_v \frac{m-k}{m-1} \ln \frac{T}{273} =$$

$$= 12,9 \cdot 0,723 \frac{2,2-1,4}{2,2-1} 2,303 \lg \frac{673}{273} = 5,61 \text{ кДж/К.}$$

245. Найти приращение энтропии 3 кг воздуха; а) при нагревании его по изобаре от 0 до 400° С; б) при нагревании его по изохоре от 0 до 880° С; а) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

Отв. а)  $\Delta s_p = 2,74$ ; б)  $\Delta s_v = 3,13$ ;  
в)  $\Delta s_T = 2,36$  кДж/К.

246. 1 кг воздуха сжимается по политропе от 0,1 МПа и 20° С до 0,8 МПа при  $m = 1,2$ .

Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и затраченную работу.

Отв.  $t_2 = 141^\circ \text{С}$ ;  $\Delta s =$   
 $= -0,2445 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  
 $q = -87,1 \text{ кДж/кг}$ ;  $l =$   
 $= -173,0 \text{ кДж/кг}$ .

247. 1 кг воздуха, находящегося в состоянии А (рис. 23), сообщается теплота один раз при  $p = \text{const}$  и другой — при  $v = \text{const}$  так, что в обоих случаях конечные температуры одинаковы.

Сравнить изменение энтропии в обоих процессах, если  $t_1 = 15^\circ \text{С}$  и  $t_2 = 500^\circ \text{С}$ . Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

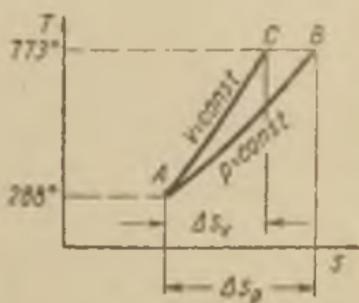


Рис. 23

Решение

Используя формулу (133) для процесса  $v = \text{const}$ , получаем

$$s_2 - s_1 = \Delta s_v = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + b(T_2 - T_1).$$

Из табл. 5 для воздуха

$$c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349t;$$

следовательно, истинная теплоемкость

$$c_v = 0,7084 + 0,00018698t,$$

или

$$\begin{aligned}c_v &= 0,7084 + 0,00018698 (T - 273) = \\ &= 0,6574 + 0,00018698T.\end{aligned}$$

Таким образом,

$$a_v = 0,6574; b = 0,00018698.$$

Приращение энтропии в изохорном процессе  $AC$

$$\begin{aligned}\Delta s_v &= 0,6574 \cdot 2,303 \lg \frac{773}{288} + 0,00018698 (500 - 15) = \\ &= 0,6477 + 0,0935 = 0,7412 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.\end{aligned}$$

Из рис. 23 видно, что отрезок  $CB$ , равный  $\Delta s_p - \Delta s_v$ , одновременно представляет приращение энтропии в изотермическом процессе расширения  $CB$ . Следовательно, на основании формулы (142)

$$\Delta s_p - \Delta s_v = R \ln \frac{v_B}{v_C} = R \ln \frac{v_B}{v_A}.$$

Для изобарного процесса  $AB$  можно написать

$$\frac{v_B}{v_A} = \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_2}{T_1};$$

следовательно,

$$\begin{aligned}\Delta s_p - \Delta s_v &= R \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,287 \cdot 2,303 \lg \frac{773}{288} = \\ &= 0,2829 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}\Delta s_p &= \Delta s_v + 0,2829 = 0,7412 + 0,2829 = \\ &= 1,0241 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta s_p}{\Delta h} = \frac{1,0241}{0,7412} = \frac{0,2446}{0,1770} = 1,38.$$

248. В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от  $t_1 = 25^\circ \text{C}$  до  $t_2 = -37^\circ \text{C}$ . Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$ , количество его  $M = 2 \text{ кг}$ .

Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной к воздуху теплоты составляет 89,2 кДж.

### Р е ш е н и е

Количество теплоты, сообщаемое газу в политропном процессе на основании уравнения (118) составляет

$$Q = M c_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1).$$

Подставляя значения известных величин, получаем

$$\frac{m-k}{m-1} = - \frac{89,2}{2 \cdot 0,723 \cdot 62} = - 0,995.$$

Отсюда показатель политропы

$$m = 1,2.$$

Из соотношения параметров политропного процесса определяем конечное давление:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{m}{m-1}}; \quad p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 4 \left( \frac{236}{298} \right)^6 = 0,1 \text{ МПа.}$$

Изменение энтропии по уравнению (137)

$$\Delta s = M \left[ c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \right];$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \Delta s &= 2 \cdot 2,3 \left[ \frac{29,3}{28,96} \lg \frac{236}{298} - \frac{287}{1000} \lg \frac{0,1}{0,4} \right] = \\ &= 4,6 (-0,1026 + 0,1728) = 0,323 \text{ кДж/К.} \end{aligned}$$

249. Построить в диаграмме  $Ts$  для 1 кг воздуха в пределах от 0 до 200° С изохоры:  $v_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_3 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Теплоемкость считать постоянной.

### Р е ш е н и е

Строим изохору  $v_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  (рис. 24). Проводим изотерму  $T_1 = 273\text{К}$  и несколько вспомогательных изотерм:  $T_a = 323\text{К}$ ,  $T_b = 373\text{К}$ ,  $T_c = 423\text{К}$ ,  $T_d = 473\text{К}$ .

Точку  $I$  выбираем произвольно на изотерме  $T = 273\text{К}$ , так как требуется определить разность энтропии относительно точки  $I$ .

По формуле (139) найдем

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,723 \ln \frac{T_2}{T_1} \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

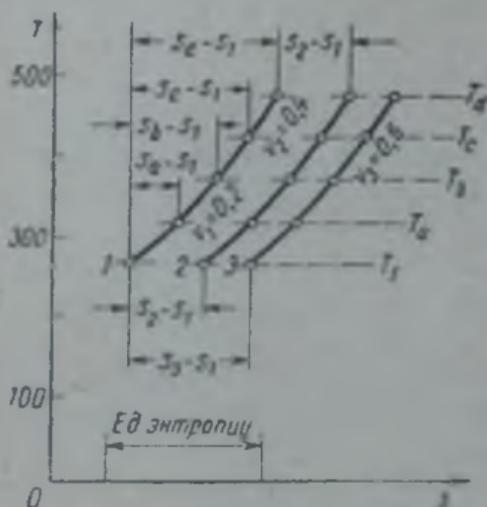


Рис. 24

Пользуясь этой формулой, имеем

$$s_a - s_1 = 0,1215 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$s_b - s_1 = 0,2264 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$s_c - s_1 = 0,3164 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$s_d - s_1 = 0,3963 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Соединяя данные точки, получаем кривую

$$v_1 = \text{const} = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как все изохоры в диаграмме  $Ts$  эквидистантны между собой в горизонтальном направлении, необходимо для построения остальных изохор определить горизонтальное расстояние между ними, представляющее собой приращение энтропии при изотермическом расширении. Согласно уравнению (142)

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = 2,303R \lg \frac{v_2}{v_1}.$$

Поэтому для изохоры  $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$

$$s_2 - s_1 = 2,303 \cdot 0,287 \lg \frac{0,4}{0,2} = 0,199 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

и для изохоры  $v_3 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$  (относительно изохоры  $v_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ )

$$s_3 - s_1 = 2,303 \cdot 0,287 \lg \frac{0,6}{0,2} = 0,3151 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Пользуясь этими значениями, проводим изохоры  $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $v_3 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

250. Построить в диаграмме  $Ts$  для воздуха, в пределах от 0 до  $500^\circ\text{C}$ , изобары;  $p_1 = 0,2$  МПа,  $p_2 = 0,6$  МПа и  $p_3 = 1,8$  МПа.

251. 1 кг воздуха при  $p_1 = 0,9$  МПа и  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  сжимается по адиабате до  $p_2 = 3,7$  МПа.

Пользуясь диаграммой  $Ts$ , найти конечную температуру, а также то давление, до которого нужно сжать воздух, чтобы температура его стала  $t_3 = 80^\circ\text{C}$ .

### Р е ш е н и е

На диаграмме  $ts$  для воздуха (см. рис. 21) на пересечении изобары  $p_1 = 0,9$  МПа и изотермы  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  находим точку  $A$ , изображающую начальное состояние воздуха.

Из нее проводим вертикальную линию (адиабату) до пересечения ее с изобарой  $p_2 = 3,7$  МПа. Проектируя точку  $B$  на ось ординат, находим  $t_2 = 142^\circ\text{C}$ .

Точка  $C$  пересечения адиабаты  $AB$  с изотермой  $t_3 = 80^\circ\text{C}$  будет соответствовать искомому давлению. Оно равно 2,08 МПа.

252. 1 кг воздуха расширяется по адиабате от  $p_1 = 0,6$  МПа и  $t_1 = 130^\circ\text{C}$  до  $p_2 = 0,2$  МПа.

Определить конечную температуру, пользуясь диаграммой  $Ts$ .

*Отв.*  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ .

253. 1 кг воздуха при  $p_1 = 0,09$  МПа и  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  сжимается по адиабате так, что его объем уменьшается в 16 раз.

Найти конечную температуру и конечное давление, пользуясь диаграммой  $Ts$ .

*Отв.*  $t_2 = 810^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 4,5$  МПа.

254. В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении  $p_1 = 5$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Параметры среды;  $p_0 = 0,1$  МПа,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде. Представить процесс в диаграмме  $pv$ .

### Р е ш е н и е

Так как температура воздуха в начальном состоянии равна температуре среды, то максимальная работа, которую может выполнить воздух, может быть получена лишь

при условии изотермического расширения воздуха от начального давления  $p_1 = 5$  МПа до давления среды  $p_2 = 0,1$  МПа. В диаграмме максимальная работа изобразится площадью  $1-2-B-A$ , а максимальная полезная работа — площадью  $1-2-0-1$  (рис. 25). Величина ее на основании формулы (145):

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

или

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

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

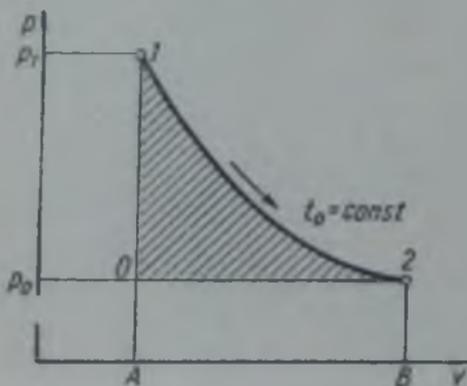


Рис. 25

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

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{5,03}{0,1} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе по формуле (142)

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

то

$$L_{\text{max (полезн)}} = MT_0 R \ln \frac{p_1}{p_2} - p_0 (V_2 - V_1) = 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \times \\ \times 2,3 \cdot 1,699 - 1 \cdot 10^5 (15,0 - 0,3) = 5\,847\,000 - 1\,470\,000 = \\ = 4\,377\,000 \text{ Дж} = 4377 \text{ кДж}.$$

255. В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  и давлении  $p_1 = 10$  МПа. Температура среды  $t_0 = 20^\circ \text{C}$ , давление среды  $p_0 = 0,1$  МПа.

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

$$\text{Отв. } L_{\text{max (полезн)}} = 7220 \text{ кДж}.$$

256. Торпеда приводится в действие и управляется автоматически, двигаясь на заданной глубине. Для двигателя торпеды используется имеющийся в ней запас сжатого воздуха. Найти максимальную полезную работу,

которую может произвести воздушный двигатель торпеды, если объем сжатого воздуха в ней  $V_1 = 170$  л, давление  $p_1 = 18$  МПа, а температура воздуха и морской воды  $t_0 = 10^\circ \text{C}$ . Торпеда отрегулирована на движение под уровнем моря на глубине 4 м.

Определить также силу, с которой торпеда устремляется вперед, если радиус ее действия должен быть равен 4 км, а потерями привода можно пренебречь.

$$\text{Отв. } L_{\text{max (полезн)}} = 11\,810 \text{ кДж}; \\ F = 295 \text{ Н.}$$

257. Определить максимальную полезную работу, которая может быть произведена 1 кг кислорода, если его начальное состояние характеризуется параметрами  $t_1 = 400^\circ \text{C}$  и  $p_1 = 0,1$  МПа, а состояние среды — параметрами  $t_0 = 20^\circ \text{C}$  и  $p_0 = 0,1$  МПа.

Представить процесс в диаграммах  $p-v$  и  $T-s$ .

### Решение

Максимальная работа, которую произведет при данных условиях кислород, может быть получена лишь при условии перехода его от начального состояния к состоя-

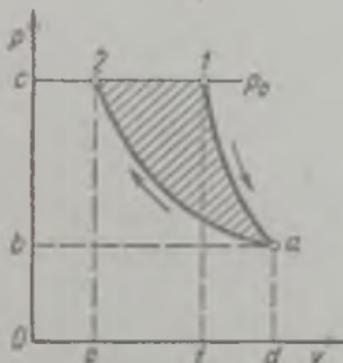


Рис. 26

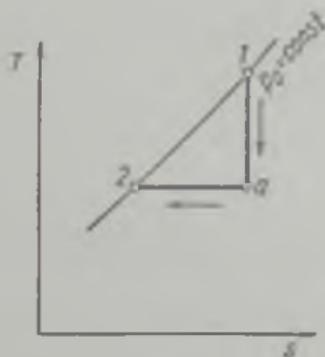


Рис. 27

нию среды обратимым путем. Так как температура кислорода в начальном состоянии выше температуры среды, то прежде всего необходимо обратимым процессом снизить температуру кислорода до температуры среды. Таким процессом может явиться только адиабатное расширение кис-

лорода (рис. 26 и 27). При этом конечный объем и конечное давление получают из следующих соотношений:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{260 \cdot 673}{0,1 \cdot 10^6} = 1,75 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_a = v_1 \left( \frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,75 \left( \frac{673}{293} \right)^{2,5} = 1,75 \cdot 2,32^2 = \\ = 1,75 \cdot 8,03 = 14,05 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_a = \frac{RT_a}{v_a} = \frac{260 \cdot 293}{14,05 \cdot 10^6} = 0,00542 \text{ МПа}.$$

После адиабатного расширения необходимо обратимым путем при  $t = \text{const}$  сжать кислород от давления 0,00542 МПа до давления окружающей среды, т. е. осуществить изотермическое сжатие кислорода до 0,1 МПа. При этом конечный объем кислорода

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{250 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,762 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Максимальную полезную работу находят по формуле (146);

$$l_{\text{max (полезн)}} = l_{\text{ад}} - l_{\text{из}} - p_0(v_2 - v_1) = \\ = \frac{1}{k-1} RT_1 \left( 1 - \frac{T_a}{T_1} \right) - RT_a \ln \frac{p_2}{p_a} + p_0(v_1 - v_2) = \\ = 2,5 \cdot 260 \cdot 380 - 260 \cdot 293 \cdot 2,3 \lg \frac{1}{0,00542} + \\ + 0,1 \cdot 10^6 (1,75 - 0,762) = 247\,000 - 221\,000 + \\ + 98\,800 = 124\,800 \text{ кДж/кг} = 124,8 \text{ кДж/кг}.$$

Задача может быть решена также и другим способом. Как видно из рис. 26, величина максимальной полезной работы изображается заштрихованной площадью 1—а—2. Эта площадь может быть определена как разность площадей 1—а—b—c и 2—а—b—c.

$$\text{Пл. } 1-a-b-c = \text{пл. } 1-a-d-f + \\ + \text{пл. } c-1-f-0 - \text{пл. } a-b-0-d = \\ = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 + p_a v_a) + (p_1 v_1 - p_a v_a) =$$

$$= \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 + p_0 v_0) = 1,4 \text{ л аг} = 1,4 \cdot 247 = 345,8 \text{ кДж/кг.}$$

$$\begin{aligned} \text{Пл. } 2-a-b-c &= \text{пл. } 2-a-d-e + \\ + \text{пл. } 2-c-0-e &- \text{пл. } a-b-0-d = l_{\text{из}} = \\ &= 221,8 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$L_{\text{тах (полезн)}} = 345,8 - 221,8 = 124 \text{ кДж/кг.}$$

258. В сосуде объемом 400 л заключен воздух при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1 = -40^\circ \text{C}$ . Параметры среды;  $p_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 20^\circ \text{C}$ .

Определить максимальную полезную работу, которую может произвести воздух, заключенный в сосуде. Представить процесс в диаграммах  $p v$  и  $T s$

$$\text{Отв. } L_{\text{тах (полезн)}} = 4600 \text{ Дж.}$$

## Глава VIII

### КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Круговым процессом, или циклом, называют совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

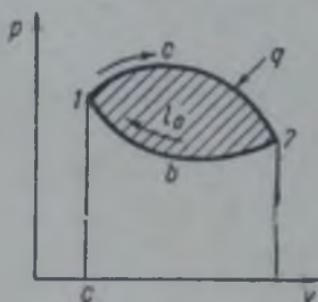


Рис. 28

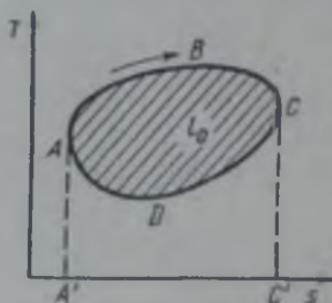


Рис. 29

Работа кругового процесса ( $l_0$ ) изображается в диаграмме  $p-v$  (рис. 28) площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла, причем работа положительна, если цикл совершается по часовой стрелке (прямой цикл), и отрицательна, если он совершается против часовой стрелки (обратный цикл).

Прямой цикл ( $l_0 > 0$ ) характерен для тепловых двигателей, обратный цикл ( $l_0 < 0$ ) — для холодильных машин.

Если обозначить через:  $q_1$  — количество теплоты, заимствованной 1 кг рабочего тела от внешнего (или верхнего) источника теплоты;  $q_2$  — количество теплоты, отданной 1 кг рабочего тела внешнему охладителю (или нижнему источнику), то полезно использованная в цикле теплота

$$l_0 = q_1 - q_2. \quad (147)$$

Это количество теплоты в диаграмме  $T-s$  изображается площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла (рис. 29). Очевидно, эта площадь представляет также ве-

личину работы за один цикл, причем, как и в диаграмме  $pV$ , работа положительна, если цикл совершается по часовой стрелке, и отрицательна, если он совершается против часовой стрелки.

Степень совершенства процесса превращения теплоты в работу в круговых процессах характеризуется термическим к. п. д.

$$\eta_{\text{т}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}. \quad (148)$$

Пользуясь диаграммой  $Ts$  (рис. 29), можно определить термический к. п. д. цикла графическим путем:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{\text{пл. } ABCD}{\text{пл. } ABCC'A'}.$$

### ЦИКЛ КАРНО

Цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм (рис. 30 и 31).

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (149)$$

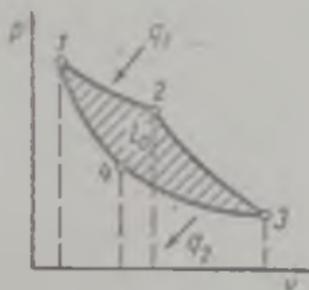


Рис. 30

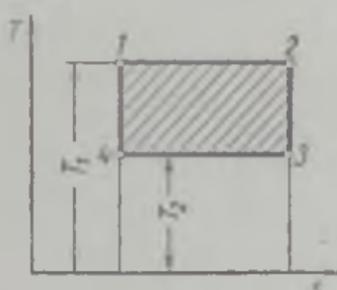


Рис. 31

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4}. \quad (150)$$

Работа цикла Карно по уравнению (147)

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_{\text{т}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (151)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно температуры верхнего и нижнего источника теплоты в К.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме состоит из двух адиабат и двух изохор (рис. 32 и 33).

Характеристиками цикла являются:

$\epsilon = v_1/v_2$  — степень сжатия;

$\lambda = p_3/p_2$  — степень повышения давления.

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2).$$

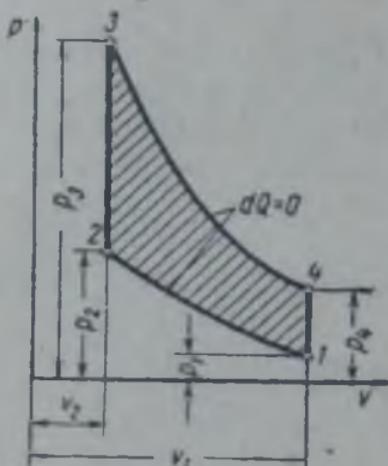


Рис. 32

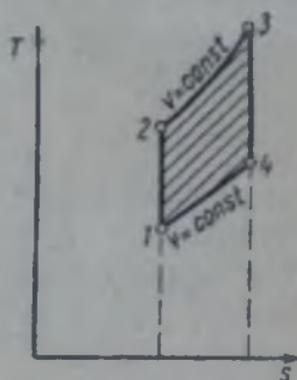


Рис. 33

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\lambda-1}}. \quad (152)$$

Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении состоит из двух адиабат, одной изобары и одной изохоры (рис. 34 и 35).

Характеристиками цикла являются:

$\epsilon = v_1/v_2$  — степень сжатия;

$\rho = v_3/v_2$  — степень предварительного расширения.

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2).$$

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_k = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho-1)}. \quad (153)$$

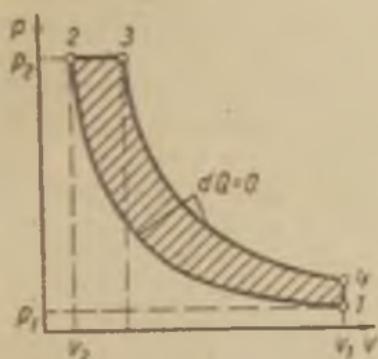


Рис. 34

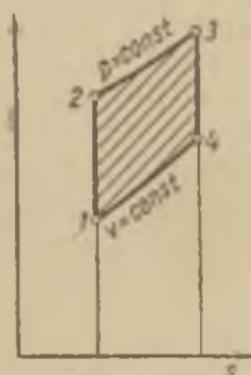


Рис. 35

Цикл с комбинированным подводом теплоты состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары (рис. 36 и 37).

Характеристиками цикла являются:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \quad \lambda = \frac{p_3}{p_2}; \quad \rho = \frac{v_4}{v_3}.$$

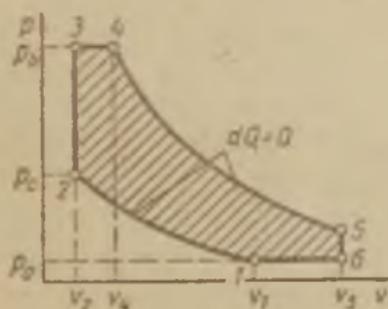


Рис. 36

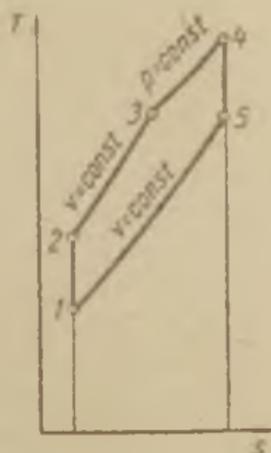


Рис. 37

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3).$$

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = c_v (T_6 - T_1).$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}. \quad (154)$$

Во всех приведенных выше теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания уравнения для определения количества подведенной и отведенной теплоты, а также для термического к. п. д. даны для случая  $c = \text{const}$ .

### ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

На рис. 38 представлена схема наиболее распространенного типа газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении.

Компрессор  $K$ , расположенный на одном валу с газовой турбиной  $T$ , всасывает воздух из атмосферы и сжимает

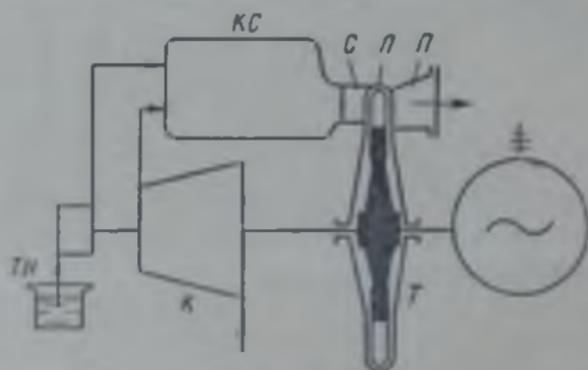


Рис. 38

его до заданного давления. Сжатый в компрессоре воздух поступает в камеру сгорания  $КС$ ; туда же *топливным насосом*  $ТН$  подается жидкое горючее. Сгорание происходит при постоянном давлении. Из камеры сгорания газы поступают в сопла  $С$ , из которых они с большой скоростью поступают на *рабочие лопатки*  $Л$  турбины и приводят во вращение ее ротор. Отработавшие газы через *выпускной патрубок*  $П$  выпускаются в атмосферу.

На рис. 39 дан теоретический цикл газовой турбины с *подводом теплоты при постоянном давлении*. Как видно из этого рисунка, цикл состоит из двух адиабат и двух изобар. Линия  $1-2$  изображает процесс адиабатного сжатия в компрессоре,  $2-3$  — изобарный подвод теплоты (сгорание топлива),  $3-4$  — адиабатное расширение в газовой турбине,  $4-1$  — условный изобарный процесс, замыкающий цикл.

### Термический к. п. д. цикла

$$\eta_k = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \quad (155)$$

или

$$\eta_k = 1 - \frac{1}{\lambda^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (156)$$

где  $\varepsilon = v_1/v_2$  — степень сжатия, а  $\lambda = p_2/p_1$  — степень повышения давления.

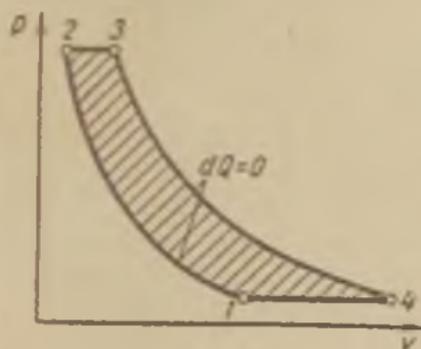


Рис. 39

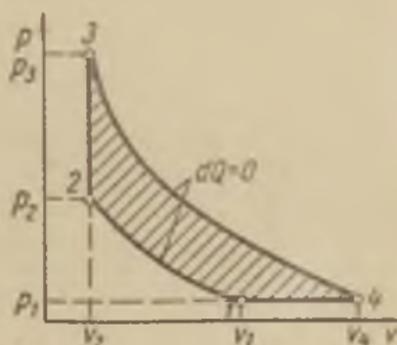


Рис. 40

Цикл газотурбинной установки с *подводом теплоты при постоянном объеме* представлен на рис. 40, а схема установки дана на рис. 41. В компрессоре *К* происходит адиабатное сжатие воздуха (линия 1—2, рис. 40). Сжатый воздух поступает в камеру сгорания *КС*, куда одновременно топливным насосом *ТН* подается жидкое топливо. Сгорание происходит при постоянном объеме (при закрытых клапанах). Воспламенение горючей смеси обычно производится от электрической свечи *ЭС*. Продукты сгорания проходят через выпускной клапан камеры, посту-

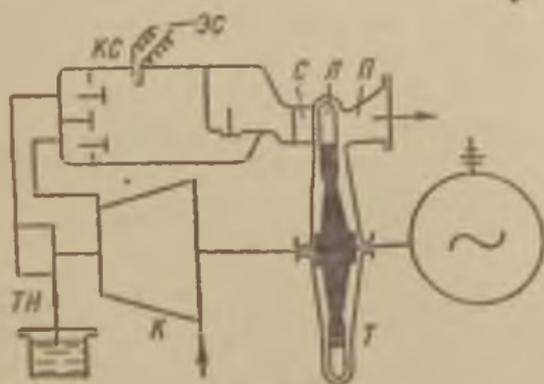


Рис. 41

пают в сопла  $C$ , где адиабатно расширяются (линия 3—4, рис. 40). Далее газы с большой скоростью поступают на рабочие лопатки  $L$  турбины и приводят во вращение ее ротор. Отработавшие газы через выпускной патрубок  $\Pi$  выпускаются в атмосферу. Цикл замыкается условным изобарным процессом (линия 4—1, рис. 40).

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_k = 1 - \frac{k}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}. \quad (157)$$

где

$$\lambda = p_3/p_2.$$

Так как уходящие из газовой турбины продукты сгорания имеют достаточно высокую температуру, то для повышения экономичности газотурбинного агрегата вводят так называемую *регенерацию*, т. е. предварительный

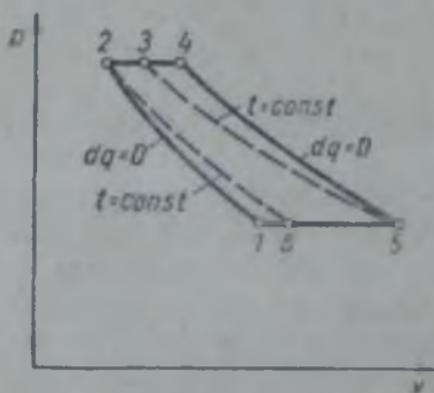


Рис. 42

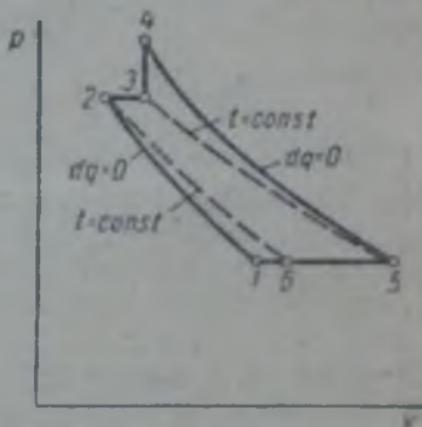


Рис. 43

подогрев сжатого в компрессоре воздуха за счет теплоты уходящих газов. Термический к. п. д. цикла газовой турбины при наличии регенерации больше, чем термический к. п. д. турбины без регенерации.

Если всю располагаемую теплоту отработавших газов использовать для подогрева воздуха, то такой цикл газовой турбины носит название *цикла с предельной регенерацией*.

Цикл газовой турбины с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  и регенерацией изображен на рис. 42, а цикл турбины при  $v = \text{const}$  и регенерацией — на рис. 43. В обоих циклах линии 2—3 изображают изобарный подо-

грев сжатого воздуха в регенераторе, а линии 5—6 — изобарное охлаждение продуктов сгорания в регенераторе.

Термический к. п. д. цикла турбины с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  с предельной полной регенерацией и адиабатным сжатием

$$\eta_{\text{тер}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Термический к. п. д. цикла турбины с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  с предельной регенерацией и адиабатным сжатием

$$\eta_{\text{тер}} = 1 - \frac{kT_1 \left( \lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_2 (\lambda^{k-1} - 1)}$$

### ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

На рис. 44 в диаграмме  $p-v$  изображены процессы, протекающие в идеальном компрессоре. Линия 4—1 изображает процесс всасывания газа, кривая 1—2 — процесс

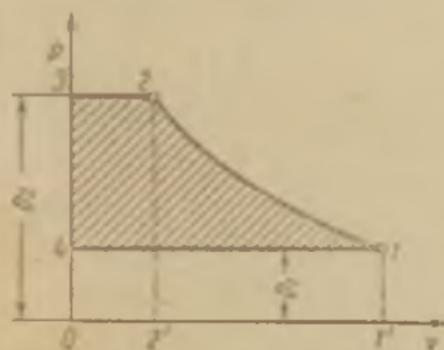


Рис. 44

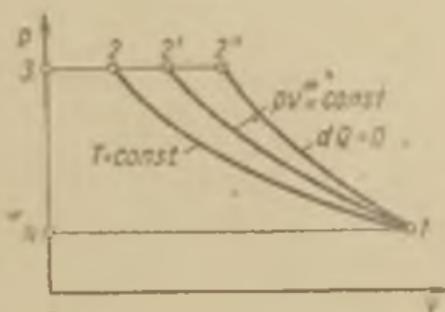


Рис. 45

сжатия и линия 2—3 — процесс нагнетания. Диаграмму 1—2—3—4 называют теоретической индикаторной диаграммой.

Теоретическая работа компрессора  $l_0$  определяется площадью индикаторной диаграммы и зависит от процесса сжатия (рис. 45). Кривая 1—2 изображает процесс изотермического сжатия, кривая 1—2'' — адиабатного сжатия и кривая 1—2' — политропного сжатия.

При изотермическом сжатии теоретическая работа компрессора равна работе изотермического сжатия:

$$l_0 = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = RT \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (158)$$

Если масса всасываемого воздуха  $M$  кг, а объем его  $V_1$  м<sup>3</sup>, то

$$L_0 = \rho_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (159)$$

Работа, отнесенная к 1 м<sup>3</sup> всасываемого воздуха,

$$l'_0 = \rho_1 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (160)$$

Работа для получения 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха

$$l''_0 = \rho_2 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (161)$$

Количество теплоты, которое должно быть отведено при изотермическом сжатии,

$$q = l_0 \text{ или } Q = L_0.$$

При *адиабатном сжатии* теоретическая работа компрессора в  $k$  раз больше работы адиабатного сжатия:

$$l_0 = \frac{k}{k-1} \rho_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (162)$$

Если масса всасываемого воздуха  $M$  кг, а объем его  $V_1$  м<sup>3</sup>, то

$$L_0 = \frac{k}{k-1} \rho_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (163)$$

Работа, отнесенная к 1 м<sup>3</sup> всасываемого воздуха,

$$l'_0 = \frac{k}{k-1} \rho_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (164)$$

Работа для получения 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха

$$l''_0 = \frac{k}{k-1} \rho_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (165)$$

Температуру газа в конце сжатия можно определить из соотношения параметров адиабатного процесса.

Работа компрессора при адиабатном сжатии может быть также найдена по формуле

$$l_0 = i_2 - i_1. \quad (166)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  — соответственно начальное и конечное значения энтальпии воздуха.

Эта формула весьма удобна для подсчета работы идеального компрессора при адиабатном сжатии с помощью диаграммы  $i-s$ .

В этом случае из точки 1 (рис. 46), характеризующей начальное состояние, проводят вертикальную линию до пересечения ее в точке 2 с изобарой  $p_2$ . Ординаты точек 1 и 2 дают значения энтальпии  $i_1$  и  $i_2$ , а отрезок 1—2 — их разность.

При политропном сжатии теоретическая работа компрессора в  $m$  раз больше работы политропного сжатия:

$$l_0 = \frac{m}{m-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (167)$$

Если масса всасываемого воздуха  $M$  кг, а объем его  $V_1$  м<sup>3</sup>, то

$$L_0 = \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (168)$$

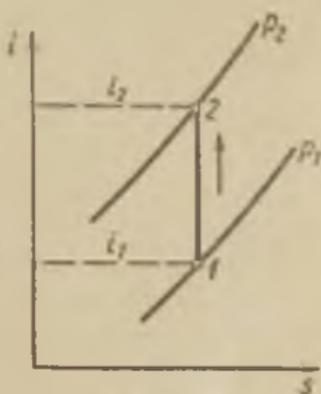


Рис. 46

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 м<sup>3</sup> всасываемого воздуха,

$$l_0^* = \frac{m}{m-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (169)$$

Работа для получения 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха

$$l_0^* = \frac{m}{m-1} p_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]. \quad (170)$$

Количество теплоты, которое должно быть отведено при политропном сжатии, находят по формуле (117).

Все приведенные выше формулы для определения работы компрессора дают абсолютную величину работы.

Теоретическая мощность двигателя для привода компрессора

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000}; \quad (171)$$

$$N = \frac{V \dot{l}_0}{3600 \cdot 1000}; \quad (172)$$

$$N = \frac{V \dot{l}_0}{3600 \cdot 1000}. \quad (173)$$

В формулах (158)—(173) значения  $\rho$ ,  $v$ ,  $l_0$ ,  $L_0$ ,  $l'_0$ ,  $l''_0$  даны соответственно в следующих единицах;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — в Па;  $v$  (объем всасываемого или сжатого воздуха) — в м<sup>3</sup>/ч;  $l_0$  — в Дж/ч;  $l'_0$  и  $l''_0$  — в Дж/м<sup>3</sup> и  $N$  — в кВт.

Действительная индикаторная диаграмма значительно отличается от теоретической главным образом вследствие наличия в действительном компрессоре вредного пространства, потерь давления во впускном и нагнетательном клапанах и теплообмена между газом и стенками цилиндра.

При наличии вредного пространства (рис. 47) в индикаторную диаграмму вводится добавочный процесс (линия 3—4) — процесс расширения сжатого газа, оставшегося к концу нагнетания во вредном пространстве цилиндра.

Отношение объема вредного пространства к объему, сжимаемому поршнем, т. е. величину  $a = V_c/V_h$ , называют *относительной величиной вредного пространства*.

Вследствие наличия вредного пространства производительность компрессора уменьшается.

Величину

$$\lambda_v = \frac{V_1 - V_4}{V_h} \quad (174)$$

характеризующую степень полноты использования рабочего объема цилиндра, называют *объемным к. п. д. компрессора*.

Объемный к. п. д. компрессора можно также выразить через относительную величину вредного пространства и отношение давлений нагнетания и всасывания:

$$\lambda_v = 1 - a \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right], \quad (175)$$

где  $m$  — показатель политропы расширения газа, оставшегося во вредном пространстве.

Теоретическая работа идеального компрессора является минимальной. Действительную работу реального компрессора определяют при помощи изотермического или адиабатного к. п. д. и механического к. п. д.:

$$\eta_{из} = \frac{l_{из}}{l_n}; \quad \eta_{ад} = \frac{l_{ад}}{l_n},$$

где  $l_{из}$  и  $l_{ад}$  — соответственно теоретическая работа компрессора при изотермическом и адиабатном сжатии, а  $l_n$  —

действительная работа компрессора. Эти коэффициенты характеризуют степень совершенства действительного процесса в сравнении с идеальным.

Механический к. п. д. учитывает механические потери в компрессоре. Произведение изотермического или адиабатного к. п. д. на механический называют эффективным к. п. д. компрессора  $\eta_k$ .

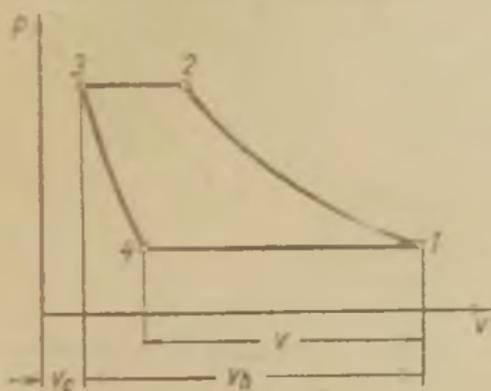


Рис. 47

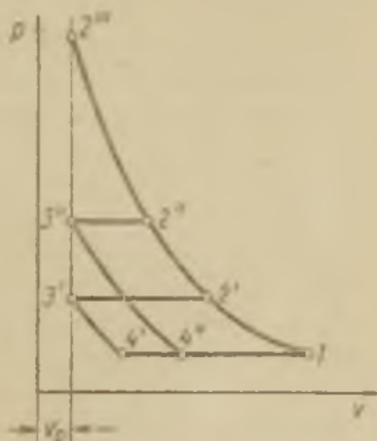


Рис. 48

Действительная мощность, потребляемая двигателем компрессора, для сжатия  $M$  кг/ч газа

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000 \eta_k} \quad (176)$$

С увеличением конечного давления объемный к. п. д. одноступенчатого компрессора уменьшается (рис. 48), и следовательно, уменьшается также производительность компрессора. В пределе, когда кривая сжатия пересекает линию, характеризующую объем вредного пространства, всасывание воздуха в цилиндр прекращается и, следовательно, объемный к. п. д. и производительность компрессора становятся равными нулю.

На рис. 49 и 50 показаны процессы сжатия в двух- и трехступенчатом компрессоре. Линии 1—2, 3—4 и 5—6 изображают процесс адиабатного сжатия в каждом цилиндре компрессора, а линии 2—3 и 4—5 — процессы изобарного охлаждения воздуха в специальных холодильниках.

Процесс сжатия воздуха (газа) в многоцилиндровых или многоступенчатых компрессорах осуществляется последовательно во всех цилиндрах с охлаждением воздуха

после сжатия в каждом цилиндре. Обычно при этом стремятся к тому, чтобы воздух (газ) после холодильника имел ту же температуру, с которой он поступил в предыдущую ступень. Таким образом, для трехступенчатого компрессора (рис. 50)

$$t_1 = t_3 = t_5.$$

Наиболее выгодным оказывается многоступенчатое сжатие в случае, если отношение давлений в каждой ступени принимается одинаковым для всех ступеней.

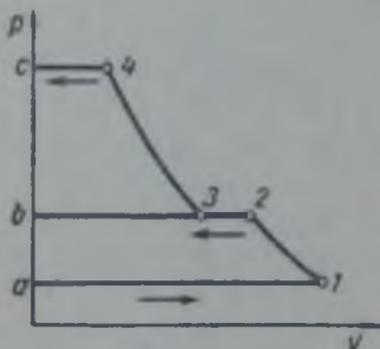


Рис. 49

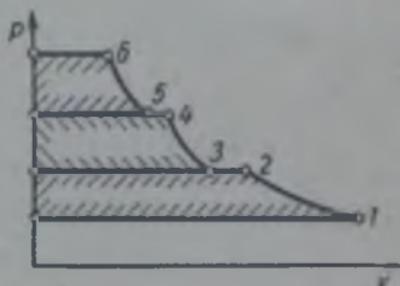


Рис. 50

Для трехступенчатого компрессора в этом случае

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_6}{p_5} = x,$$

откуда

$$x = \sqrt[3]{\frac{p_6}{p_1}},$$

или вообще

$$x = \sqrt[n]{\frac{p_k}{p_1}}, \quad (177)$$

где  $x$  — отношение давлений в каждой ступени;

$n$  — число ступеней компрессора;

$p_k$  — давление воздуха, выходящего из последней ступени;

$p_1$  — давление воздуха, поступающего в первую ступень.

Распределение давлений по формуле (177) приводит к тому, что температуры воздуха на выходе из каждой ступени равны между собой, т. е.

$$t_2 = t_4 = t_6.$$

а также к равенству работ всех ступеней. Поэтому для определения работы многоступенчатого компрессора достаточно найти работу одной ступени и увеличить ее в  $n$  раз.

На рис. 51 и 52 приведены графики адиабатного и политропного сжатия газа в трехступенчатом компрессоре в диаграмме  $Ts$ . Линии 1—2, 3—4 и 5—6 изображают

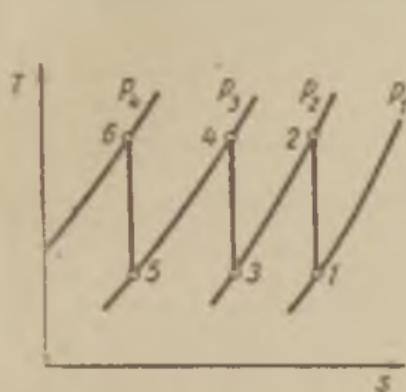


Рис. 51

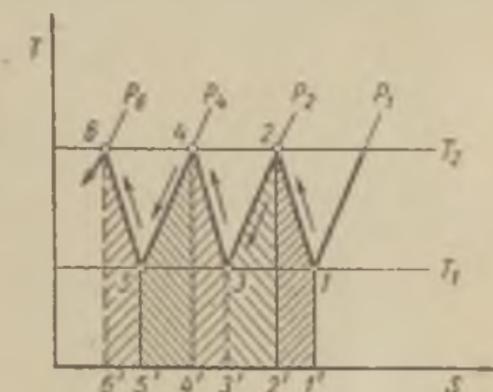


Рис. 52

процессы сжатия в отдельных цилиндрах, линии 2—3 и 4—5 — процессы охлаждения газа при постоянном давлении в первом и втором холодильниках. Площади (рис. 52) 1—2—2'—1', 3—4—4'—3' и 5—6—6'—5' изображают количество теплоты, отнимаемые от воздуха при политропном его сжатии в отдельных цилиндрах компрессора и передаваемые воде, охлаждающей стенки цилиндра.

Площади 2—2'—3'—3 и 4—4'—5'—5 изображают количества теплоты, отнимаемые от газа при его изобарном охлаждении в первом и втором холодильниках.

### Задачи

259. К газу в круговом процессе подведено 250 кДж теплоты. Термический к. п. д. равен 0,46.

Найти работу, полученную за цикл.

Отв.  $L_0 = 115$  кДж.

260. В результате осуществления кругового процесса получена работа, равная 80 кДж, а отдано охладителю 50 кДж теплоты. Определить термический к. п. д. цикла.

Отв.  $\eta_t = 0,615$ .

261. 1 кг воздуха совершает цикл Карно (см. рис. 31) в пределах температур  $t_1 = 627^\circ \text{C}$  и  $t_2 = 27^\circ \text{C}$ , причем наивысшее давление составляет 6 МПа, а наимизшее — 0,1 МПа.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к. п. д. цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

### Решение

Точка 1.

$$p_1 = 6 \text{ МПа}; T_1 = 900 \text{ К.}$$

Удельный объем газа находим из характеристического уравнения

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 900}{6 \cdot 10^6} = 0,043 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 2.

$$T_2 = 900 \text{ К.}$$

Из уравнения адиабаты (линия 2—3)

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 3^{\frac{1,4}{0,4}} = 46,8;$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 46,8 = 4,68 \text{ МПа.}$$

Из уравнения изотермы (линия 1—2)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

получаем

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2} = \frac{6 \cdot 0,043}{4,68} = 0,055 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 3.

$$p_3 = 0,1 \text{ МПа}; T_3 = 300 \text{ К.}$$

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{287 \cdot 300}{0,1 \cdot 10^6} = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 4.

$$T_4 = 300 \text{ К.}$$

Из уравнения адиабаты (линия 4—1) имеем

$$\frac{p_1}{p_4} = \left( \frac{T_1}{T_4} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 4,68,$$

$$p_4 = \frac{p_1}{4,68} = 0,128 \text{ МПа.}$$

Из уравнения изотермы (линия 3—4) получаем

$$p_3 v_3 = p_4 v_4;$$

$$v_4 = \frac{p_3 v_3}{p_4} = \frac{0,1 \cdot 0,861}{0,126} = 0,671 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0,667.$$

Подведенное количество теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 900 \lg \frac{0,055}{0,043} = 63,6 \text{ кДж/кг}.$$

Отведенное количество теплоты

$$q_2 = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 300 \lg \frac{0,861}{0,671} = 21,5 \text{ кДж/кг}.$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг}.$$

Для проверки можно воспользоваться формулой (122)

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1} = \frac{42,1}{63,6} = 0,662.$$

262. 1 кг воздуха совершает цикл Карно между температурами  $t_1 = 327^\circ \text{C}$  и  $t_2 = 27^\circ \text{C}$ ; наивысшее давление при этом составляет 2 МПа, а наинизшее — 0,12 МПа.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, работу, термический к. п. д. цикла и количества подведенной и отведенной теплоты.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } v_1 &= 0,086 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = \\ &= 0,127 \text{ м}^3/\text{кг}; v_3 = 0,717 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ v_4 &= 0,486 \text{ м}^3/\text{кг}; p_2 = 1,36 \text{ МПа}; \\ p_4 &= 0,18 \text{ МПа}; \eta_t = 0,5; l_0 = \\ &= 33,7 \text{ кДж/кг}; q_1 = 67,4 \text{ кДж/кг}; \\ q_2 &= 33,7 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

263. 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур  $t_1 = 250^\circ \text{C}$  и  $t_2 = 30^\circ \text{C}$ . Наивысшее давление  $p_1 = 1 \text{ МПа}$ , наинизшее —  $p_3 = 0,12 \text{ МПа}$ .

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, количества подведенной и отведенной теплоты, работу и термический к. п. д. цикла.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } v_1 &= 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = \\ &= 0,185 \text{ м}^3/\text{кг}; v_3 = 0,725 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ v_4 &= 0,59 \text{ м}^3/\text{кг}; p_2 = 0,81 \text{ МПа}; \\ p_4 &= 0,15 \text{ МПа}; \eta_r = 0,42; l_0 = \\ &= 18,1 \text{ кДж/кг}; q_1 = 31,1 \text{ кДж/кг}; \\ q_2 &= 18 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

264. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический к. п. д., количество подведенной и отведенной теплоты, если дано;  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ;  $\epsilon = 3,6$ ;  $\lambda = 3,33$ ;  $k = 1,4$ .

Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

### Р е ш е н и е

Расчет ведем для 1 кг воздуха.

Точка 1.

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}, t_1 = 20^\circ \text{C}.$$

Удельный объем определяем из уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2.

Так как степень сжатия

$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = 3,6,$$

то

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{0,84}{3,6} = 0,233 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура в конце адиабатного сжатия определится из соотношения

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 3,6^{0,4} = 489 \text{ К};$$

$$t_2 = 216^\circ \text{C}.$$

Давление в конце адиабатного сжатия

$$p_3 = \frac{RT_3}{v_3} = \frac{287 \cdot 489}{0,233 \cdot 10^3} = 0,6 \text{ МПа.}$$

Точка 3.

Удельный объем  $v_3 = v_2 = 0,233 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 2—3) получаем

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda = 3,33.$$

Следовательно,

$$p_3 = p_2 \lambda = 0,6 \cdot 3,33 = 2 \text{ МПа};$$

$$T_3 = T_2 \lambda = 489 \cdot 3,33 = 1628 \text{ К}; t_3 = 1355^\circ \text{ С};$$

Точка 4.

Удельный объем  $v_4 = v_1 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Температура в конце адиабатного расширения

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 1628 \frac{1}{3,6^{0,4}} = 976 \text{ К.}$$

Давление в конце адиабатного расширения определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4—1):

$$p_4 = p_1 \frac{T_4}{T_1} = 0,1 \frac{976}{293} = 0,33 \text{ МПа.}$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = \frac{20,93}{28,96} (1628 - 489) = 825 \text{ кДж/кг};$$

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = \frac{20,93}{28,96} (976 - 293) = 495 \text{ кДж/кг.}$$

Термический к. п. д. цикла находим по формуле (148)

$$\eta_t = \frac{825 - 495}{825} = \frac{330}{825} = 0,4 = 40 \%$$

или, по формуле (153),

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{e^{k-1}} = 1 - \frac{1}{3,6^{0,4}} = 0,4 = 40 \%.$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 330 \text{ кДж/кг.}$$

265. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить параметры характерных для цикла точек, количества подведенной и отведенной теплоты, термический к. п. д. цикла и его полезную работу, если дано:

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1 = 100^\circ \text{ С}; \epsilon = 6; \lambda = 1,6; k = 1,4.$$

Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Отв.  $v_1 = 1,07 \text{ м}^3/\text{кг}; v_2 = 0,178 \text{ м}^3/\text{кг}; T_2 = 761 \text{ К}; T_3 = 1217 \text{ К}; T_4 = 597 \text{ К}; p_3 = 1,96 \text{ МПа}; p_4 = 0,156 \text{ МПа}; q_1 = 329,7 \text{ кДж/кг}; q_2 = 162 \text{ кДж/кг}; \eta_t = 0,51; l_0 = 167,7 \text{ кДж/кг}.$

266. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  степень сжатия  $\epsilon = 5$ , степень увеличения давления  $\lambda = 1,5$ .

Определить термический к. п. д. этого цикла, а также цикла Карно, совершающегося при тех же предельных температурах. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Отв. 1)  $\eta_t = 0,476$ ; 2)  $\eta_{t_k} = 0,651$ .

267. Построить график зависимости термического к. п. д. от степени сжатия для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  для значений  $\epsilon$  от 2 до 10 при  $k = 1,37$ .

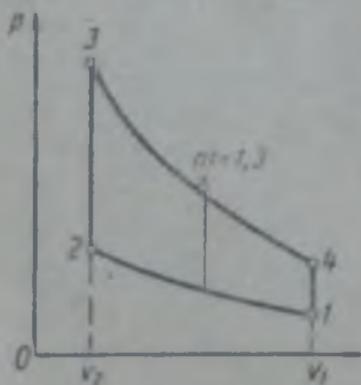


Рис. 53

268. 1 кг воздуха работает по циклу, изображенному на рис. 53. Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , начальная температура  $t_1 = 27^\circ \text{ С}$ , а степень сжатия  $\epsilon = 5$ . Количество теплоты, подводимой во время изохорного сжатия, равно  $1300 \text{ кДж/кг}$ .

Определить параметры воздуха в характерных точках и полезную работу цикла. Теплоемкость воздуха считать постоянной.

## Р е ш е н и е

Точка 1.

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}; T_1 = 300 \text{ К};$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{0,1 \cdot 10^6} = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2.

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 5; v_2 = \frac{v_1}{5} = \frac{0,86}{5} = 0,172 \text{ м}^3/\text{кг};$$

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

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} = 300 \cdot 5^{0,3} = 510 \text{ К}.$$

Давление  $p_2$  находим из выражения

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

$$p_2 = \frac{p_1 v_1 T_2}{v_2 T_1} = \frac{0,1 \cdot 5 \cdot 510}{300} = 0,85 \text{ МПа}.$$

Точка 3.

Температура в точке 3 определяется из соотношения

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2),$$

отсюда

$$T_3 = \frac{q_1}{c_v} + T_2.$$

Принимая  $\mu c_v = 20,98 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ , получаем

$$c_v = \frac{20,98}{28,96} = 0,723 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

следовательно,

$$T_3 = \frac{1300}{0,723} + 510 = 2308 \text{ К};$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2};$$

$$p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 0,85 \frac{2308}{510} = 3,85 \text{ МПа}.$$

Точка 4.

$$v_3 = v_1 = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{m-1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{m-1};$$

$$T_4 = T_3 \frac{1}{\epsilon^{m-1}} = \frac{2308}{5^{0,33}} = 1350 \text{ К};$$

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{T_4}{T_1}; \quad p_4 = 0,1 \frac{1350}{300} = 0,45 \text{ МПа}.$$

Работа цикла может быть определена как разность между работой расширения и работой сжатия.

Работа расширения

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{1}{m-1} (p_3 v_3 - p_4 v_4) = \\ &= \frac{1}{0,33} (3,85 \cdot 10^6 \cdot 0,172 - 0,45 \cdot 10^6 \cdot 0,86) = \\ &= \frac{1 \cdot 10^6}{0,33} (0,662 - 0,387) = 833 \text{ 000 Дж/кг} = 833 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Работа сжатия (абсолютное значение)

$$\begin{aligned} l_2 &= \frac{1}{m-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \\ &= \frac{1}{0,33} (0,85 \cdot 10^6 \cdot 0,172 - 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,86) = \\ &= \frac{1 \cdot 10^6}{0,33} (0,146 - 0,086) = 182 \text{ 000 Дж/кг} = 182 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Работа цикла

$$l_0 = l_1 - l_2 = 833 - 182 = 651 \text{ кДж/кг}.$$

269. Поршневой двигатель работает на воздухе по циклу с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ . Начальное состояние воздуха:  $p_1 = 0,785 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 17^\circ \text{С}$ . Степень сжатия  $\epsilon = 4,6$ . Количество подведенной теплоты составляет  $100,5 \text{ кДж/кг}$ .

Найти термический к. п. д. двигателя и его мощность, если диаметр цилиндра  $d = 0,24 \text{ м}$ , ход поршня  $S = 0,34 \text{ м}$ , число оборотов  $n = 21 \text{ рад/с}$  ( $200 \text{ об/мин}$ ) и за каждые два оборота совершается один цикл.

$$\text{Отв. } \eta_t = 0,457; N = 14,5 \text{ кВт}.$$

270. Температура воспламенения топлива, подаваемого в цилиндр двигателя с изобарным подводом теплоты, равна  $800^{\circ}\text{C}$ .

Определить минимально необходимое значение степени сжатия  $\epsilon$ , если начальная температура воздуха  $t_1 = 77^{\circ}\text{C}$ . Сжатие считать адиабатным,  $k = 1,4$ .

Отв.  $\epsilon = 16,4$ .

271. Для цикла с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  (рис. 54) найти параметры в характерных точках, полезную работу, термический к. п. д., количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 0,1$  МПа;  $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $\epsilon = 12,7$ ;  $k = 1,4$ . Рабочее тело — воздух. Теплоемкость считать постоянной.

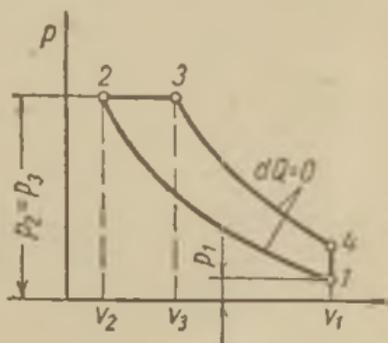


Рис. 54

### Решение

Точка 1.

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}; t_1 = 20^{\circ}\text{C}.$$

Определяем удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2.

Так как степень сжатия

$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = 12,7,$$

то

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{0,84}{12,7} = 0,0661 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Температура в конце адиабатного сжатия

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 12,7^{0,4} = 293 \cdot 2,76 = 809 \text{ К};$$

$$t_2 = 536^{\circ}\text{C}.$$

Давление в конце адиабатного сжатия

$$p_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 809}{0,0661 \cdot 10^6} = 3,51 \text{ МПа}.$$

Точка 3.

Из соотношения параметров в изобарном процессе

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho = 2,$$

отсюда

$$v_3 = v_2 \rho = 0,0661 \cdot 2 = 0,1322 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_3 = T_2 \rho = 809 \cdot 2 = 1618 \text{ К}; \quad t_3 = 1345^\circ \text{ С};$$

$$p_3 = p_2 = 3,51 \text{ МПа}.$$

Точка 4.

$$v_4 = v_1 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Давление в конце адиабатного расширения

$$\frac{p_3}{p_4} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^k = \left( \frac{v_1}{v_3} \right)^k = \left( \frac{0,84}{0,1322} \right)^{1,4} = 13,3;$$

$$p_4 = \frac{3,51}{13,3} = 0,264 \text{ МПа}.$$

Температуру в конце адиабатного сжатия определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4—1);

$$T_4 = T_1 \frac{p_4}{p_1} = 293 \frac{0,264}{0,1} = 773 \text{ К};$$

$$t_4 = 500^\circ \text{ С}.$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = q_{2-3} = c_p (t_3 - t_2) = \frac{29,3}{28,96} (1345 - 536) = 818 \text{ кДж/кг}.$$

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = q_{4-1} = c_v (t_4 - t_1) = \\ = \frac{20,97}{28,96} (500 - 20) = 347 \text{ кДж/кг}.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_k = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{818 - 347}{818} = 0,576 = 57,6\%.$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 818 - 347 = 471 \text{ кДж/кг}.$$

272. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  определить параметры в характерных точках, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты и термический к. п. д., если дано:  $p_1 = 100$  кПа,  $t_1 = 70^\circ$ ;  $\epsilon = 12$ ;  $k = 1,4$ ;  $\rho = 1,67$ . Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } v_1 &= 0,98 \text{ м}^3/\text{кг}; & v_2 &= \\ &= 0,082 \text{ м}^3/\text{кг}; & v_3 &= 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}; & p_2 &= \\ &= 3,24 \text{ МПа}; & p_4 &= 0,2 \text{ МПа}; & q_1 &= \\ &= 627 \text{ кДж/кг}; & q_2 &= 255 \text{ кДж/кг}; \\ l_0 &= 372 \text{ кДж/кг}; & \eta_t &= 0,593. \end{aligned}$$

273. Найти давление и объем в характерных точках цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ , а также термический к. п. д. и полезную работу, если дано:  $p_1 = 100$  кПа,  $\epsilon = 14$ ;  $\rho = 1,5$ ;  $k = 1,4$ .

Диаметр цилиндра  $d = 0,3$  м, ход поршня  $S = 0,45$  м. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость считать постоянной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } V_1 &= V_4 = 0,03416 \text{ м}^3; & V_2 &= \\ &= 0,00244 \text{ м}^3; & V_3 &= 0,00366 \text{ м}^3; & p_2 &= \\ &= 0,402 \text{ МПа}; & p_4 &= 0,176 \text{ МПа}, & \eta_t &= \\ &= 0,65. \end{aligned}$$

274. Построить график зависимости термического к. п. д. цикла с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  от степени предварительного расширения для значений его от 1,5 до 3,5 при  $\epsilon = 16$  и  $k = 1,4$ .

275. В цикле с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  начальное давление воздуха  $p_1 = 0,09$  МПа, температура  $t_1 = 47^\circ$  С, степень сжатия  $\epsilon = 12$ , степень предварительного расширения  $\rho = 2$  и  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup>.

Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и его термический к. п. д. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } V_2 &= 0,0832 \text{ м}^3; & V_3 &= 0,166 \text{ м}^3; \\ p_2 &= 2,92 \text{ МПа}; & p_4 &= 0,24 \text{ МПа}; & T_2 &= \\ &= 865 \text{ К}; & T_3 &= 1730 \text{ К}; & T_4 &= 845 \text{ К}; \\ L_0 &= 478 \text{ кДж}; & Q_1 &= 842 \text{ кДж}; & Q_2 &= \\ &= 364 \text{ кДж}; & \eta_t &= 0,565. \end{aligned}$$

276. Определить термический к. п. д. цикла, состоящего из двух изохор и двух изобар (рис. 55). Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

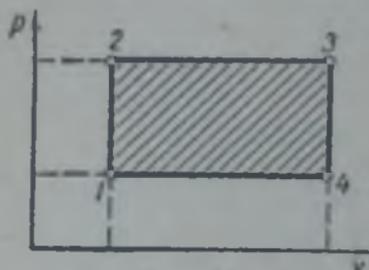


Рис. 55

### Решение

Обозначим в данном цикле:  
 $p_2/p_1 = \lambda$  — степень повышения давления;  
 $v_3/v_2 = \rho$  — степень расширения.

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_{\text{т}} = 1 - \frac{q_2}{q_1},$$

где  $q_1$  — подведенная теплота;

$q_2$  — отведенная теплота.

Так как для данного цикла

$$q_1 = q_{1-2} + q_{2-3}$$

и

$$q_2 = q_{3-4} + q_{4-1},$$

то

$$q_1 = c_v(T_2 - T_1) + c_p(T_3 - T_2)$$

и

$$q_2 = c_v(T_3 - T_4) + c_p(T_4 - T_1).$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_{\text{т}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_3 - T_4) + c_p(T_4 - T_1)}{c_v(T_2 - T_1) + c_p(T_3 - T_2)}.$$

Выразим температуры в характерных точках цикла через начальную  $T_1$  и величины  $\lambda$  и  $\rho$ ;

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

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho; \quad T_3 = T_1 \lambda \rho;$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{p_4}{p_3}; \quad T_4 = T_3 \frac{1}{\lambda} = T_1 \rho.$$

Подставляя значения  $T$  в выражение для  $\eta_{\text{т}}$ , получаем

$$\eta_{\text{т}} = 1 - \frac{T_3 - T_4 + k(T_4 - T_1)}{T_2 - T_1 + k(T_3 - T_2)} =$$

$$= 1 - \frac{T_1 \rho (\lambda - 1) + k T_1 (\rho - 1)}{T_1 (\lambda - 1) + k T_1 (\rho - 1)} =$$

$$= 1 - \frac{\rho (\lambda - 1) + k (\rho - 1)}{\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)} = 1 - \frac{\rho (\lambda - 1 + k) - k}{\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)}.$$

277. Найти термический к. п. д. цикла, изображенного на рис. 56.

Пользоваться при выводе следующими обозначениями:

$$v_1/v_2 = \varepsilon; \quad p_3/p_2 = \lambda; \quad v_4/v_3 = \rho; \quad v_5/v_4 = \delta.$$

Теплоемкость принять постоянной.

$$\text{Отв. } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \times$$

$$\times \frac{\lambda \rho \varepsilon^k \delta^{1-k} + \rho \delta (k-1) - k\varepsilon}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}.$$

278. Определить термический к. п. д. цикла (рис. 57), состоящего из изохор, адиабаты и изобары.

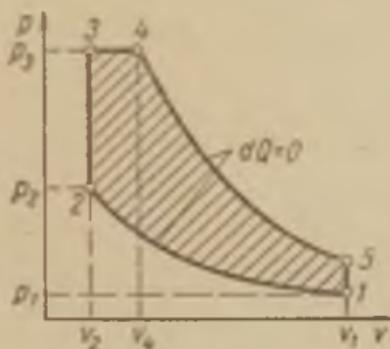


Рис. 56

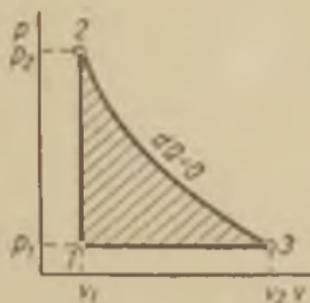


Рис. 57

### Решение

Обозначим отношение давления  $p_2/p_1$  через  $\lambda$ . Найдем количество подведенной и отведенной теплоты:

$$q_1 = c_v (T_2 - T_1);$$

$$q_2 = c_p (T_3 - T_1).$$

Термический к. п. д. цикла

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p (T_3 - T_1)}{c_v (T_2 - T_1)} = \\ &= 1 - \frac{k (T_3 - T_1)}{T_2 - T_1}. \end{aligned}$$

Определяем температуры  $T_3$  и  $T_2$ :

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

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Следовательно,

$$T_3 = T_2 \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \lambda \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \lambda^{\frac{1}{k}}.$$

Подставляя значения  $T_2$  и  $T_3$  в выражение для термического к. п. д., получим

$$\eta_{\text{т}} = 1 - \frac{kT_1 \left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1\right)}{T_1(\lambda - 1)}.$$

Следовательно, к. п. д. цикла

$$\eta_{\text{т}} = 1 - \frac{k \left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1\right)}{\lambda - 1}.$$

279. Найти термический к. п. д. цикла, изображенного на рис. 58. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

$$\text{Отв. } \eta_{\text{т}} = 1 - \frac{\lambda \delta^{1-k} + \delta(k-1) - k}{\lambda - 1}.$$

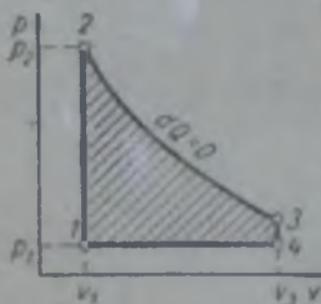


Рис. 58

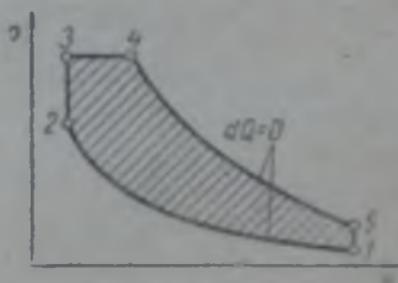


Рис. 59

280. В цикле поршневого двигателя со смешанным подводом теплоты (рис. 59) начальное давление  $p_1 = 90$  кПа, начальная температура  $t_1 = 67^\circ \text{C}$ . Количество подведенной теплоты  $Q = 1090$  кДж/кг. Степень сжатия  $\epsilon = 10$ .

Какая часть теплоты должна выделяться в процессе при  $v = \text{const}$ , если максимальное давление составляет 4,5 МПа. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

$$\text{Отв. } \frac{Q_c}{Q_1} = 0,675.$$

281. Рабочее тело поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты обладает свойствами воздуха. Известны начальные параметры  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  и следующие характеристики цикла:  $\epsilon = 7$ ,  $\lambda = 2,0$  и  $\rho = 1,2$ .

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенной теплоты, полезную работу и термический к. п. д. цикла. Рабочее тело — воздух. Теплоемкость считать постоянной.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } v_1 &= 0,870 \text{ м}^3/\text{кг}; & v_2 &= \\ &= 0,124 \text{ м}^3/\text{кг}; & v_3 &= 0,149 \text{ м}^3/\text{кг}; & p_2 &= \\ &= 1,52 \text{ МПа}; & p_3 &= 3,05 \text{ МПа}; & p_5 &= \\ &= 0,26 \text{ МПа}; & t_2 &= 387^\circ \text{C}; & t_3 &= \\ &= 1047^\circ \text{C}; & t_4 &= 1311^\circ \text{C}; & t_5 &= 511^\circ \text{C}; \\ q_1 &= 744,2 \text{ кДж/кг}; & q_2 &= \\ &= 348,2 \text{ кДж/кг}; & l_0 &= 396 \text{ кДж/кг}; \\ \eta_r &= 0,532. \end{aligned}$$

282. Для идеального цикла газовой турбины с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  (см. рис. 39) найти параметры в характерных точках, полезную работу, термический к. п. д., количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 100$  кПа;  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ ;  $t_3 = 700^\circ \text{C}$ ;

$$\lambda = \frac{p_2}{p_1} = 10; \quad k = 1,4.$$

Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

### Решение

Точка 1.

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{100 \cdot 10^3} = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2.

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

$$T_2 = 300 \cdot 10^{\frac{0,4}{1,4}} = 300 \cdot 1,93 = 579 \text{ К};$$

$$t_2 = 306^\circ \text{ С};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \lambda; \quad p_2 = p_1 \lambda = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ кПа} = 1 \text{ МПа}.$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 579}{1 \cdot 10^6} = 0,166 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3.

$$T_3 = 700 + 273 = 973 \text{ К};$$

$$p_3 = p_2 = 1 \text{ МПа};$$

$$v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2}; \quad v_3 = 0,166 \frac{973}{579} = 0,279 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 4.

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_3}{T_4}; \quad \frac{973}{579} = \frac{579}{300};$$

$$T_4 = \frac{973 \cdot 300}{579} = 504 \text{ К};$$

$$t_4 = 229^\circ \text{ С}; \quad p_4 = p_1 = 0,1 \text{ МПа};$$

$$\frac{v_4}{v_1} = \frac{T_4}{T_1}; \quad v_4 = v_1 \frac{T_4}{T_1} = 0,861 \cdot \frac{504}{300} = 1,45 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество теплоты

$$q_1 = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) = \\ = \frac{29,31}{28,96} (973 - 579) = 399 \text{ кДж/кг};$$

$$q_2 = q_{4-1} = c_p (T_4 - T_1) = \\ = \frac{29,31}{28,96} (500 - 300) = 202 \text{ кДж/кг}.$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 399 - 202 = 197 \text{ кДж/кг}.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{202}{399} = 0,494.$$

283. Для идеального цикла газовой турбины с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  (см. рис. 39) определить параметры в характерных точках, полезную работу, термический к. п. д., количество подведенной и отведенной теплоты. Дано;  $p_1 = 0,1$  МПа;  $t_1 = 17^\circ \text{C}$ ;  $t_3 = 600^\circ \text{C}$ ;  $\lambda = p_2/p_1 = 8$ . Рабочее тело — воздух. Теплоемкость принять постоянной.

Отв.  $v_1 = 0,831$  м<sup>3</sup>/кг;  $v_2 = 0,189$  м<sup>3</sup>/кг;  $v_3 = 0,313$  м<sup>3</sup>/кг;  $v_4 = 1,38$  м<sup>3</sup>/кг;  $t_2 = 254^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = p_3 = 0,8$  МПа;  $q_1 = 350$  кДж/кг;  $q_2 = 192,2$  кДж/кг;  $\eta_t = 0,45$ .

284. Газовая турбина работает по циклу с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ . Известны параметры;  $p_1 = 0,1$  МПа;  $t_1 = 40^\circ \text{C}$ ;  $t_4 = 400^\circ \text{C}$ , а также степень увеличения давления  $\lambda = 8$ . Рабочее тело — воздух.

Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу, совершаемую за цикл, и термический к. п. д. Теплоемкость считать постоянной.

Отв.  $v_1 = 0,9$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_2 = 0,8$  МПа;  $v_2 = 0,204$  м<sup>3</sup>/кг;  $t_2 = 297^\circ \text{C}$ ;  $v_3 = 0,438$  м<sup>3</sup>/кг;  $t_3 = 948^\circ \text{C}$ ;  $v_4 = 1,93$  м<sup>3</sup>/кг;  $q_1 = 659$  кДж/кг;  $q_2 = 364$  кДж/кг;  $l_0 = 296$  кДж/кг;  $\eta_t = 0,45$ .

285. На рис. 60 приведена принципиальная схема газотурбинной установки, работающей с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  и с полной регенерацией тепла. На рисунке:

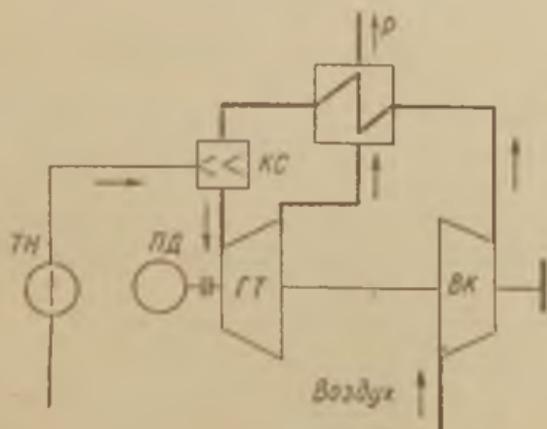


Рис. 60

$TН$  — топливный насос;  $КС$  — камера сгорания;  $ГТ$  — газовая турбина;  $ВК$  — воздушный компрессор;  $ПД$  — пусковой двигатель;  $P$  — регенеративный подогреватель. Цикл этой установки представлен на рис. 42. Известны параметры  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  и  $t_3 = 400^\circ \text{C}$ , а также степень повышения давления в цикле  $\lambda = 6$ . Рабочее тело — воздух

Определить термический к. п. д. цикла. Какова экономия от введения регенерации?

Отв.  $\eta_{\text{ре}} = 0,55$ ; экономия составляет 37,5%.

286. Газовая турбина работает по циклу с подводом тепла при  $p = \text{const}$  без регенерации (см. рис. 39). Известны степень повышения давления в цикле  $\lambda = p_2/p_1 = 7$  и степень предварительного расширения  $\rho = v_3/v_2 = 2,4$ . Рабочее тело — воздух.

Найти термический к. п. д. этого цикла и сравнить его с циклом поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  при одинаковых степенях сжатия  $\epsilon$  и при одинаковых степенях расширения  $\rho$ . Представить цикл в диаграмме  $Ts$ .

Отв.  $\eta_{\text{ГТ}} = 0,426$ ;  $\eta_{\text{п.д.}} = 0,297$ .

287. Газотурбинная установка работает с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  и с полной регенерацией. Известны параметры:  $t_1 = 30^\circ \text{C}$  и  $t_3 = 400^\circ \text{C}$ , а также  $\lambda = p_2/p_1 = 4$ . Рабочее тело — воздух.

Определить термический к. п. д. этого цикла. Изобразить цикл в диаграмме  $Ts$ .

Отв.  $\eta_{\text{ре}} = 0,585$ .

288. Построить график зависимости термического к. п. д., идеального цикла газовой турбины с подводом теплоты при  $p = \text{const}$  для  $\lambda = 2, 4, 6, 8$  и 10.

289. Компрессор всасывает  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  и сжимает его до давления  $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую работу компрессора при адиабатном сжатии и температуру воздуха в конце сжатия.

Отв.  $L_0 = 81,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/ч} = 81,6 \text{ МДж/ч}$ ;  $t_2 = 191^\circ \text{C}$ .

290. Компрессор всасывает  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $T_1 = 27^\circ \text{ С}$ . Конечное давление воздуха составляет  $0,8 \text{ МПа}$ .

Найти теоретическую мощность двигателя для привода компрессора и расход охлаждающей воды, если температура ее повышается на  $13^\circ \text{ С}$ . Расчет произвести для изотермического, адиабатного и политропного сжатия. Показатель политропы принять равным  $1,2$ , а теплоемкость воды  $4,19 \text{ кДж/кг}$ .

### Решение

1. Изотермическое сжатие. Работу компрессора определяем по уравнению (159):

$$L_0 = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 2,303 \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 100 \lg 8 = 20,8 \text{ МДж/ч.}$$

Теоретическая мощность двигателя по формуле (171)

$$N = \frac{L_0}{1000 \cdot 3600} = \frac{20,8 \cdot 10^6}{1000 \cdot 3600} = 5,8 \text{ кВт.}$$

Теплоту, отводимую с охлаждающей водой, находим из равенства

$$Q = L_0 = 20,8 \text{ МДж/ч.}$$

Следовательно, расход охлаждающей воды

$$M = \frac{20,8 \cdot 10^6}{13 \cdot 4,19} = 382 \text{ кг/ч.}$$

2. Адиабатное сжатие. По уравнению (163)

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1,4}{0,4} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 100 \left( 8^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) = 28,4 \text{ МДж/ч.} \end{aligned}$$

Мощность двигателя

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000} = \frac{28,4 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1000} = 7,9 \text{ кВт.}$$

3. Политропное сжатие. По уравнению (168)

$$L_0 = \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] =$$

$$= \frac{1,2}{0,2} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 100 \left( 8^{\frac{0,2}{1,2}} - 1 \right) = 24,8 \text{ МДж/ч.}$$

Мощность двигателя определяется по формуле (171):

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000} = \frac{24,8 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1000} = 6,9 \text{ кВт.}$$

Количество теплоты, отводимой от воздуха, находим из уравнения (118):

$$Q = M c_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1) =$$

$$= -116 \cdot 0,723 \cdot 124 = -10\,400 \text{ кДж/ч,}$$

причем

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} = 8^{\frac{0,2}{1,2}} = 1,414;$$

$$T_2 = T_1 \cdot 1,414 = 424 \text{ К} = 151^\circ \text{ С;}$$

$$c_v \frac{m-k}{m-1} = 0,723 \frac{-0,2}{0,2} = -0,723 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К);}$$

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 100}{287 \cdot 300} = 116 \text{ кг/ч.}$$

Расход охлаждающей воды

$$M = \frac{10\,400}{13,4,19} = 190 \text{ кг/ч.}$$

291. Определить мощность идеального компрессора с изотермическим сжатием и часовое количество теплоты, передаваемое охлаждающей водой, если  $p_1 = 101\,325 \text{ Па}$ , а давление сжатого воздуха  $p_2 = 0,4 \text{ МПа}$ . Расход всасываемого воздуха  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

$$\text{Отв. } N = 14,2 \text{ кВт; } Q =$$

$$= 69\,580 \text{ кДж/ч.}$$

292. Компрессор всасывает  $250 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 25^\circ \text{С}$  и сжимает его до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$ .

Какое количество воды нужно пропускать через рубашку компрессора в час, если сжатие происходит политропно с показателем  $m = 1,2$  и температура воды повышается на  $15^\circ \text{С}$ ?

*Отв.* 390 л/ч.

293. Компрессор всасывает  $120 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 27^\circ \text{С}$  и сжимает его до  $p_2 = 1,2 \text{ МПа}$ .

Определить; а) температуру сжатого воздуха при выходе из компрессора; б) объем сжатого воздуха; в) работу и мощность, расходуемые на сжатие воздуха.

Расчет произвести для изотермического, адиабатного и политропного сжатия воздуха. Показатель политропы принять равным 1,3.

*Отв.* а)  $t_2 = t_1$ ;  $V_2 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $L_0 = 29,8 \text{ МДж/ч}$ ;  $N = 8,3 \text{ кВт}$ ; б)  $t_2 = 339^\circ \text{С}$ ;  $V_2 = 20,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $L_0 = 43,4 \text{ МДж/ч}$ ;  $N = 12 \text{ кВт}$ ; в)  $t_2 = 257^\circ \text{С}$ ;  $V_2 = 17,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $L_0 = 40,2 \text{ МДж/ч}$ ;  $N = 11,2 \text{ кВт}$ .

294. Компрессор всасывает в минуту  $100 \text{ м}^3$  водорода при температуре  $20^\circ \text{С}$  и давлении  $0,1 \text{ МПа}$  и сжимает его до  $0,8 \text{ МПа}$ .

Определить потребную мощность двигателя для привода компрессора при адиабатном сжатии, если эффективный к. п. д. компрессора  $\eta_k = 0,7$ .

*Отв.*  $N = 678 \text{ кВт}$ .

295. Приемные испытания компрессоров обычно проводятся не на газе, на котором должен работать компрессор, а на воздухе.

Для условий предыдущей задачи найти потребную мощность двигателя при работе компрессора на воздухе. Сравнить полученные результаты.

*Отв.*  $N = 678 \text{ кВт}$ .

296. Производительность компрессора  $V_k = 700 \text{ м}^3$  воздуха в час; начальные параметры воздуха;  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ ; конечное давление  $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора, если сжатие будет производиться



Определить потребную мощность двигателя для привода компрессора и его объемный к. п. д. Эффективный к. п. д. компрессора  $\eta_c = 0,7$ .

### Решение

Работа компрессора определяется площадью индикаторной диаграммы 1—2—3—4. Эта площадь может быть определена как разность площадей 1—2—6—5 и 4—3—6—5, т. е. как разность работ двух идеальных компрессоров. Следовательно,

$$\begin{aligned} L_0 &= L_{1-2-6-5} - L_{4-3-6-5} = \\ &= \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] - \\ &- \frac{m}{m-1} p_4 V_4 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \\ &= \frac{m}{m-1} p_1 (V_1 - V_4) \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \end{aligned}$$

Для 1 м<sup>3</sup> всасываемого воздуха  $V_1 - V_4 = 1$  и, следовательно,

$$L_0 = \frac{m}{m-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

Полученное выражение совпадает с формулой (169), определяющей работу компрессора при отсутствии вредного пространства. Объясняется это тем, что сжатый воздух, остающийся во вредном пространстве, расширяется до начального давления, компенсируя ту работу, которая была затрачена на его сжатие.

Итак, теоретическая работа компрессора

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{1,3 \cdot 0,1 \cdot 10^6}{0,3} \left( 7^{\frac{0,3}{1,3}} - 1 \right) = \frac{130\,000}{0,3} (1,566 - 1) = \\ &= 246\,000 \text{ Дж/м}^3 = 246 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Потребная мощность двигателя по формуле (176)

$$N = \frac{400 \cdot 246\,000}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,7} = 39 \text{ кВт.}$$

Объемный к. п. д. компрессора по уравнению (174)

$$\lambda_v = \frac{v_1 - v_4}{v_h}$$

Определяем значения величин, входящих в это выражение:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_h = 0,84 - 0,05v_h$$

Следовательно,

$$v_h = \frac{0,84}{1,05} = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_c = 0,05 \cdot 0,8 = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг},$$

или

$$v_c = 0,84 - 0,8 = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\begin{aligned} v_4 &= v_3 \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{m}} = v_c \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{m}} = 0,04 \cdot 7^{\frac{1}{1,3}} = 0,04 \cdot 4,467 = \\ &= 0,179 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Тогда объемный к. п. д. компрессора

$$\lambda_v = \frac{0,84 - 0,179}{0,8} = \frac{0,661}{0,8} = 0,826.$$

Объемный к. п. д. компрессора можно также вычислить по формуле (175):

$$\lambda_v = 1 - a \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right].$$

Тогда

$$\lambda_v = 1 - 0,05 \left( 7^{\frac{1}{1,3}} - 1 \right) = 1 - 0,05 (4,467 - 1) = 0,827.$$

300. Относительная величина вредного пространства в одноступенчатом компрессоре составляет 0,05. Производительность компрессора равна 500 м<sup>3</sup> воздуха при  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ . Конечное давление  $p_2 = 0,9$  МПа. Сжатие воздуха и расширение его после нагнетания происходят по политропе с показателем  $m = 1,3$ .

Определить работу, затрачиваемую на  $1 \text{ м}^3$  всасываемого воздуха, мощность двигателя для привода компрессора и его объемный к. п. д.

$$\text{Отв. } l'_0 = 0,286 \text{ МДж/м}^3; N = 39,7 \text{ кВт}; \lambda_v = 0,779.$$

301. Относительная величина вредного пространства одноступенчатого поршневого компрессора равна 5%. Давление всасываемого воздуха  $p_1 = 1$  бар.

Определить, при каком предельном давлении нагнетания производительность компрессора станет равной нулю. Процесс расширения воздуха, находящегося во вредном пространстве, и процесс сжатия воздуха считать адиабатными.

### Р е ш е н и е

Производительность компрессора станет равной нулю при объемном к. п. д., равном нулю, т. е. когда

$$\lambda_v = 1 - a \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] = 1 - 0,05 \left( p_2^{\frac{1}{k}} - 1 \right) = 0.$$

Решая это уравнение, получаем

$$p_2 = 21^{1,4} = 7,1 \text{ МПа.}$$

Следовательно, предельное давление, при котором производительность компрессора станет равна нулю, составляет 7,1 МПа.

302. Компрессор всасывает  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $t_1 = 27^\circ \text{С}$  и давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и сжимает его до давления  $p_2 = 6,4 \text{ МПа}$ .

Принимая процесс сжатия политропным с показателем  $m = 1,2$ , определить работу, затраченную на сжатие воздуха в компрессоре.

### Р е ш е н и е

При политропном сжатии конечная температура воздуха

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} = 300 \cdot 64^{\frac{0,3}{1,2}} = 780 \text{ К}; t_2 = 507^\circ \text{С.}$$

Считая недопустимым такое повышение температуры воздуха, рассмотрим двухступенчатое сжатие. По формуле (177) определяем отношение давления в каждой ступени:

$$x = \sqrt{\frac{64}{1}} = 8.$$

Работа одной ступени

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1,3}{0,3} 0,1 \cdot 10^3 \cdot 100 \left( 8^{\frac{0,3}{1,3}} - 1 \right) = \\ &= 26,7 \cdot 10^6 \text{ Дж/ч} = 26,7 \text{ МДж/ч}. \end{aligned}$$

Так как при равенстве отношений давлений в каждой степени работа, затрачиваемая на каждую ступень, одинакова, то работа компрессора

$$L_0 = n L_k = 2 \cdot 26,7 \cdot 10^6 = 53,4 \text{ МДж/ч}.$$

Если бы компрессор был одноступенчатым, то затрачиваемая в компрессоре работа

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \\ &= \frac{0,3}{1,3} 0,1 \cdot 10^3 \cdot 100 \left( 64^{\frac{0,3}{1,3}} - 1 \right) = \\ &= 69,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/ч} = 69,6 \text{ МДж/ч}. \end{aligned}$$

Таким образом, применение двухступенчатого компрессора дает экономию

$$\frac{69,6 - 53,4}{69,6} = \frac{16,2}{69,6} = 0,233 = 23,3\%.$$

303. Воздух при давлении 0,1 МПа и температуре 20° С должен быть сжат по адиабате до давления 0,8 МПа.

Определить температуру в конце сжатия, теоретическую работу компрессора и величину объемного к. п. д.: 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.

### Р е ш е н и е

**Одноступенчатое сжатие.** Температуру в конце сжатия определяем по формуле (91):

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293 \cdot 8^{\frac{0,4}{1,4}} = \\ &= 293 \cdot 1,81 = 530 \text{ К} = 257^\circ \text{С}. \end{aligned}$$

Теоретическая работа компрессора по формуле (162)

$$\begin{aligned} l_0 &= \frac{\kappa}{\kappa-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1,4}{0,4} 287 \cdot 293 (1,81 - 1) = 238 410 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

Объемный к. п. д. компрессора находим по формуле (175):

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1 - a \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} - 1 \right] = \\ &= 1 - 0,08 \left( 8^{\frac{1}{1,4}} - 1 \right) = 0,73. \end{aligned}$$

**Двухступенчатое сжатие.** Степень сжатия в каждой ступени определяем по уравнению (177):

$$x = \sqrt{\frac{0,8}{0,1}} = 2,84.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293 \cdot 2,84^{\frac{0,4}{1,4}} = \\ &= 293 \cdot 1,35 = 396 \text{ К} = 123^\circ \text{С}. \end{aligned}$$

Теоретическая работа компрессора в обеих ступенях

$$l_0 = 2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] =$$

$$= 2 \frac{1,4}{0,4} 287 \cdot 293 (1,35 - 1) = 206\,000 \text{ Дж/кг.}$$

Объемный к. п. д.

$$\lambda_0 = 1 - 0,08 \left( 2,84^{\frac{1}{1,4}} - 1 \right) = 0,912.$$

Полученные результаты приведены в таблице.

Наименование величин	Одноступенчатое сжатие	Двухступенчатое сжатие
Температура в конце сжатия в °С . . . . .	257	123
Теоретическая затрата работы в Дж/кг . . . . .	238 410	206 000
Объемный к. п. д. . . . .	0,73	0,912

Приведенные данные наглядно показывают преимущества двухступенчатого сжатия.

304. Двухступенчатый компрессор всасывает воздух при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  и сжимает его до конечного давления  $p_2 = 4$  МПа. Между ступенями компрессора установлен промежуточный холодильник, в котором воздух охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры. Производительность компрессора  $V_k = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Определить теоретическую мощность каждой ступени и количество теплоты, 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  $m = 1,3$ . Изобразить процесс сжатия и охлаждения воздуха в диаграммах  $p\nu$  и  $Ts$ .

$$\text{Отв. } N_1 = N_2 = 35,3 \text{ кВт; } Q_1 =$$

$$= Q_2 = -24\,780 \text{ кДж/ч; } Q_{п. х} =$$

$$= 104,3 \text{ МДж/ч.}$$

305. Для двигателя с воспламенением от сжатия необходим трехступенчатый компрессор, подающий  $250 \text{ кг/ч}$  воздуха при давлении  $8 \text{ МПа}$ .

Определить теоретическую мощность компрессора. Сжатие считать адиабатным. В начале сжатия  $p_1 = 0,095$  МПа и  $t_1 = 17^\circ \text{C}$ .

### Решение

Отношение давлений в каждой ступени по формуле (177)

$$x = \sqrt[3]{\frac{8}{0,095}} = 4,38.$$

Таким образом (см. рис. 50)

$$\frac{p_2}{p_1} = 4,38; \quad \frac{p_4}{p_2} = 4,38$$

и, следовательно,

$$p_2 = 4,38 \cdot 0,095 = 0,416 \text{ МПа};$$

$$p_4 = 4,38 \cdot 0,416 = 1,82 \text{ МПа}.$$

Затрата работы на каждую ступень компрессора по формуле (167)

$$\begin{aligned} l_0 &= \frac{m}{m-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \\ &= \frac{m}{m-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1,4}{0,4} 287 \cdot 290 \left( 4,38^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) = 154 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Затрата работы на трехступенчатый компрессор

$$l_0 = n l_0 = 3 \cdot 154 \cdot 10^3 = 462 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность компрессора

$$N = \frac{250 \cdot 462 \cdot 10^3}{3600 \cdot 1000} = 32,1 \text{ кВт.}$$

306. Трехступенчатый компрессор всасывает  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при  $p_1 = 0,08$  МПа и  $t_1 = 27^\circ \text{C}$  и сжимает его адиабатно до  $10$  МПа.

Определить производительность компрессора по сжатому воздуху  $V_{сж}$  и работу, затраченную на сжатие в компрессоре.

$$\text{Отв. } V_{сж} = 0,8 \text{ м}^3/\text{ч}; L_0 = 29\,383 \text{ кДж/ч.}$$

307. Производительность воздушного компрессора при начальных параметрах  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  и конечном давлении  $p_2 = 0,6$  МПа составляет 500 кг/ч. Процесс сжатия воздуха — политропный, показатель политропы  $m = 1,2$ . Отношение хода поршня к диаметру  $\frac{S}{D} = 1,3$ . Число оборотов  $n = 31,4$  рад/с (300 об/мин).

Определить теоретическую мощность двигателя, необходимую для привода компрессора, ход поршня и диаметр цилиндра.

$$\text{Отв. } N = 24,8 \text{ кВт}; D = 0,287 \text{ м}; S = 0,373 \text{ м.}$$

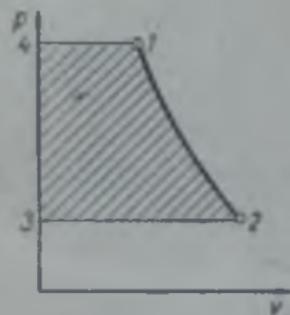


Рис. 62

308. На рис. 62 показан процесс работы двигателя, в котором рабочим телом является сжатый воздух.

Определить необходимый массовый расход воздуха, если теоретическая мощность воздушного двигателя  $N = 10$  кВт. Начальные параметры воздуха;  $p_1 = 1$  МПа и  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . Процесс расширения воздуха принять политропным с показателем  $m = 1,3$ . Конечное давление воздуха  $p_2 = 0,1$  МПа.

### Решение

Работа 1 кг сжатого воздуха в двигателе изображается площадью 1—2—3—4, т. е.

$$l = \frac{m}{m-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

Значения удельных объемов  $v_1$  и  $v_2$  определяют из уравнений

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 288}{1 \cdot 10^6} = 0,0827 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{m}} = 0,0827 \cdot 10^{\frac{1}{1,3}} = 0,0827 \cdot 5,885 = 0,487 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом,

$$l = 4,33 \cdot 10^6 (1 \cdot 0,0827 - 0,1 \cdot 0,487) = \\ = 147\,176 \text{ Дж/кг.}$$

Массовый расход воздуха

$$M = \frac{3600 \cdot 1000 \cdot 10}{147\,176} = 245 \text{ кг/ч.}$$

309. В двигатель поступает воздух при давлении  $p_1 = 1$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . В цилиндре двигателя воздух расширяется до давления  $p_2 = 0,1$  МПа.

Определить работу, совершаемую 1 кг воздуха, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателем  $m = 1,3$ .

$$\text{Отв. а) } l_{\text{из}} = 193,7 \text{ кДж/кг; б) } l_{\text{ад}} = \\ = 141,8 \text{ кДж/кг; в) } l_{\text{пол}} = \\ = 150,0 \text{ кДж/кг.}$$

# Глава IX

## ВОДЯНОЙ ПАР

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На рис. 63 дана диаграмма  $p-v$  для водяного пара. Кривой *I* соответствует вода при  $0^\circ\text{C}$ , кривой *II* — вода при температуре кипения (или температуре насыщения) и кривой *III* — сухой насыщенный пар.

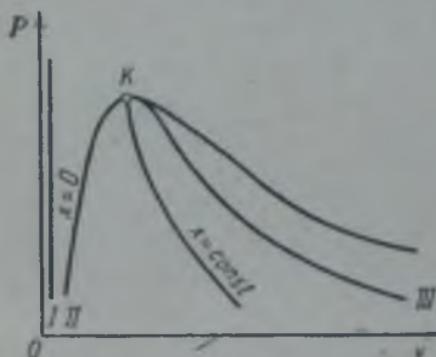


Рис. 63

Кривую *II* называют нижней пограничной кривой, кривую *III* — верхней пограничной кривой, а точку  $K$ , разделяющую обе пограничные кривые, называют критической.

Кривые *I*, *II* и *III* делят всю диаграмму на три части: область между кривыми *I* и *II* — жидкость, область между

кривыми *II*—*III* — смесь кипящей жидкости и пара, т. е. влажный насыщенный пар, и область правее кривой *III* — перегретый пар.

Критическая точка  $K$  характеризует критическое состояние, при котором исчезает различие в свойствах пара и жидкости. Критическая температура является наивысшей температурой жидкости и ее насыщенного пара. При температурах выше критической возможно существование только перегретого пара.

Критические параметры водяного пара следующие:  $t_{\text{кр}} = 374,15^\circ\text{C}$ ;  $p_{\text{кр}} = 22,129\text{ МПа}$ ;  $v_{\text{кр}} = 0,00326\text{ м}^3/\text{кг}$ . В приложении даны сокращенные таблицы водяного пара, составленные М. П. Вукаловичем [2].

### СУХОЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Состояние сухого насыщенного пара определяется его давлением или температурой. По табл. XIII можно найти давление пара (и все остальные его параметры) по темпе-

ратуре, а по табл. XIV — температуру пара (и все остальные его параметры) по давлению. Зависимости  $p = f(t_n)$ ,  $v'' = f(p)$  и  $\rho'' = f(p)$  для водяного пара приведены на рис. 64 и 65.

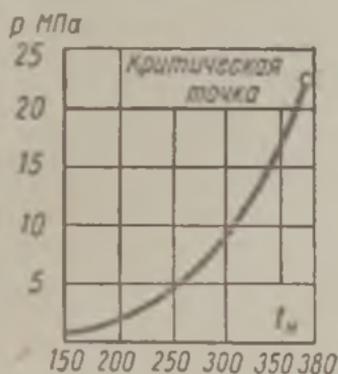


Рис. 64

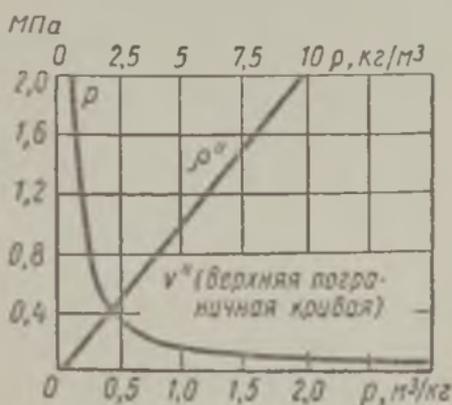


Рис. 65

### ВЛАЖНЫЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

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.

Температура влажного пара есть функция только давления и определяется так же, как и температура сухого пара, по табл. XIV. Удельный объем влажного пара зависит от давления и от степени сухости и определяется из уравнения

$$v_x = v_x'' + (1 - x) v' \quad (178)$$

Из этой формулы получаем значение

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} \quad (179)$$

Для давлений до 3 МПа и  $x \geq 0,8$  можно пренебречь последним членом равенства (178). Тогда удельный объем влажного насыщенного пара

$$v_x = v'' x \quad (180)$$

Для больших давлений и малых следует пользоваться формулой (178).

Плотность влажного пара

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v'' x + (1 - x) v'} \quad (181)$$

или приближенно

$$\rho_x = \frac{1}{v'_x} = \frac{\rho''}{x}. \quad (182)$$

### ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР

Перегретый пар имеет более высокую температуру  $t$  по сравнению с температурой  $t_n$  сухого насыщенного пара того же давления. Следовательно, в отличие от насыщенного пара перегретый пар определенного давления может иметь различные температуры. Для характеристики состояния перегретого пара необходимо знать *два его параметра*, например давление и температуру. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления  $t - t_n$  называют *перегревом пара*.

Весьма важным в теплотехнических расчетах является определение количества теплоты, затрачиваемой на отдельные стадии процесса парообразования и изменения внутренней энергии.

*Количество теплоты, затраченной для подогрева жидкости от  $0^\circ \text{C}$  до температуры кипения при постоянном давлении*, называют *теплотой жидкости*. Ее можно определить как разность энтальпий жидкости в состоянии кипения и жидкости при том же давлении и  $0^\circ \text{C}$ , т. е.

$$q_p = i_2 - i_1 = i' - i_0,$$

а так как  $i_0$  при невысоких давлениях с достаточной для технических расчетов точностью можно считать равным нулю, то

$$q_p = i'.$$

Значения внутренней энергии жидкости можно вычислить из общей зависимости

$$i = u + pv.$$

Тогда

$$u' = i' - pv',$$

а так как величина  $pv'$  мала, то при невысоких давлениях можно принимать

$$u' = i',$$

т. е. *внутренняя энергия жидкости равна энтальпии жидкости*. Значения  $i'$ , а следовательно, и  $u'$  приводятся в таблицах насыщенного пара.

Количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг кипящей жидкости в сухой насыщенный пар при постоянном давлении, называют теплотой парообразования и обозначают буквой  $r$ . Это количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии, связанное с преодолением сил сцепления  $d$  между молекулами жидкости, и на работу расширения ( $\psi$ ).

Величину  $d$  называют внутренней теплотой парообразования, а величину  $\psi$  — внешней теплотой парообразования. Очевидно,

$$\psi = p (v'' - v') \quad (183)$$

и

$$r = d + \psi. \quad (184)$$

Значения  $r$  приводятся в таблицах насыщенного пара. Энтальпия  $i''$  сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$i'' = i' + r, \quad (185)$$

а изменение внутренней энергии при получении сухого насыщенного пара из 1 кг жидкости при  $0^\circ \text{C}$  — из выражения

$$u'' = i'' - pv''. \quad (186)$$

Для влажного насыщенного пара имеем следующие соотношения:

$$i_x = i' + rx \quad (187)$$

и

$$u_x = i_x - pv_x, \quad (188)$$

где  $i_x$  — энтальпия влажного насыщенного пара;

$u_x$  — внутренняя энергия влажного насыщенного пара.

Количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении, называется теплотой перегрева. Очевидно,

$$q_n = \int_{t_n}^t c_p dt, \quad (189)$$

где  $c_p$  — истинная массовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении.

В результате тщательных исследований установлено, что теплоемкости  $c_p$  перегретых паров зависят от темпе-

ратуры и давления, а также найдена аналитическая зависимость

$$c_p = f(p, t). \quad (190)$$

Однако пользоваться этой зависимостью вследствие ее сложности и громоздкости неудобно. Расчеты существенно упрощаются тем, что в таблицах водяного пара приводятся значения энтальпии перегретого пара  $i$  (см. табл. XV). Поэтому теплота перегрева может быть найдена из выражения

$$q_n = i - i''. \quad (191)$$

### ЭНТРОПИЯ ПАРА

Энтропия водяного пара отсчитывается от условного нуля, в качестве которого принимают энтропию воды при  $0,01^\circ \text{C}$  и при давлении насыщения, соответствующем этой температуре, т. е. при давлении  $0,0006108 \text{ МПа}$ .

Энтропия жидкости  $s'$  определяется из выражения

$$s' = c \ln \frac{T_n}{273}, \quad (192)$$

где  $c$  — теплоемкость воды, а  $T_n$  — температура насыщения в К.

Значение теплоемкости для воды с достаточной точностью можно принять равным  $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Следовательно,

$$s' = 4,19 \ln \frac{T_n}{273} \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (193)$$

Если жидкость подогревается не до температуры кипения, а до произвольной температуры  $T$ , то под  $T_n$  в формуле (193) следует понимать эту произвольную температуру.

Энтропия сухого насыщенного пара  $s''$  определяется из уравнения

$$s'' = s' + \frac{r}{T_n}, \quad (194)$$

где  $r$  — теплота парообразования.

Энтропия влажного насыщенного пара

$$s_x = s' + \frac{r}{T_n} x, \quad (195)$$

или на основании формулы (160)

$$s_x = s' + (s'' - s') x, \quad (196)$$

где  $x$  — степень сухости пара.

Энтропия  $s'$  и  $s''$  приведены в таблицах насыщенного пара, а  $\frac{r}{T_H}$  можно получить из этих же таблиц как разность  $s'' - s'$ .

Энтропия перегретого пара может быть найдена из уравнения

$$s = s'' + \int_{T_H}^T c_p \frac{dT}{T}.$$

Значения  $s$  приводятся в таблице перегретого пара (см. табл. XV).

При определении состояния пара заданных параметров необходимо исходить из следующего:

для перегретого и сухого насыщенного пара одинакового давления

$$v > v'' \text{ и } t < t_{\text{н}};$$

при одной и той же температуре перегретого и сухого насыщенного пара

$$v > v'' \text{ и } p < p_{\text{н}}.$$

При помощи таблиц водяного пара и этих соотношений легко найти состояние пара.

### Задачи

**310.** Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию сухого насыщенного пара при давлении  $p = 1$  МПа.

### Решение

По табл. XIV находим;  $t_{\text{н}} = 179,88^\circ \text{C}$ ;  $v'' = 0,1946 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho'' = 5,139 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $i'' = 2778 \text{ кДж/кг}$ ;  $s'' = 6,587 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

**311.** Сухой насыщенный пар имеет давление  $p = 1,4$  МПа. Определить все остальные параметры пара.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } t_{\text{н}} &= 195,04^\circ \text{C}; v'' = \\ &= 0,1408 \text{ м}^3/\text{кг}; \rho = 7,103 \text{ кг/м}^3; \\ i'' &= 2790 \text{ кДж/кг}; u'' = \\ &= 2593 \text{ кДж/кг}; s'' = \\ &= 6,469 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

312. Вода, находящаяся под давлением 1,5 МПа, нагрета до 190° С. Наступило ли кипение?

*Отв.* Нет.

313. При  $p = 0,9$  МПа вода нагрета до 150° С. На сколько градусов нужно еще нагреть воду, чтобы началось кипение?

*Отв.* На 25,4° С.

314. Температура воды, находящейся в закрытом сосуде, равна 190° С. Под каким давлением находится вода?

*Отв.*  $p \geq 1,255$  МПа.

315. Найти давление, удельный объем и плотность воды, если она находится в состоянии кипения и температура ее равна 250° С.

### Р е ш е н и е

По табл. XIII

$$p = 3,9776 \text{ МПа}, \quad v' = 0,0012512 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\rho' = \frac{1}{v'} = \frac{1}{0,0012512} = 799,2 \text{ кг/м}^3.$$

316. На паропроводе насыщенного пара установлен термометр, показывающий  $t = 175^\circ \text{ С}$ .

Каково было бы показание манометра на этом паропроводе?

*Отв.* 0,89 МПа.

317. Манометр парового котла показывает давление 0,2 МПа. Показание барометра 0,103 МПа (776 мм рт. ст.).

Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем и энтальпию.

### Р е ш е н и е

Абсолютное давление пара в паровом котле

$$p = 0,2 + 0,103 = 0,303 \text{ МПа.}$$

По табл. XIV;

при  $p = 0,31$  МПа  $t_{\text{н}} = 134,66^\circ \text{ С}$ ;

при  $p = 0,3$  МПа  $t_{\text{н}} = 133,54^\circ \text{ С}$ .

Интерполируя, получаем для  $p = 0,303$  МПа.

$$t_{\text{н}} = 133,54 + 0,112 \cdot 3 = 133,88^\circ \text{ С.}$$

Аналогично получаем

$$v'' = 0,5928 \text{ м}^3/\text{кг}; i'' = 2725,6 \text{ кДж/кг.}$$

318. Манометр парового котла показывает давление  $p = 0,15$  МПа. Показание барометра равно  $1,01$  МПа ( $764$  мм рт. ст.).

Считая пар сухим насыщенным, найти его температуру и удельный объем.

$$\text{Отв. } t_{\text{н}} = 127,69^\circ \text{ С}; v'' = 0,7133 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

319. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 0,5$  МПа, а температура  $t = 172^\circ \text{ С}$ .

### Решение

Давлению  $0,5$  МПа соответствует температура насыщенного пара  $t_{\text{н}} = 151,8^\circ \text{ С}$ . Так как эта температура ниже заданной в условии, то пар перегрет, причем перегрев составляет

$$t - t_{\text{н}} = 172 - 151,8 = 20,2^\circ \text{ С.}$$

320. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 0,6$  МПа, а удельный объем  $v = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

### Решение

Давлению  $0,6$  МПа соответствует удельный объем сухого насыщенного пара  $v'' = 0,3156 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Так как для заданного состояния  $v'' > v$ , то пар является влажным. Степень сухости его по уравнению (179)

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,3 - 0,0011}{0,3156 - 0,0011} = 0,95,$$

или по приближенной формуле (180)

$$x = \frac{v_x}{v''} = \frac{0,3}{0,3156} = 0,95.$$

Таким образом, расчет по приближенной формуле для данного случая весьма точен.

321. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 2,2$  МПа, а температура  $t = 240^\circ \text{ С}$ .

Отв. Пар перегрет.

322. Найти состояние водяного пара, если давление его  $p = 1,2$  МПа, а удельный объем  $v = 0,18$  м<sup>3</sup>/кг.

Отв. Пар перегрет.

323. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 1,5$  МПа, а температура  $t = 198,28^\circ$  С.

Отв. Пар насыщенный.

324. Найти состояние водяного пара, если давление его  $p = 2,9$  МПа, а удельный объем  $v = 0,079$  м<sup>3</sup>/кг.

Отв. Пар перегрет.

325. Определить состояние водяного пара, если давление его  $p = 0,9$  МПа, а энтропия  $s = 6,52$  кДж/(кг·К).

Отв. Пар влажный насыщенный.

326. Найти удельный объем влажного пара, если  $p = 2$  МПа, а  $x = 0,9$ .

Отв.  $v_x = 0,08962$  м<sup>3</sup>/кг.

327. Определить внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при  $p = 1,5$  МПа.

#### Р е ш е н и е

По формуле (186) для сухого насыщенного пара

$$u'' = i'' - pv''.$$

По табл. XIV

$$i'' = 2792 \text{ кДж/кг}; v'' = 0,1317 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} u'' &= i'' - pv'' = 2792 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 0,1317}{1000} = \\ &= 2594 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

328. Определить энтальпию и внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при  $p = 1,3$  МПа и степени сухости пара  $x = 0,98$ .

#### Р е ш е н и е

По формуле (187) для влажного пара

$$i_x = i' + rx.$$

По таблицам водяного пара находим

$$i' = 814,5 \text{ кДж/кг}; r = 1973 \text{ кДж/кг};$$

$$v'' = 0,1512 \text{ м}^3/\text{кг},$$

отсюда

$$i_x = 814,5 + 1973 \cdot 0,98 = 2748,5 \text{ кДж/кг}.$$

Удельный объем влажного пара определяем из формулы (180):

$$v_x = v''x = 0,1512 \cdot 0,98 = 0,148 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

По формуле (188) для влажного насыщенного пара имеем

$$u_x = i_x - pv_x = 2748,5 - \\ - \frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 0,148}{1000} = 2556,1 \text{ кДж/кг}.$$

329. Найти энтропию влажного насыщенного пара  $p = 2,4$  МПа и  $x = 0,8$ .

#### Р е ш е н и е

По формуле (196)

$$s_x = s' + (s'' - s')x.$$

По табл. XIV имеем

$$s' = 2,534 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); s'' = 6,272 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

отсюда

$$s_x = 2,534 + (6,272 - 2,534) 0,8 = \\ = 5,524 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

330. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию  $6 \text{ м}^3$  насыщенного водяного пара при давлении  $p = 1,2$  МПа и сухости пара  $x = 0,9$ .

#### Р е ш е н и е

Удельный объем влажного пара по формуле (180)

$$v_x = 0,1633 \cdot 0,9 = 0,147 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса пара

$$M = \frac{V}{v} = \frac{6}{0,147} = 40,8 \text{ кг}.$$

Внутренняя энергия пара

$$U_x = M (i_x - p v_x).$$

Энтальпия пара

$$\begin{aligned} I_x &= M i_x = 40,8 (798,3 + 1987 \cdot 0,9) = \\ &= 40,8 \cdot 2586,3 = 105\,521 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} U_x &= 40,8 \left( 2586,3 - \frac{1,2 \cdot 10^6 \cdot 0,147}{1000} \right) = \\ &= 40,8 \cdot 2409,9 = 98\,324 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Энтропия пара

$$\begin{aligned} S_x &= M s_x = M [s' + (s'' - s') x] = \\ &= 40 [2,216 + 0,9 (6,523 - 2,216)] = \\ &= 40,8 \cdot 6,092 = 248,6 \text{ кДж/К.} \end{aligned}$$

331. Водяной пар имеет параметры

$$p = 3 \text{ МПа, } t = 400^\circ \text{ С.}$$

Определить значения остальных параметров.

### Р е ш е н и е

Так как температура пара больше критической, то пар приведенных параметров перегретый. По табл. XV перегретого пара находим

$$v = 0,0993 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad i = 3229 \text{ кДж/кг};$$

$$s = 6,916 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Плотность пара

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,0993} = 10,07 \text{ кг/м}^3.$$

Внутреннюю энергию пара определяем из общей зависимости

$$u = i - p v = 3229 - \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 0,0993}{1000} = 2931,1 \text{ кДж/кг.}$$

332. Водяной пар имеет параметры

$$p = 9 \text{ МПа}, t = 500^\circ \text{ С.}$$

Определить значения остальных параметров.

$$\text{Отв. } \rho = 27,2 \text{ кг/м}^3; u = \\ = 3054,8 \text{ кДж/кг.}$$

333. Найти массу  $10 \text{ м}^3$  пара при давлении  $p = 1,4 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 96\%$ .

$$\text{Отв. } M = 74 \text{ кг.}$$

334. Определить массу  $9 \text{ м}^3$  пара при давлении  $p = 0,8 \text{ МПа}$  и степени влажности  $10\%$ .

$$\text{Отв. } M = 41,63 \text{ кг.}$$

335. Найти количество теплоты, затрачиваемой на получение  $1 \text{ кг}$  пара при  $1,8 \text{ МПа}$  и  $x = 0,9$ , если температура питательной воды  $t_b = 32^\circ \text{ С}$ .

$$\text{Отв. } 2471 \text{ кДж/кг.}$$

336. Определить количество теплоты, затрачиваемой на перегрев  $1 \text{ кг}$  сухого насыщенного пара при  $9 \text{ МПа}$  до  $500^\circ \text{ С}$ .

### Р е ш е н и е

Из табл. XV находим

$$i'' = 2743 \text{ кДж/кг}; i = 3386 \text{ кДж/кг.}$$

Следовательно, теплота перегрева пара

$$q_n = i - i'' = 3386 - 2743 = 643 \text{ кДж/кг.}$$

337. Определить количество теплоты, затрачиваемой на перегрев  $1 \text{ кг}$  влажного пара при давлении  $p = 10 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x = 0,98$  до температуры  $t = 480^\circ \text{ С}$ .

$$\text{Отв. } q_n = 621,6 \text{ кДж/кг.}$$

338. Через пароперегреватель парового котла проходит  $5000 \text{ кг}$  пара в час. Степень сухости пара до пароперегревателя  $x = 0,99$ , а давление  $p = 10 \text{ МПа}$ . Температура пара после пароперегревателя  $t = 550^\circ \text{ С}$ .

Определить количество теплоты, воспринятой пароперегревателем, принимая его к. п. д. равным  $0,984$ .

$$\text{Отв. } Q = 4,0 \text{ ГДж/ч.}$$

339. Паровой котел имеет паропроизводительность 20 кг/с. Рабочее давление пара  $p = 4$  МПа, а температура его  $t = 440^\circ \text{C}$ . Теплота сгорания топлива равна 12 600 кДж/кг; температура питательной воды  $t_{п.в} = 145^\circ \text{C}$ .

Определить к. п. д. котла, если расход топлива составляет 4,89 кг/с.

*Отв.*  $\eta_k = 0,875$ .

340. Паровые котлы высокого давления Таганрогского завода «Красный котельщик» имеют паропроизводительность 640 т/ч при давлении пара  $p = 137$  МПа и температуре  $t = 570^\circ \text{C}$ . Температура питательной воды  $t_в = 230^\circ \text{C}$ . Теплота сгорания топлива составляет 25 120 кДж/кг.

Чему равен часовой расход топлива, если к. п. д. парового котла составляет 87,6%?

*Отв.* 73 364 кг/ч.

341. Паровая машина с приводом для заводских целей, созданная талантливым русским ученым изобретателем И. И. Ползуновым, имела следующие размеры: диаметр цилиндра 0,81 м и ход поршня 2,56 м. Давление пара, поступающего в машину, составляло 0,118 МПа.

Считая пар, поступающий в машину, влажным насыщенным со степенью сухости  $x = 0,97$ , определить массу пара в цилиндре машины.

*Отв.*  $M = 0,935$  кг.

342. Найти диаметр паропровода, по которому протекает пар при давлении  $p = 1,2$  МПа и температуре  $t = 260^\circ \text{C}$ . Расход пара  $M = 350$  кг/ч, скорость пара  $w = 50$  м/с.

*Отв.*  $d = 22,1$  мм.

343. Определить диаметр паропровода, по которому протекает пар при давлении  $p = 1,8$  МПа. Расход пара  $M = 1,11$  кг/с, скорость пара  $w = 20$  м/с. Произвести расчет для трех случаев; 1)  $x_1 = 0,9$ ; 2)  $x_2 = 1$ ; 3)  $t = 340^\circ \text{C}$ .

*Отв.* 1)  $d = 84$  мм; 2)  $d = 88$  мм;  
3)  $d = 104$  мм.

344. Паровая турбина расходует 51 000 кг/ч пара. Отработавший в турбине пар поступает в конденсатор

при давлении  $p_k = 0,0045$  МПа и влажности  $(1 - x) = 11\%$ .

Определить часовой расход охлаждающей воды, если ее начальная температура  $t_1 = 12^\circ \text{C}$ , конечная  $t_2 = 23^\circ \text{C}$ , а температура конденсата соответствует температуре насыщения.

Отв.  $M_{o, в} = 2282$  м<sup>3</sup>/ч.

345. В паровом котле объемом  $V = 12$  м<sup>3</sup> находятся 1800 кг воды и пара при давлении 11 МПа и температуре насыщения.

Определить массы воды и сухого насыщенного пара, находящиеся в котле.

### Р е ш е н и е

Обозначим массы воды и пара соответственно через  $M_v$  и  $M_n$  (в кг). Удельный объем кипящей воды равен  $v'$  м<sup>3</sup>/кг, а удельный объем сухого насыщенного пара —  $v''$  кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, объем, занимаемый водой,

$$M_v v' \text{ м}^3,$$

а объем, занимаемый паром,

$$M_n v'' \text{ м}^3,$$

суммарный объем

$$V = M_v v' + M_n v''.$$

Но так как

$$M_v + M_n = M,$$

то

$$\begin{aligned} V &= (M - M_n) v' + M_n v'' = \\ &= M v' + M_n (v'' - v'). \end{aligned}$$

Из этого выражения

$$M_n = \frac{V - M v'}{v'' - v'}.$$

Из табл. XIV получаем

$$v' = 0,001489 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v'' = 0,01598 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно, масса пара

$$M_n = \frac{12 - 1800 \cdot 0,001489}{0,01598 - 0,001489} = 643,2 \text{ кг},$$

а масса воды

$$M_v = 1800 - 643,2 = 1156,8 \text{ кг}.$$

Задача может быть решена и другим путем. Если в паровом котле при рассматриваемых условиях находилась бы только вода, то ее масса

$$M_n = V_n \rho' = V_n \frac{1}{v'} = 12 \frac{1}{0,001489} = 8059 \text{ кг.}$$

В действительности масса воды меньше на  
 $8059 - 1800 = 6259 \text{ кг,}$

так как плотность воды при давлении 11 МПа больше плотности пара при том же давлении на

$$671,58 - 62,58 = 609 \text{ кг/м}^3$$

$$(\rho' = 671,58 \text{ кг/м}^3; \rho'' = 62,58 \text{ кг/м}^3).$$

Следовательно, объем пара в котле

$$V_n = \frac{6259}{609} = 10,277 \text{ м}^3,$$

а его масса

$$M_n = 62,58 \cdot 10,277 = 643,1 \text{ кг.}$$

Вода занимает объем

$$12 - 10,277 = 1,723 \text{ м}^3,$$

следовательно, ее масса

$$671,58 \cdot 1,723 = 1157,1 \text{ кг.}$$

346. В паровом котле объемом  $V = 15 \text{ м}^3$  находятся 4000 кг воды и пара при давлении 4 МПа и температуре насыщения.

Определить массы воды и сухого насыщенного пара, находящиеся в котле.

$$\text{Отв. } M_n = 206 \text{ кг; } M_w = 3794 \text{ кг.}$$

347. В паровом котле находятся  $25 \text{ м}^3$  воды при давлении 3,5 МПа и температуре насыщения.

Какое количество пара по массе и объему образовалось бы в котле, если бы давление в нем упало до 0,1 МПа?

$$\text{Отв. } M = 5651 \text{ кг; } V = 9607 \text{ м}^3.$$

348. В пароперегреватель парового котла поступает пар в количестве  $D = 20 \text{ т/ч}$  при давлении  $p = 4 \text{ МПа}$  и со степенью сухости  $x = 0,98$ . Количество теплоты, сообщенной пару в пароперегревателе, составляет 11 313 МДж.

Определить температуру пара на выходе из пароперегревателя. Потерями давления в нем пренебречь, считая процесс изобарным.

Отв.  $t_{ге} = 450^\circ \text{C}$ .

349. Для регулирования температуры перегретого пара в некоторых случаях к нему примешивают насыщенный пар.

Определить, какое количество насыщенного пара при давлении 4 МПа надо прибавить к 1 кг перегретого пара при 3,9 МПа и  $470^\circ \text{C}$  для снижения температуры пара до  $450^\circ \text{C}$  при неизменном давлении.

Отв. 0,0877 кг/кг.

## ЭНТРОПИЙНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ВОДЯНОГО ПАРА

### Диаграмма $Ts$

Наряду с таблицами насыщенного и перегретого пара исключительно важное значение в теплотехнических расчетах имеют диаграммы  $Ts$  и  $is$ . На рис. 66 изображена диаграмма  $Ts$  для водяного пара. Кривая  $O_1K$  — нижняя пограничная кривая ( $x = 0$ ), кривая  $KB_1$  — верхняя пограничная кривая ( $x = 1$ ).

Точка  $O_1$  соответствует температуре  $273 \text{ K}$  ( $0^\circ \text{C}$ ), точка  $K$  — критическому состоянию пара.

С достаточной для практики точностью можно считать, что нижняя пограничная кривая совпадает с изобарами жидкости. Поэтому кривая  $O_1K$  одновременно изображает процесс подогрева жидкости при постоянном давлении от  $0^\circ \text{C}$  до температуры кипения. Линии  $AB$  представляют собой одновременно изобары и изотермы и изображают процесс парообразования. Линии  $BC$  представляют собой изобары и изображают процесс перегрева пара. Вся область жидкости в диаграмме  $Ts$  совпадает с кривой  $O_1K$ . Между кривыми  $O_1K$  и  $KB_1$  расположена область влажного насыщенного пара. В диаграмме  $Ts$  наносятся также кривые одинаковой степени сухости пара  $NP$ ,  $LM$  и др.

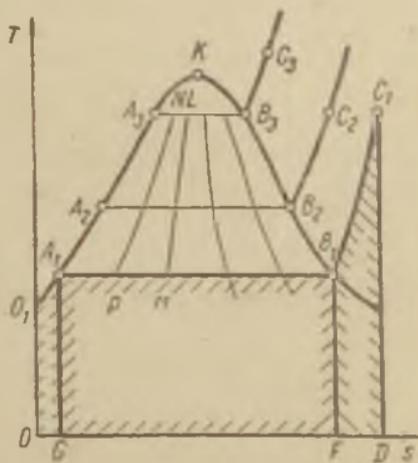


Рис 66

Так как площади диаграммы  $Ts$ , ограниченные кривой процесса, крайними ординатами и осью абсцисс, измеряют в определенном масштабе количества теплоты, подведенной к рабочему телу при постоянном давлении, то площадь  $OO_1A_1G$  соответствует энтальпии жидкости  $i'$ , площадь  $A_1B_1FG$  — теплоте парообразования ( $r$ ) и площадь парообразования  $B_1C_1DF$  — теплоте перегрева. Вся площадь  $OO_1A_1B_1C_1D$  соответствует энтальпии перегретого пара  $i$ .

Для решения ряда задач удобно в диаграмме  $Ts$  иметь также изохоры ( $v = \text{const}$ ) и кривые одинаковых внутренних энергий ( $u = \text{const}$ ).

### Диаграмма $is$

На рис. 67 изображена диаграмма  $is$  для водяного пара. На ней нанесены изохоры (пунктирные кривые), изобары,

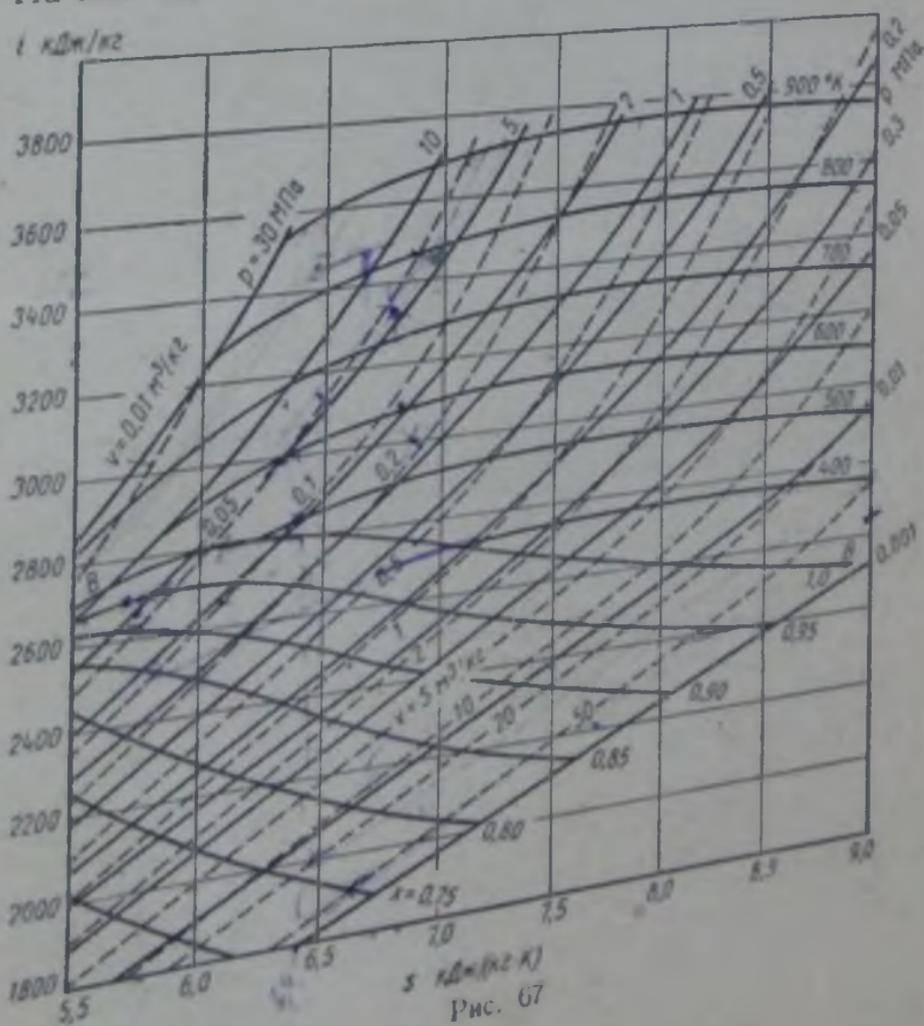


Рис. 67

изотермы и линии равной сухости пара. Линия *ВВ* — верхняя пограничная кривая. Ниже ее расположена область влажного насыщенного пара, выше ее — область перегретого пара. Изобары в области насыщенного пара — прямые линии, являющиеся одновременно изотермами. При переходе в область перегретого пара изобары и изотермы разделяются, и каждая из них представляет собой отдельную кривую.

Обычно часть диаграммы *i<sub>s</sub>* для области влажного пара со степенью сухости пара ниже 0,5 отбрасывается.

Диаграмма *i<sub>s</sub>* 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<sub>s</sub>* водяного пара, составленная по таблицам М. П. Вукаловича.

## ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

При решении задач, связанных с изменением состояния водяного пара, применение графического или аналитического метода в большой мере определяется характером процесса. Однако в редких случаях удается определить все необходимые величины одним из этих способов; поэтому чаще всего приходится одновременно пользоваться как графическим, так и аналитическим способами. При этом часть параметров пара и величин, подлежащих определению, находят из диаграммы, а остальные определяют аналитическим путем с применением таблиц водяного пара.

Во всех случаях весьма важно определить, к какому пару (насыщенному или перегретому) относится начальное или конечное состояние. Этот вопрос легко решается с помощью таблиц и диаграмм.

Для аналитического определения необходимых параметров и величин надо пользоваться следующими соотношениями:

1. **Изохорный процесс** (рис. 68). Если в начальном состоянии пар перегретый, а в конечном — влажный (случай а), то

$$v_1 = v_2 = v_2 x_2 + (1 - x_2) v_2' \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (197)$$

Так как последний член весьма мал и им часто можно пренебречь, то

$$x_2 = \frac{v_1}{v_2'}. \quad (198)$$

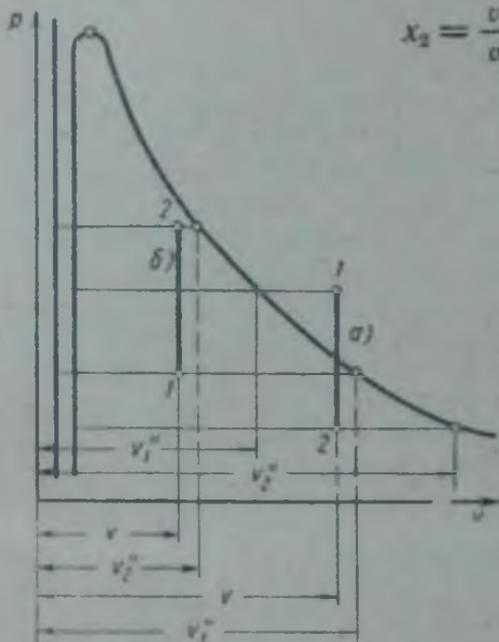


Рис. 68

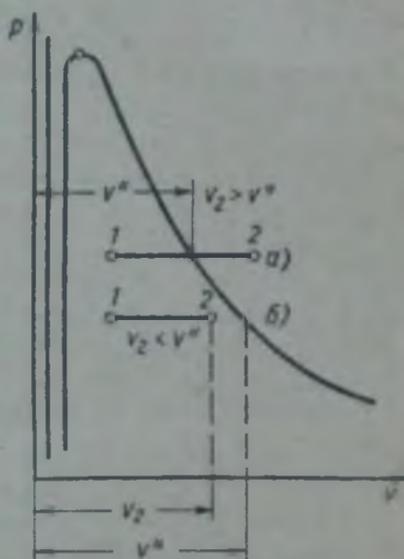


Рис. 69

Если в начальном и конечном состояниях пар влажный насыщенный (случай б), то

$$v_1 x_1 + (1 - x_1) v_1' = v_2 x_2 + (1 - x_2) v_2'. \quad (199)$$

Если в обеих частях уравнения пренебречь вторыми членами, то получим

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{v_1'}{v_2'}. \quad (200)$$

Так как при  $v = \text{const}$  работа пара равна нулю, то вся сообщаемая пару теплота (или отнимаемая у него) расходуется на увеличение (уменьшение) его внутренней энергии и, следовательно,

$$q_0 = u_2 - u_1. \quad (201)$$

2. **Изобарный процесс** (рис. 69). Если пар в начальном состоянии влажный насыщенный, а в конечном состоянии перегретый (случай *a*), то

$$v_1 = v^* x_1 + v' (1 - x_1) \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (202)$$

Если пар в начальном и конечном состояниях влажный (случай *b*), то, пренебрегая слагаемым  $v' (1 - x_1)$ , получаем

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (203)$$

Количество теплоты, участвующей в изобарном процессе, определяется из уравнения

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (204)$$

Работа в этом процессе

$$l = p (v_2 - v_1). \quad (205)$$

3. **Изотермический процесс**. В области влажного пара изотермический процесс одновременно является изобарным, поэтому для него справедливо уравнение (203).

Количество теплоты в изотермическом процессе легко определяется из диаграммы  $Ts$ :

$$q = T (s_2 - s_1). \quad (206)$$

Работа пара в изотермическом процессе находится из уравнения первого закона

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

откуда

$$l = q - \Delta u = T (s_2 - s_1) - (u_2 - u_1). \quad (207)$$

4. **Адиабатный процесс**. С достаточной точностью можно принять для водяного пара зависимость

$$p v^k = \text{const}.$$

Однако величина  $k$  в этом уравнении не является отношением теплоемкостей, а лишь опытно подобранным коэффициентом. Для сухого насыщенного пара

$$k = 1,135. \quad (208)$$

Для влажного пара

$$k = 1,035 + 0,1x, \quad (209)$$

где  $x$  — степень сухости.

Для перегретого пара

$$k = 1,3. \quad (210)$$

Для аналитического вычисления степени сухости пара в конечном состоянии пользуются уравнением

$$s_1 = s_2 = s_2' + \frac{r_2 x_2}{T_{H2}}, \quad (211)$$

отсюда

$$x_2 = \frac{(s_1 - s_2')}{r_2} = \frac{s_1 - s_2'}{s_2 - s_2'}. \quad (212)$$

Работа пара при адиабатном расширении

$$l = u_1 - u_2. \quad (213)$$

Степень сухости пара в конце адиабатного расширения определяется при помощи диаграммы  $i\phi$ . Если в начальном состоянии пар сухой насыщенный, то точка, характер-

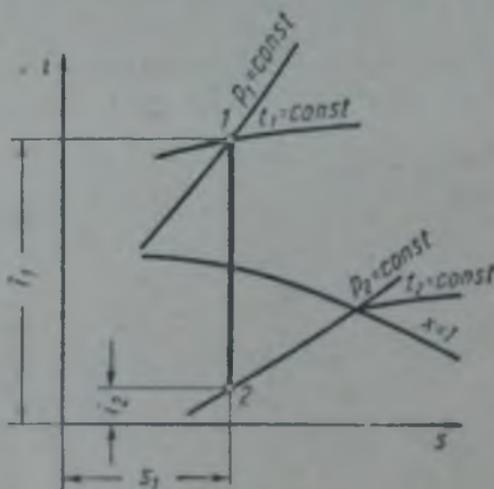


Рис. 70

ризирующая его состояние, легко находится в пересечении соответствующей изобары  $p_1$  и верхней пограничной кривой (рис. 70). Если в начальном состоянии пар влажный, то его состояние изобразится точкой, находящейся в пересечении соответствующей изобары  $p_1$  и кривой заданной сухости пара. Если пар перегретый, то точка 1, характеризующая его состояние, находится в пересечении изобары  $p_1$  и изотермы  $t_1$ . Так как для обратимого процесса

адиабата на диаграмме  $i_s$  изображается прямой, параллельной оси ординат, то конечное состояние пара легко находится графически по точке пересечения адиабаты с заданной конечной изобарой (точка 2). Степень сухости пара определяется по значению кривой равной сухости, проходящей через точку 2. Энтальпия и энтропия пара как в начальном, так и в конечном состоянии находятся очень легко по соответствующим значениям оси ординат и оси абсцисс.

Температура пара в конечном состоянии также определяется весьма просто. Если это состояние изображается точкой, находящейся в области перегретого пара, то температура его отсчитывается по значению изотермы, проходящей через эту точку. Если же в конечном состоянии пар влажный, то нужно от точки, характеризующей его состояние, подняться по соответствующей изобаре до верхней пограничной кривой. Температура этой точки, отсчитываемая по соответствующей изотерме, является температурой насыщенного пара конечного давления.

### Задачи

350. Построить в координатах  $T_s$  в масштабе по нескольким точкам нижнюю и верхнюю пограничные кривые, а также две изобары в области влажного пара;  $p_1 = 1$  МПа и  $p_2 = 5$  МПа.

351. Задано состояние пара:

$$p = 1,6 \text{ МПа}; x = 0,96.$$

Определить остальные параметры, пользуясь диаграммой, и сравнить их со значениями этих же параметров, вычисленных с помощью таблиц водяного пара и соответствующих формул.

### Решение

На диаграмме  $i_s$  находим точку  $A$ , характеризующую данное состояние (рис. 71). Проектируя ее соответственно на ось ординат и ось абсцисс, находим значение  $i_x = 2716$  кДж/кг и  $s_x = 6,26$  кДж/(кг·К). Величина удельного объема пара определяется по значению изохоры, проходящей через точку  $A$ :  $v_x = 0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Для определения температуры пара нужно от точки  $A$  подняться по изобаре  $p = 1,6$  МПа до верхней пограничной кривой

(точка В). Через эту точку проходит изотерма  $t = 202^\circ \text{C}$ ; эта температура и является температурой насыщенного пара при давлении 1,6 МПа.

Сопоставим полученные значения со значениями этих же параметров, вычисленных при помощи таблиц водяного

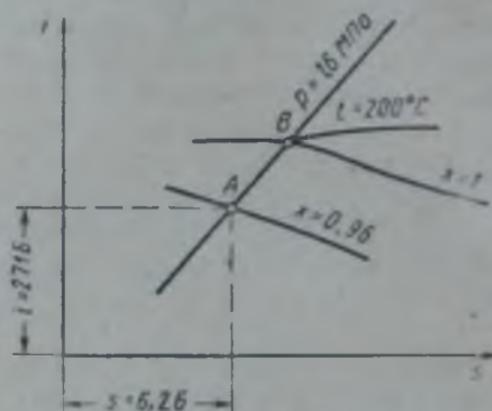


Рис. 71

пара и соответствующих формул. По табл. XIV для пара при давлении 1,6 МПа находим

$$t_{\text{н}} = 201,36^\circ \text{C}; v'' = 0,1238 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$i' = 858,3 \text{ кДж/кг}; r = 1935 \text{ кДж/кг};$$

$$s' = 2,344 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); s'' = 6,422 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Энтальпию пара определяем по формуле (187):

$$\begin{aligned} i_x &= i' + rx = 858,3 + 0,96 \cdot 1935 = \\ &= 2715,9 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Энтропию пара вычисляем по формуле (196):

$$\begin{aligned} s_x &= s' + (s'' - s')x = \\ &= 2,344 + (6,422 - 2,344) \cdot 0,96 = \\ &= 6,2589 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

Значение удельного объема находим по формуле (180):

$$v_x = v''x = 0,1238 \cdot 0,96 = 0,1188 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Как видно, совпадение значений параметров вполне удовлетворительное.

352. Пользуясь диаграммой  $is$  водяного пара, определить энтальпию пара: а) сухого насыщенного при давле-

нии  $p = 1$  МПа; б) влажного насыщенного при  $p = 1$  МПа и  $x = 0,95$ ; в) перегретого при  $p = 1$  МПа и  $t = 300^\circ \text{C}$ .

$$\text{Отв. а) } i'' = 2778 \text{ кДж/кг; б) } i_x = 2677 \text{ кДж/кг; в) } i = 3048 \text{ кДж/кг.}$$

353. Пользуясь диаграммой  $i_s$ , определить энтальпию пара: а) сухого насыщенного при  $p = 2,2$  МПа, б) влажного насыщенного при  $p = 0,8$  МПа и  $x = 0,96$ ; в) перегретого при  $p = 2,9$  МПа и  $t = 400^\circ \text{C}$ .

$$\text{Отв. а) } i'' = 2802 \text{ кДж/кг; б) } i_x = 2688 \text{ кДж/кг; в) } i = 3232 \text{ кДж/кг.}$$

354. Задано состояние пара:

$$p = 2 \text{ МПа; } t = 340^\circ \text{C.}$$

Определить, пользуясь диаграммой  $i_s$ , значения  $s$ ,  $t_{II}$  и перегрев пара.

$$\text{Отв. } i = 3110 \text{ кДж/кг; } s = 6,91 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K); } t_{II} = 212^\circ \text{C; } \Delta t_{\text{пе}} = 128^\circ \text{C.}$$

355. На диаграмме  $i_s$  выбрать точку в области насыщенного пара и определить следующие параметры, характеризующие этой точкой:  $p$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $i$ ,  $s$ .

356. Определить, пользуясь диаграммой  $i_s$ , значения параметров  $i_x$ ,  $s_x$  и  $v_x$  для водяного пара при  $p = 0,8$  МПа и  $x = 0,96$ . Сравнить полученные данные со значениями этих величин, полученными при помощи формул и таблиц.

$$\text{Отв. } i_x = 2687 \text{ кДж/кг; } s_x = 4,4323 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K); } v_x = 0,2307 \text{ м}^3\text{/кг.}$$

357. В закрытом сосуде содержится  $1 \text{ м}^3$  сухого насыщенного водяного пара при давлении  $1$  МПа.

Определить давление, степень сухости пара и количество отданной им теплоты, если он охладился до  $60^\circ \text{C}$ .

### Р е ш е н и е

Пользуясь табл. XIII, получаем при  $t_2 = 60^\circ \text{C}$  давление пара  $p = 0,019917$  МПа.

Так как процесс происходит при постоянном объеме, то

$$v_1 = v_2 = v_1^* = 0,1946 \text{ м}^3\text{/кг.}$$

По уравнению (198)

$$x_2 = \frac{v_1}{v_2}.$$

Пользуясь табл. XIII, находим

$$v_2 = 7,678 \text{ м}^3/\text{кг},$$

и таким образом

$$x_2 = \frac{0,1946}{7,678} = 0,0253.$$

Количество теплоты в изохорном процессе по формуле (201)

$$q_v = u_2 - u_1.$$

Определяем значения внутренней энергии пара в начале и в конце процесса:

$$\begin{aligned} u_1 = i_1 - p_1 v_1 &= 2778 - \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,1946}{1000} = \\ &= 2583,4 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Значение  $i_2$  находим по формуле (187):

$$i_2 = i_1 + r x_2 = 251,1 + 2358,8 \cdot 0,0258 = 310,8 \text{ кДж/кг};$$

следовательно,

$$\begin{aligned} u_2 = i_2 - p_2 v_2 &= 310,8 - \frac{0,019917 \cdot 10^6 \cdot 0,1946}{1000} = \\ &= 306,9 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} q_v = u_2 - u_1 &= 306,9 - 2583,4 = \\ &= -2276,5 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Так как в рассматриваемом процессе участвует  $1 \text{ м}^3$  пара и плотность его по табл. XIV при  $p = 1 \text{ МПа}$   $\rho = 5,139 \text{ кг/м}^3$ , то

$$q_v = \rho q_v = 5,139 (-2276,5) = -11\,699 \text{ кДж/м}^3.$$

358. Определить количество теплоты, которое нужно сообщить  $6 \text{ кг}$  водяного пара, занимающего объем  $0,6 \text{ м}^3$

при давлении 0,6 МПа, чтобы при  $v = \text{const}$  повысить его давление до 1 МПа; найти также конечную сухость пара.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,505; \quad Q_0 = 2570 \text{ кДж.}$$

359. 1 м<sup>3</sup> пара при давлении  $p = 0,981$  МПа и температуре  $t = 300^\circ \text{C}$  охлаждается при постоянном объеме до  $100^\circ \text{C}$ .

Определить количество теплоты, отданной паром.

$$\text{Отв. } Q = -7783 \text{ кДж.}$$

360. В баллоне емкостью 1 м<sup>3</sup> находится пар при  $p = 0,981$  МПа и  $x = 0,78$ .

Сколько теплоты нужно сообщить баллону, чтобы пар сделался сухим насыщенным?

$$\text{Отв. } Q = 348,8 \text{ кДж.}$$

361. В паровом котле находится 8250 кг пароводяной смеси с паросодержанием  $x = 0,0015$  при давлении 0,4 МПа.

Сколько времени необходимо для поднятия давления до 1 МПа при закрытых вентилях, если пароводяной смеси сообщается 18 МДж/мин?

### Р е ш е н и е

Удельный объем пароводяной смеси, согласно уравнению (178),

$$\begin{aligned} v_x &= v_1 x_1 + (1 - x_1) v_1^* = \\ &= 0,4624 \cdot 0,0015 + 0,9985 \cdot 0,0010836 = \\ &= 0,00069 + 0,00108 = 0,00177 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Конечное содержание пара определяется из уравнения (179):

$$x_2 = \frac{v_x - v_2}{v_2^* - v_2} = \frac{0,00177 - 0,0011273}{0,1946 - 0,0011273} = 0,00332.$$

Так как изменение состояния пароводяной смеси происходит при постоянном объеме, то количество теплоты, необходимой для поднятия давления до 1 МПа, по уравнению (201) составит

$$\begin{aligned} Q_0 &= M (u_2 - u_1) = \\ &= M [(i_2 - p_2 v) - (i' - p_1 v)] \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Определяем энтальпию пара в начальном и конечном состояниях на основании формулы (187):

$$i_1 = i'_1 + r_1 x_1 = 604,7 + 2133 \cdot 0,0015 = 607,9 \text{ кДж/кг};$$

$$i_2 = i'_2 + r_2 x_2 = 762,7 + 2015 \cdot 0,00332 = 769,4 \text{ кДж/кг}.$$

Следовательно,

$$Q_v = 8250 \left( 769,4 - \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,00177}{1000} \right) - \left( 607,9 - \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 0,00177}{1000} \right) = 8250 (768,2 - 607,2) = 1\,328\,250 \text{ кДж}.$$

Время, необходимое для поднятия давления до 1 МПа при закрытых вентилях, составляет

$$\tau = \frac{1\,328\,250}{18\,000} = 73,8 \text{ мин}.$$

**362.** Влажный пар имеет при давлении  $p = 1,5$  МПа паросодержание  $x = 0,80$ .

Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг данного пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до  $x_2 = 0,95$ .

### Р е ш е н и е

Количество теплоты в изобарном процессе по уравнению (204)

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Для рассматриваемого случая

$$q_p = i' + r x_2 - (i' + r x_1) = r (x_2 - x_1);$$

$$q_p = 1947 (0,95 - 0,8) = 292 \text{ кДж/кг}.$$

**363.** Влажный пар имеет при давлении  $p_1 = 0,8$  МПа степень сухости  $x = 0,9$ .

Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар?

$$\text{Отв. } q = 204,8 \text{ кДж/кг}.$$

364. 1 кг водяного пара при  $p = 1$  МПа и  $t_1 = 240^\circ \text{C}$  нагревается при постоянном давлении до  $320^\circ \text{C}$ .

Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

### Р е ш е н и е

Количество теплоты в изобарном процессе по уравнению (204)

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Так как при  $p = 1$  МПа температура насыщения  $t_n = 179,88^\circ \text{C}$ , то пар заданных параметров перегретый. Пользуясь таблицами перегретого пара, получаем

$$q_p = i_2 - i_1 = 3091 - 2918 = 173 \text{ кДж/кг.}$$

Работа расширения по формуле (205)

$$l = p (v_2 - v_1),$$

или, пользуясь табл. XV,

$$l = 1 \cdot 10^6 (0,2677 - 0,2274) = 40\,300 \text{ Дж/кг} = \\ = 40,3 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии проще всего определится из уравнения первого закона термодинамики:

$$u_2 - u_1 = q - l = 173,0 - 40,3 = 132,7 \text{ кДж/кг.}$$

365. 1 кг водяного пара при  $p_1 = 1,6$  МПа и  $t_1 = 300^\circ \text{C}$  нагревается при постоянном давлении до  $400^\circ \text{C}$ .

Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

$$\text{Отв. } q_p = 223 \text{ кДж/кг; } l = \\ = 50,24 \text{ кДж/кг; } \Delta u = 172,8 \text{ кДж/кг.}$$

366. Энтальпия влажного насыщенного пара при давлении  $p_1 = 1,4$  МПа составляет  $i_x = 2705$  кДж/кг.

Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 40 кДж теплоты при постоянном давлении?

## Р е ш е н и е

Определяем начальную степень сухости пара из равенства (187):

$$i_x = i_1 + r x_1.$$

Из таблиц водяного пара при  $p = 1,4$  МПа:

$$i' = 830 \text{ кДж/кг}; \quad r = 1960 \text{ кДж/кг},$$

следовательно,

$$x_1 = \frac{2705 - 830}{1960} = 0,957.$$

Конечную степень сухости пара определяем из равенства (204):

$$q_p = i_2 - i_1 = i' + r x_2 - (i' + r x_1) = r (x_2 - x_1),$$

из которого получаем

$$x_2 = \frac{q_p}{r} + x_1 = \frac{40}{1960} + 0,96 = 0,98.$$

**367.** К 1 кг пара при давлении 0,8 МПа и степени влажности 70% подводится при постоянном давлении 820 кДж теплоты.

Определить степень сухости, объем и энтальпию пара в конечном состоянии.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,7; \quad v_2 = 0,1682 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ i_2 = 2154,4 \text{ кДж/кг}.$$

**368.** 1 кг влажного пара при давлении 1,8 МПа и влажности 3% перегревается при постоянном давлении до  $t = 400^\circ \text{C}$ .

Определить работу расширения, количество сообщенной теплоты и изменение внутренней энергии.

$$\text{Отв. } l = 110,2 \text{ кДж/кг}; \quad q = \\ = 500 \text{ кДж/кг}; \quad \Delta u = 390 \text{ кДж/кг}.$$

**369.** Из парового котла поступает в пароперегреватель 2700 кг/ч пара при  $p = 1,6$  МПа и  $x = 0,98$ . Температура пара после пароперегревателя равна  $400^\circ \text{C}$ .

Найти количество теплоты, которое пар получает в пароперегревателе, и отношение диаметров паропроводов до и после пароперегревателя, считая скорости пара в них одинаковыми.

## Р е ш е н и е

Количество теплоты, которое нужно затратить для превращения 1 кг пара заданных начальных параметров в перегретый пар,

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Пользуясь табл. XV и XIV, находим

$$\begin{aligned} q_p &= 3253 - (858,3 + 1935 \cdot 0,98) = \\ &= 3253 - 2754,6 = 498,4 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Общее количество теплоты

$$Q = 498,4 \cdot 2700 = 1\,345\,680 \text{ кДж/кг.}$$

Определяем значения удельного объема пара до и после пароперегревателя:

$$v_1 = v''x = 0,1238 \cdot 0,98 = 0,121 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Пользуясь табл. XV, получаем

$$v_2 = 0,1899 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Обозначая сечения трубопровода до и после пароперегревателя соответственно через  $F_1$  и  $F_2$  и скорость протекания пара в них через  $\omega$ , получаем

$$\frac{F_1 \omega}{v_1} = \frac{F_2 \omega}{v_2}$$

или

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{v_1}{v_2},$$

а также

$$\begin{aligned} \frac{d_1}{d_2} &= \sqrt{\frac{v_1}{v_2}} = \sqrt{\frac{0,1210}{0,1937}} = \\ &= 0,798. \end{aligned}$$

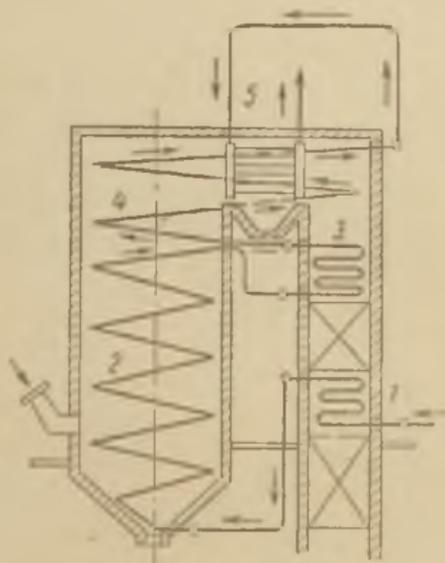


Рис. 72

370. На рис. 72 дана схема прямооточного котла высокого давления системы проф. Рамзина. Производительность котла 230 т/ч пара при давлении 9,8 МПа и температуре 500° С. Питательная вода поступает в змеевик / с температурой 185° С, подогревается в нем до 233° С

и направляется в змеевик 2, расположенный в толке. В этом змеевике вода подогревается до температуры насыщения и испаряется значительная ее часть, а конечная степень сухости пара доводится до 69%.

Далее пароводяная смесь поступает в змеевик 3, в котором пар досушивается и перегревается до  $340^{\circ}\text{C}$ . Затем пар поступает в змеевик 4 и в пароперегреватель 5.

Определить количество теплоты, которое получает 1 кг рабочего тела в змеевиках 2 и 3.

Отв. 1) 1313, 8 кДж; 2) 562 кДж.

371.  $1\text{ м}^3$  водяного пара при давлении  $p_1 = 1\text{ МПа}$  и  $x = 0,65$  расширяется при  $p = \text{const}$  до тех пор, пока его удельный объем не станет равным  $v_2 = 0,19\text{ м}^3/\text{кг}$ .

Найти конечные параметры, количество теплоты, участвующей в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

Отв.  $x_2 = 0,96$ ;  $Q = 5196\text{ кДж}$ ;  $L = 581,4\text{ кДж}$ ;  $\Delta U = 4614,6\text{ кДж}$ .

372. От 1 кг водяного пара с начальными параметрами  $p_1 = 1,6\text{ МПа}$  и  $v_1 = 0,15\text{ м}^3/\text{кг}$  отводится теплота при  $p = \text{const}$ . При этом в одном случае конечный объем  $v_2 = 0,13\text{ м}^3/\text{кг}$ , а в другом —  $v_2 = 0,10\text{ м}^3/\text{кг}$ .

Определить конечные параметры, количество теплоты, участвующей в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

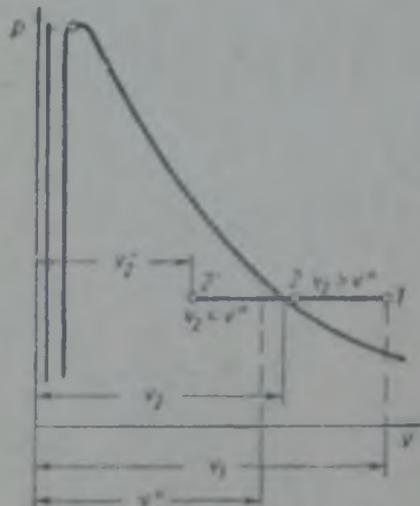


Рис. 73

### Решение

Первый случай (рис. 73, процесс 1—2).

Определяем состояние пара. По табл. XIV для  $p = 1,6\text{ МПа}$  находим  $v'' = 0,1238\text{ м}^3/\text{кг}$ .

Так как  $v_1 > v''$ , то пар в начальном состоянии перегретый.

Для конечного состояния имеем  $v_2 = 0,13\text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v'' = 0,1238\text{ м}^3/\text{кг}$ , следовательно, пар остается перегретым.

Определяем начальную и конечную температуру пара. По табл. XIV, интерполируя между  $v = 0,1486 \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $v = 0,1519 \text{ м}^3/\text{кг}$ , находим  $t_1 = 274^\circ \text{С}$ . Конечная температура для  $v_2 = 0,13 \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $p = 1,6 \text{ МПа}$   $t_2 = 218^\circ \text{С}$ .

Количество теплоты в процессе

$$q_p = i_2 - i_1.$$

По табл. XV

$$i_2 = 2838,4 \text{ кДж/кг}; i_1 = 2976,8 \text{ кДж/кг},$$

следовательно,

$$q_p = 2838,4 - 2976,8 = -138,4 \text{ кДж/кг}.$$

Работу пара в процессе находим по формуле (205):

$$l = p (v_2 - v_1) = 1,6 \cdot 10^6 (0,13 - 0,15) = \\ = -32 000 \text{ Дж/кг} = -32 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии находим из уравнения первого закона термодинамики:

$$\Delta u = q - l = -138,4 - (-32) = -106,4 \text{ кДж/кг}.$$

В т о р о й с л у ч а й (рис. 73, процесс 1—2'). Так как

$$v_2 = 0,10 \text{ м}^3/\text{кг} < v'' = 0,1261 \text{ м}^3/\text{кг},$$

то пар в конечном состоянии влажный насыщенный.

Определяем степень сухости пара

$$v_2 = v_2' x_2,$$

откуда

$$x_2 = \frac{v_2}{v_2'} = \frac{0,10}{0,1238} = 0,81.$$

Температуру пара определяем по таблицам насыщенного пара для давления  $p = 1,6 \text{ МПа}$ :

$$t_2 = 201,4^\circ \text{С}.$$

Количество теплоты в процессе

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Пользуясь табл. XIV и формулой (187), получаем

$$i_2 = i' + rx = 858,3 + 1935 \cdot 0,81 = 2425,7 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом,

$$q_p = 2425,7 - 2976,8 = -551,1 \text{ кДж/кг.}$$

Работа пара в процессе

$$l = 16 \cdot 10^6 (0,10 - 0,15) = -80 \text{ 000 Дж/кг} = \\ = -80 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = q - l = -555,1 - (-80) = -471,1 \text{ кДж/кг.}$$

373. Отработавший пар из паровой машины направляется в конденсатор. Состояние отработавшего пара:  $p = 0,01$  МПа и  $x = 0,83$ .

Какое количество воды для охлаждения необходимо подавать в конденсатор, если температура ее повышается на  $\Delta t = 15^\circ \text{C}$ , а конденсат забирается из конденсатора при температуре  $t = 35^\circ \text{C}$ ?

Отв. 32,4 кг/кг.

374. 2 кг пара, занимающие при  $p = 0,8$  МПа объем  $V_1 = 0,15 \text{ м}^3$ , изотермически расширяются до  $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$ .

Определить работу расширения, количество подведенной теплоты 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  $p_1 = 0,8$  МПа удельный объем  $v'' = 0,2403 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Так как  $v_1$  и  $v_2$  меньше  $v''$ , то пар в начальном и конечном состояниях влажный. Степень сухости определяется из уравнения (179):

$$x_1 = \frac{v_1 - v'}{v'' - v'} = \frac{0,075 - 0,001}{0,2403 - 0,001} = 0,309;$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = \frac{0,175 - 0,001}{0,2403 - 0,001} = 0,727.$$

Работа расширения и количество подведенной теплоты могут быть определены по формулам изобарного процесса, так как рассматриваемый изотермический процесс, протекающий в области влажного пара, одновременно является процессом изобарным. Следовательно, работа расширения определяется по уравнению (205):

$$L = Mr (V_2 - V_1) = 2 \cdot 0,8 \cdot 10^6 (0,35 - 0,15) = \\ = 320\,000 \text{ Дж} = 320 \text{ кДж},$$

а подведенная теплота — по уравнению (204):

$$Q = M (i_2 - i_1) = M [(i' + rx_2) - (i' + rx_1)] = \\ = Mr (x_2 - x_1) = 2 \cdot 2048 (0,727 - 0,309) = \\ = 1712 \text{ кДж}.$$

Количество подведенной теплоты может быть также определено по формуле изотермического процесса (206):

$$Q = MT (s_2 - s_1),$$

где  $T$  — температура насыщения при данном давлении в К;

$s_1$  и  $s_2$  — энтропия влажного насыщенного пара в начальном и конечном состояниях, определяемая по уравнению (196).

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,

$$Q = MT (s'' - s') (x_2 - x_1) = \\ = 2 \cdot 443,42 (6,663 - 2,046) (0,727 - 0,309) = \\ = 1711,5 \text{ кДж}.$$

375. 1 кг пара при давлении  $p_1 = 0,6$  МПа и температуре  $t_1 = 200^\circ \text{C}$  сжимают изотермически до конечного объема  $v_2 = 0,11 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Определить конечные параметры и количество теплоты, участвующей в процессе.

## Р е ш е н и е

Начальной температуре  $t_1 = 200^\circ \text{C}$  соответствует давление насыщения  $p = 1,5551 \text{ МПа} > p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ , поэтому пар в начальном состоянии перегретый. Кроме того, при температуре  $200^\circ \text{C}$

$$v'' = 0,1272 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

По условию

$$v_2 = 0,11 \text{ м}^3/\text{кг} < v'' = 0,1272 \text{ м}^3/\text{кг},$$

т. е. пар в конечном состоянии влажный насыщенный, а так как его температура равна начальной, то соответствующее ей давление

$$p_2 = 1,5551 \text{ МПа}.$$

Степень сухости пара найдем из уравнения (180):

$$v_x = v''x,$$

откуда

$$x = \frac{v_x}{v''} = \frac{0,11}{0,1272} = 0,86.$$

Количество теплоты определим по формуле (206):

$$q = T (s_2 - s_1).$$

Значения энтропии  $s_1$  и  $s_2$  находим по таблицам или по диаграмме  $is$ :

$$s_1 = 6,963 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad s_2 = 5,8576 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

откуда

$$q = 473 (5,8576 - 6,963) = -522,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

376. 6 кг пара при давлении  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и степени сухости  $x_1 = 0,505$  расширяются изотермически так, что в конце расширения пар оказывается сухим насыщенным.

Определить количество теплоты, сообщенной пару, произведенную им работу и изменение внутренней энергии.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } Q &= 5984,6 \text{ кДж}; \quad L = \\ &= 577,8 \text{ кДж}; \quad \Delta U = 5406,8 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

377. 1 кг пара при  $p_1 = 1,8 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,7$  изотермически расширяется до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$  (рис. 74).

Определить конечные параметры, количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу расширения.

Отв.  $v_2 = 0,2655 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $q = 798,9 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta u = 558,9 \text{ кДж/кг}$ ;  $l = 240 \text{ кДж/кг}$ .

378. Сухой насыщенный водяной пар расширяется адиабатно от давления 1 МПа до 0,05 МПа.

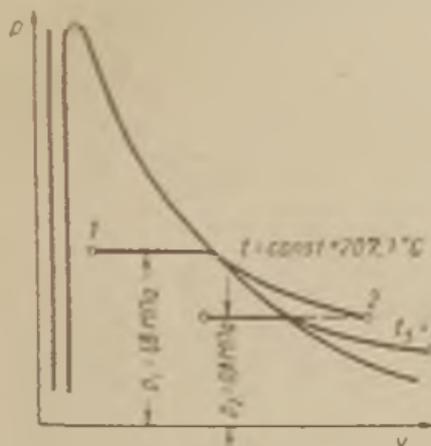


Рис. 74

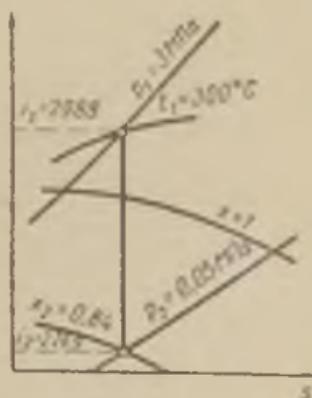


Рис. 75

Определить степень сухости в конце расширения. Задачу решить при помощи диаграммы  $is$  и аналитическим путем.

### Решение

1. На диаграмме  $is$  (см. приложения) находим точку пересечения изобары  $p = 1 \text{ МПа}$  с верхней пограничной кривой. Из этой точки проводим адиабату (опускаем вертикаль) до пересечения с изобарой  $p = 0,05 \text{ МПа}$ . Полученная точка определяет степень сухости в конце адиабатного расширения:  $x = 0,845$ .

2. Так как в адиабатном процессе  $s_1 = s_2$ , то

$$s_1 = s_2 + \frac{r_2 x_2}{T_{н2}},$$

откуда

$$x_2 = \frac{s_1 - s_2'}{r_2/T_{н2}} = \frac{s_1 - s_2'}{s_2' - s_2'} = \frac{6,587 - 1,091}{7,593 - 1,091} = \frac{5,496}{6,502} = 0,845.$$

379. 1 кг пара расширяется адиабатно от начальных параметров  $p_1 = 3$  МПа и  $t_1 = 300^\circ \text{C}$  до  $p_2 = 0,05$  МПа. Найти значения  $i_1, i_2, u_1, v_2, x_2$  и работу расширения.

### Решение

По диаграмме  $is$  и из таблиц водяного пара находим для начального состояния (рис. 75):

$$i_1 = 2988 \text{ кДж/кг} \quad v_1 = 0,08119 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пользуясь зависимостью  $i = u + pv$ , получаем

$$u_1 = i_1 - p_1 v_1 = 2988 - \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 0,082}{1000} = \\ = 2744 \text{ кДж/кг}.$$

Проведя на диаграмме  $is$  адиабату до пересечения с изобарой  $p_2 = 0,05$  МПа, находим

$$i_2 = 2269 \text{ кДж/кг}, \quad x_2 = 0,837.$$

Далее вычисляем:

$$v_2 = v'' x_2 = 3,299 \cdot 0,837 = 2,76 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = 2269 - \frac{0,05 \cdot 10^6 \cdot 2,76}{1000} = 2131 \text{ кДж/кг},$$

отсюда работа пара в процессе

$$l = u_1 - u_2 = 2744 - 2131 = 613 \text{ кДж/кг}.$$

380. 1,2 м<sup>3</sup> влажного пара со степенью сухости  $x = 0,8$  расширяется адиабатно от 0,4 до 0,06 МПа.

Определить степень сухости, объем пара в конце расширения и произведенную им работу.

$$\text{Отв. } x = 74\%; \quad V_2 = 6,56 \text{ м}^3; \quad L = \\ = 743 \text{ кДж}.$$

381. Найти по диаграмме  $is$  адиабатный перепад теплоты и конечное состояние при расширении пара от 1,4 МПа и  $300^\circ \text{C}$  до 0,006 МПа.

$$\text{Отв. } h = 900 \text{ кДж/кг}; \quad x = 0,825.$$

382. 1 кг пара расширяется адиабатно от начальных параметров  $p_1 = 9$  МПа и  $t_1 = 500^\circ \text{C}$  до  $p_2 = 0,004$  МПа.

Найти значения  $i_1, v_1, i_2, v_2, x_2$  и работу расширения.

## Р е ш е н и е

По диаграмме  $i_s$  и таблицам водяного пара находим:

$$i_1 = 3386 \text{ кДж/кг}; \quad v_1 = 0,0368 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Значение внутренней энергии ищем по формуле

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 - p_1 v_1 = 3386 - \frac{9 \cdot 10^5 \cdot 0,0368}{1000} = \\ &= 3386 - 331,2 = 3054,8 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Проведя в диаграмме  $i_s$  адиабату до пересечения с изобарой  $p = 0,004$ , получаем

$$i_2 = 2005 \text{ кДж/кг}; \quad x_2 = 0,775.$$

Конечный объем находим с помощью таблиц по формуле

$$v_2 = v_2 x_2 = 34,81 \cdot 0,775 = 27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Внутренняя энергия пара в конечном состоянии

$$\begin{aligned} u_2 &= i_2 - p_2 v_2 = 2005 - \frac{0,004 \cdot 10^6 \cdot 27}{1000} = \\ &= 2005 - 108 = 1897 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Работу в процессе определяем по формуле (213):

$$l = u_1 - u_2 = 3054,8 - 1897 = 1157,8 \text{ кДж/кг}.$$

383. Влажный пар при  $p_1 = 0,8$  МПа и  $x_1 = 0,95$  расширяется адиабатно до  $p_2 = 0,004$  МПа.

Определить степень сухости пара в конце расширения аналитическим и графическим путем.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,814.$$

384. Пар при давлении  $p_1 = 1,8$  МПа и температуре  $t_1 = 350^\circ \text{C}$  расширяется адиабатно до конечного давления  $p_2 = 0,008$  МПа.

Найти степень сухости в конце процесса и давление, при котором пар в процессе расширения окажется сухим насыщенным.

$$\text{Отв. } x = 0,84; \quad p = 0,29 \text{ МПа}.$$

385. Пар с начальным давлением  $p_1 = 2$  МПа и температурой  $t_1 = 300^\circ \text{C}$  расширяется адиабатно до  $p_2 = 0,004$  МПа.

Определить начальные и конечные параметры и работу расширения 1 кг пара.

$$\text{Отв. } t_1 = 3019 \text{ кДж/кг; } v_1 = 0,1255 \text{ м}^3/\text{кг; } t_2 = 2036 \text{ кДж/кг; } x = 0,787; l = 842 \text{ кДж/кг.}$$

386. Пар с начальным давлением  $p_1 = 1,8$  МПа и температурой  $t_1 = 340^\circ \text{C}$  расширяется адиабатно до давления  $p_2 = 0,006$  МПа.

Определить работу расширения и конечное состояние пара.

$$\text{Отв. } l = 815 \text{ кДж/кг; } p_2 = 19,5 \text{ м}^3/\text{кг; } x_2 = 0,825.$$

387. 1 кг пара при давлении  $p_1 = 5$  МПа и температуре  $t_1 = 400^\circ \text{C}$  расширяется по адиабате до давления 0,05 МПа.

Найти, пользуясь диаграммой  $is$ , температуру и степень сухости для конечного состояния пара, а также адиабатный перепад теплоты

$$\text{Отв. } t_2 = 80^\circ \text{C; } x_2 = 0,853; h_0 = 888 \text{ кДж/кг.}$$

388. 5 кг водяного пара, параметры которого  $p_1 = 2$  МПа и  $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ , расширяются адиабатно до давления  $p_2 = 0,2$  МПа.

Определить конечный объем пара, степень сухости его и произведенную им работу.

$$\text{Отв. } V_2 = 3,95 \text{ м}^3; x_2 = 0,852; L = 1780 \text{ кДж.}$$

## ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки) (рис. 76), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход, т. е. количество газа, вытекающего в единицу времени. В этих случаях необходимо прежде всего найти отношение  $p_2/p_1$ , где  $p_2$  — давление среды на выходе из сопла;  $p_1$  — давление среды на входе в сопло.

Полученное числовое значение  $p_2/p_1$  сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым из равенства

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (214)$$

и равным:

для одноатомных газов при  $k = 1,67$

$$(p_2/p_1)_{кр} = 0,487;$$

для двухатомных газов при  $k = 1,4$

$$(p_2/p_1)_{кр} = 0,528;$$

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

$$(p_2/p_1)_{кр} = 0,546.$$

Если адиабатное истечение газа происходит при  $(p_2/p_1) > (p_2/p_1)_{кр}$ , то теоретическая скорость газа у устья

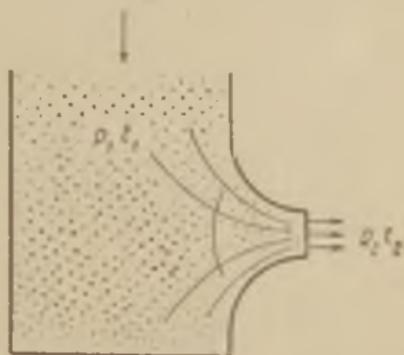


Рис. 76

суживающегося сопла определяется по формуле

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (215)$$

где  $k$  — показатель адиабаты;

$v_1$  — удельный объем газа на входе в сопло.

Заменяя для идеального газа в формуле (215)  $p_1 v_1$  на  $RT$ , получаем

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (216)$$

В формулах (215) и (216) значения  $p$ ,  $v$  и  $R$  даны соответственно в следующих единицах: Па, кг/м<sup>3</sup> и Дж/(кг·К).

Теоретическая скорость газа может быть также найдена по формуле

$$\omega = \sqrt{2(i_1 - i_2)}, \quad (217)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  — соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях в Дж/кг.

Если значения  $i$  выражены в кДж/кг, то формула (217) принимает вид

$$\omega = \sqrt{2(i_1 - i_2) 1000} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2}.$$

Во всех приведенных случаях скорость  $\omega$  получается в м/с.

Расход газа определяется по формуле

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (218)$$

где  $f$  — выходное сечение сопла в м<sup>2</sup>.

Если же адиабатное истечение газа происходит при  $(p_2/p_1) \leq (p_2/p_1)_{кр}$ , то теоретическая скорость газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определится по уравнению

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}. \quad (219)$$

Критическая скорость по формуле (219) зависит только от начального состояния газа и показателя адиабаты  $k$ . Поэтому, подставляя значение  $k$  для различных рабочих

тел, получим более удобные формулы для определения критической скорости. В частности, для двухатомных газов

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}, \quad (220)$$

или

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1}. \quad (221)$$

Критическая скорость может быть также определена по одной из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{кр} &= \sqrt{2(i_1 - i_{кр})}; \\ \omega_{кр} &= 44,76 \sqrt{i_1 - i_{кр}} \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

где  $i$  — энтальпия газа при критическом давлении  $p_{кр}$ ,  
 В первой формуле энтальпия выражена в Дж/кг,  
 во второй — в кДж/кг.

Расход газа в этом случае будет максимальным и может быть вычислен по уравнению

$$M_{max} = i \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k+1}} \frac{p_1}{v_1}}. \quad (223)$$

Подставляя в эту формулу значение  $k$ , получаем:  
 для двухатомных газов

$$M_{max} = 0,686f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}; \quad (224)$$

для трехатомных газов

$$M_{max} = 0,667f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}. \quad (225)$$

Во всех перечисленных формулах следует брать  $p$  в Па,  
 а  $v$  — в м<sup>3</sup>/кг. Расход газа получается в кг/с.



Рис. 77

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяется расширяющееся сопло, или сопло Лаваля (рис. 77). В минимальном сечении сопла Лаваля скорость движения газа равна крити-

ческой скорости или скорости звука, определяемой параметрами  $\rho_{кр}$  и  $v_{кр}$ .

Площадь минимального сечения сопла определяется по формуле

$$f_{\min} = \frac{M_{\max} v_{кр}}{\omega_{кр}}, \quad (226)$$

причем для двухатомных газов она может быть определена также по формуле

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,686 \sqrt{\frac{\rho_1}{v_1}}}, \quad (227)$$

а для трехатомных газов

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,667 \sqrt{\frac{\rho_1}{v_1}}}. \quad (228)$$

Площадь выходного сечения сопла

$$f_2 = f_{\min} \frac{\omega_{кр} v_2}{\omega v_{кр}}, \quad (229)$$

где  $v_2 = v_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\frac{1}{k}}$  — удельный объем газа при давлении среды  $\rho_2$ .

Длину расширяющейся части сопла находят по уравнению

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (230)$$

где  $d$  и  $d_{\min}$  — соответственно диаметры выходного и минимального сечений;

$\alpha$  — угол конусности расширяющейся части сопла.

При истечении водяного пара все общие законы, установленные для истечения газов, остаются в силе. Однако формулы истечения для газов, в которые входит величина  $k$ , для водяного пара будут приближенными, так как значение  $k$  для пара в процессе изменения его состояния непостоянно.

В связи с этим при истечении водяного пара для точных расчетов следует применять следующие формулы:

при  $\frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$  для определения скорости — формулу (217), а для определения расхода пара — формулу

$$M = \frac{f\omega}{v_2}; \quad (231)$$

при  $\frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$  для определения критической скорости следует применять формулы (222), а для определения расхода — любую из следующих формул;

$$\left. \begin{aligned} M_{max} &= \frac{f V 2 (i_1 - i_{кр})}{v_{кр}}; \\ M_{max} &= \frac{44.76 f V \sqrt{i_1 - i_{кр}}}{v_{кр}}. \end{aligned} \right\} (232)$$

В первой формуле  $i_1$  и  $i_{кр}$  выражены в Дж/кг, во второй — в кДж/кг.

Значения  $i_2$  и  $i_{кр}$ , входящие в формулы для расчета процесса истечения водяного пара, легко найти по диаграмме  $i_s$ . Для этого нужно провести адиабату  $1-2$  (рис. 78) до пересечения с линией  $p_2$  или  $p_{кр}$ .

Площади поперечных сечений сопла определяют по формулам:

$$f_{min} = \frac{M_{max} v_{кр}}{\omega_{кр}}; \quad (233)$$

$$f = \frac{M v_2}{\omega}. \quad (234)$$

Длину расширяющейся части сопла находят по формуле (230).

### ИСТЕЧЕНИЕ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Действительная скорость истечения всегда меньше теоретической, так как процесс истечения связан с наличием трения. Если обозначить действительную скорость истечения через  $\omega_d$ , то потеря кинетической энергии струи

$$\frac{\omega^2 - \omega_d^2}{2} = \zeta \frac{\omega^2}{2},$$

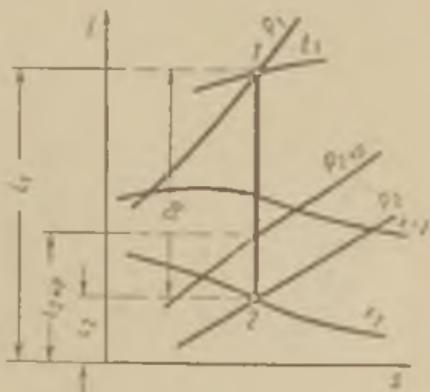


Рис. 78



## ДРОССЕЛИРОВАНИЕ (МЯТИЕ) ГАЗОВ И ПАРОВ

При прохождении газа или пара через суженное сечение происходит снижение его давления. Этот процесс называют *дросселированием*, или *мятием*.

В процессе дресселирования газа или пара наряду со снижением давления всегда возрастает удельный объем. Температура идеальных газов при дресселировании остается неизменной, температура же реальных газов остается постоянной лишь при одной определенной начальной температуре газа, называемой *температурой инверсии*; приближенное значение этой температуры определяется из выражения

$$T_{\text{инв}} \approx 6,75T_{\text{кр}}, \quad (239)$$

где  $T_{\text{кр}}$  — критическая температура газа или пара в К.

Если же температура подвергающегося дресселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа меньше температуры инверсии и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

С достаточной точностью можно принять, что при дресселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова, т. е.

$$i_1 = i_2$$

Дресселирование — процесс необратимый, поэтому он не может быть изображен в термодинамической диаграмме каким-либо графиком.

Задачи, связанные с дресселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дресселирования. Проще всего они решаются при помощи диаграммы  $i_s$ . Так как в начальном и конечном состояниях энтальпия пара одинакова, то конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку 1 (рис. 80), с изобарой конечного давления  $p_2$ . Точка 2 определяет все параметры после дресселирования.

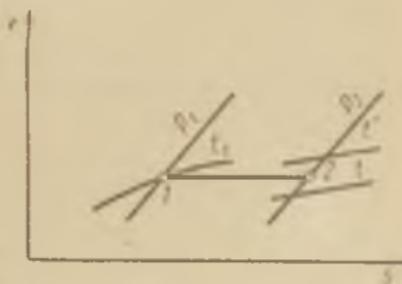


Рис. 80

## Задачи

389. Воздух из резервуара с постоянным давлением  $p_1 = 10$  МПа и температурой  $t_1 = 15^\circ$  С вытекает в атмосферу через трубку с внутренним диаметром 10 мм.

Найти скорость истечения воздуха и его секундный расход. Наружное давление принять равным 0,1 МПа. Процесс расширения воздуха считать адиабатным.

### Решение

Определяем отношение  $p_2/p_1$ . Оно равно 1/100 и, следовательно, меньше критического отношения давлений для воздуха, составляющего 0,528. Поэтому скорость истечения будет равна критической и определится по формуле (221):

$$w_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с.}$$

Секундный расход находим по формуле (224):

$$M_{max} = 0,686f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}};$$

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2;$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 288}{10 \cdot 10^6} = 0,00827 \text{ м}^3/\text{кг};$$

следовательно,

$$M_{max} = 0,686 \cdot 0,0000785 \sqrt{\frac{100 \cdot 10^6}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с.}$$

390. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживают давление  $p_1 = 5$  МПа. Газ вытекает через суживающее сопло в среду с давлением 4 МПа. Начальная температура кислорода  $100^\circ$  С.

Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла  $f = 20$  мм<sup>2</sup>. 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 0,1 МПа.

## Р е ш е н и е

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 (215):

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}.$$

Из характеристического уравнения

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{259,8 \cdot 373}{5 \cdot 10^6} = 0,0194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Все остальные величины, входящие в формулу (215), известны.

Подставляя их значения, получаем

$$\omega = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0194 \left[1 - \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{0,4}{1,4}}\right]} = 205 \text{ м/с}.$$

Секундный расход найдем по формуле (218):

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_1}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]};$$

$$M = 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \frac{5 \cdot 10^6}{0,0194} \left[\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{2,4}{1,4}}\right]} = \\ = 0,175 \text{ кг/с}.$$

При истечении в атмосферу отношение давлений

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{50} < \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр} = 0,528;$$

следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход — максимальным. По формуле (221)

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{\frac{8314}{32} 373} = 336 \text{ м/с}.$$

Максимальный расход определится по формуле (224):

$$M_{\max} = 0,686f \sqrt{\frac{\rho_1}{v_1}},$$

$$M_{\max} = 0,686 \cdot 0,00002 \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{0,0194}} = 0,22 \text{ кг/с.}$$

391. Воздух при постоянном давлении  $p_1 = 6$  МПа и  $t = 27^\circ \text{C}$  вытекает в среду с давлением  $p_2 = 4$  МПа.

Определить теоретическую скорость и конечную температуру при адиабатном истечении.

$$\text{Отв. } w = 257 \text{ м/с; } t_2 = -6^\circ \text{C.}$$

392. Через сопло форсунки компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия подается воздух для распыливания нефти, поступающей в цилиндр двигателя. Давление воздуха  $p_1 = 5$  МПа, а его температура  $t_1 = 27^\circ \text{C}$ . Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя  $p_2 = 3,5$  МПа.

Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха из сопла форсунки.

$$\text{Отв. } w = 241 \text{ м/с.}$$

393. Найти теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если  $p_1 = 7$  МПа,  $p_2 = 4,5$  МПа,  $t_1 = 50^\circ \text{C}$ ,  $f = 10 \text{ мм}^2$ .

$$\text{Отв. } w = 282 \text{ м/с; } M = 0,148 \text{ кг/с.}$$

394. Воздух при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  вытекает из резервуара.

Найти значение  $p_2$ , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, и величину этой скорости.

$$\text{Отв. } p_{\text{кр}} = 0,0528 \text{ МПа; } w_{\text{кр}} = 310 \text{ м/с.}$$

395. Воздух при давлении  $p_1 = 1$  МПа и температуре  $t_1 = 300^\circ \text{C}$  вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением  $p_2 = 0,1$  МПа. Расход воздуха  $M = 4$  кг/с.

Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным  $10^\circ$ . Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

## Р е ш е н и е

Площадь минимального сечения сопла находим по формуле (233):

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{\omega_{кр}} v_{кр}.$$

Удельный объем воздуха в минимальном сечении  $v_{кр}$  находим из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$\frac{v_{кр}}{v_1} = \left( \frac{p_1}{p_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Значение  $v_1$  определяем из начальных условий:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 573}{1 \cdot 10^6} = 0,164 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическое отношение давлений для воздуха

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = 0,528.$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла,

$$p_{кр} = 0,528 p_1 = 0,528 \cdot 1 = 0,528 \text{ МПа};$$

$$v_{кр} = v_1 \left( \frac{p_1}{p_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \left( \frac{1}{0,528} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,259 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретическая скорость воздуха  $\omega_{кр}$  в минимальном сечении по формуле (221)

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 573} = 432 \text{ м/с}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла должна быть

$$f_{\min} = \frac{4 \cdot 0,259}{432} 10^6 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{f_{\min}}{\pi/4}} = \sqrt{\frac{2400}{0,785}} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла по формуле (234)

$$f = \frac{Mv_2}{w}$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла по уравнению (215)

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \\ &= \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} 10^6 \cdot 0,164 \left[ 1 - \left( \frac{1}{10} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 744 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

и, следовательно, площадь выходного сечения сопла

$$f = \frac{4 \cdot 0,87}{744} 10^6 = 4680 \text{ мм}^2,$$

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 (230):

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{77,0 - 55,4}{2 \cdot 0,0875} = 123 \text{ мм}.$$

396. К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении  $p_1 = 1$  МПа и температуре  $t_1 = 600^\circ \text{C}$ . Давление за соплами  $p_2 = 0,12$  МПа. Расход газа, отнесенный к одному соплу,  $M = 1440$  кг/ч.

Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным  $10^\circ$ . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

$$\text{Отв. } d_{\min} = 19,4 \text{ мм}; \quad d = 25 \text{ мм}; \\ l = 32 \text{ мм}.$$

397. Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха через сопло Лавалья, если  $p_1 = 0,8$  МПа и  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ , а давление среды на выходе из сопла  $p_2 = 0,1$  МПа.

Сравнить полученную скорость с критической.

$$\text{Отв. } \omega = 514 \text{ м/с; } \omega_{\text{кр}} = 313 \text{ м/с.}$$

398. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лавалья, если давление пара  $p_1 = 1,4$  МПа, температура  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ , а противодавление равно  $0,006$  МПа? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

### Р е ш е н и е

Из диаграммы  $i_s$

$$h_0 = i_1 - i_2 = 896 \text{ кДж/кг,}$$

а по уравнению (217)

$$\omega = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2} = 44,76 \sqrt{896} = 1340 \text{ м/с.}$$

399. Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление пара в котле  $p_1 = 1,2$  МПа, температура  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ . Процесс расширения пара считать адиабатным. Барометрическое давление принять равным  $100$  кПа ( $750$  мм рт. ст.).

### Р е ш е н и е

Отношение давлений  $p_2/p_1 = 1/12 = 0,0834$ , т. е. оно меньше критического отношения давлений для перегретого пара, составляющего  $0,546$ . Следовательно, если истечение происходит не через расширяющееся сопло, то скорость истечения будет равна критической скорости. Для перегретого пара эта скорость по уравнению (222)

$$c = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{\text{кр}}} \text{ м/с.}$$

Для нахождения  $i_{\text{кр}}$  определяем  $p_{\text{кр}}$ :

$$p_{\text{кр}} = p_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = 12 \cdot 0,546 = 0,66 \text{ МПа.}$$

Проведя адиабату от точки, характеризуемой  $p_1 = 1,2$  МПа и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , до изобары  $p_{2кр} = 0,66$  МПа (рис. 81), получаем

$$i_1 - i_{кр} = 148 \text{ кДж/кг}$$

и, таким образом,

$$c_{кр} = 44,76 \sqrt{148} = 546 \text{ м/с.}$$

400. Решить предыдущую задачу при условии, что истечение пара происходит через сопло Лавалья.

### Решение

В этом случае скорость истечения больше критической. Она определится из уравнения

$$\omega = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2}$$

причем  $i_2$  будет соответствовать состоянию пара в конце адиабатного расширения при  $p = 0,1$  МПа.

Пользуясь диаграммой  $is$ , получаем

$$i_1 - i_2 = 492 \text{ кДж/кг}$$

и, таким образом,

$$c = 44,76 \sqrt{492} = 990 \text{ м/с.}$$

401. Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление в котле  $p = 0,15$  МПа и  $x = 0,95$ . Процесс расширения пара считать адиабатным.

Отв.  $c = 360$  м/с.

402. Влажный пар с параметрами  $p_1 = 1,8$  МПа и  $x_1 = 0,92$  вытекает в среду с давлением  $p_2 = 1,2$  МПа; площадь выходного сечения сопла  $f = 20$  мм<sup>2</sup>.

Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

Отв.  $\omega = 380$  м/с;  $M = 0,05$  кг/с.

403. Найти теоретическую скорость истечения пара из сопла Лавалья для следующих данных:  $p_1 = 1,6$  МПа,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,1$  МПа. Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Отв.  $\omega = 1040$  м/с.

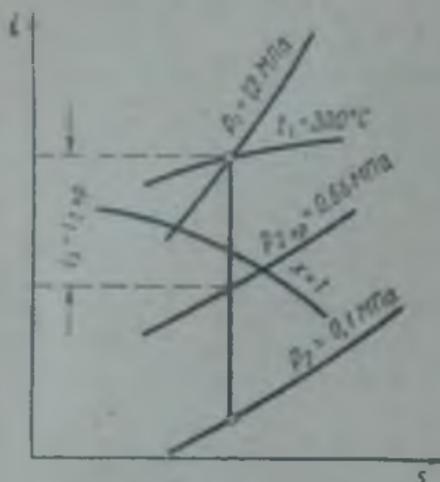


Рис. 81

404. Перегретый водяной пар с начальным давлением  $p_1 = 1,6$  МПа и температурой  $t_1 = 400^\circ$  С расширяется в сопле по адиабате до давления  $p_2 = 0,1$  МПа. Количество вытекающего из сопла пара  $M = 4,5$  кг/с.

Определить минимальное сечение сопла и его выходное сечение. Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

### Решение

Минимальное сечение сопла найдем по уравнению (228):

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,667 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}} \text{ м}^2,$$

Удельный объем  $v_1$  (из таблиц перегретого пара для  $p_1 = 1,6$  МПа,  $t_1 = 400^\circ$  С) равен  $0,1899$  м<sup>3</sup>/кг, следовательно,

$$f_{\min} = \frac{4,5}{0,667 \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^6}{0,1899}}} = 0,00233 \text{ м}^2;$$

$$f_{\min} = 23,3 \text{ см}^2.$$

Сечение в устье сопла  $f$  определяем из уравнения (234):

$$f = \frac{Mv_2}{\omega} = \frac{Mv_2}{44 \sqrt{i_1 - i_2}},$$

где  $v_2$  — удельный объем в выходном сечении.

Пользуясь диаграммой  $i_s$ , получаем

$$i_1 - i_2 = 607 \text{ кДж/кг}; \quad x_2 = 0,988;$$

$$\omega = 44,76 \sqrt{607} = 1100 \text{ м/с}.$$

Значение  $v_2$  находим из выражения

$$v_2 = 0,98 \cdot 1,694 = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом,

$$f = \frac{4,5 \cdot 1,66}{1100} = 0,00685 \text{ м}^2 = 68,5 \text{ см}^2.$$

405. Водяной пар давлением  $p_1 = 2$  МПа с температурой  $t_1 = 400^\circ$  С при истечении из сопла расширяется по адиабате до давления  $p_2 = 0,2$  МПа.

Найти площадь минимального и выходного сечений сопла, а также скорости истечения в этих сечениях, если расход пара  $M = 4$  кг/с. Процесс расширения пара в сопле принять адиабатным.

$$\text{Отв. } f_{\min} = 16 \text{ см}^2; f_{\max} = 36 \text{ см}^2; \\ \omega_{\text{кр}} = 580 \text{ м/с}; \omega = 1050 \text{ м/с.}$$

406. Парогенератор вырабатывает 1800 кг/ч пара давлением 1,1 МПа.

Каким должно быть сечение предохранительного клапана, чтобы при внезапном прекращении отбора пара давление не превысило 11 МПа.

$$\text{Отв. } f_{\min} = 321 \text{ мм}^2.$$

407. Для обдувки поверхностей нагрева паровых котлов пользуются так называемыми обдувочными аппаратами, снабженными соплами, через которые обычно пропускают пар или воздух.

Определить диаметры минимального и выходного сечений сопла для часового расхода 1000 кг сухого насыщенного пара, если начальное давление его  $p_1 = 2,1$  МПа, а конечное  $p_2 = 0,1$  МПа. Процесс расширения пара принять адиабатным. Найти также теоретическую скорость истечения пара из сопла.

$$\text{Отв. } d_{\min} = 11,2 \text{ мм}; d = 22,4 \text{ мм}; \\ \omega = 1000 \text{ м/с.}$$

408. Влажный пар при  $p_1 = 15,7$  МПа и  $x_1 = 0,95$  вытекает из сопла Лавалья в среду с давлением  $p_2 = 1,96$  МПа. Расход пара  $M = 6$  кг/с.

Определить действительную скорость истечения пара, а также сечения сопла Лавалья (минимальное и выходное), если скоростной коэффициент сопла  $\phi = 0,95$ .

### Р е ш е н и е

В диаграмме  $i-s$  теоретический процесс истечения изображается отрезком  $AB$  (см. рис. 79). При этом энтальпия пара в начальном и конечном состояниях соответственно

$$i_1 = 2696 \text{ кДж/кг}; i_2 = 2353 \text{ кДж/кг.}$$

Адиабатный перепад теплоты

$$h_0 = i_1 - i_2 = 2696 - 2353 = 343 \text{ кДж/кг.}$$

Коэффициент потери энергии по формуле (238)

$$\rho = 1 - \varphi^2 = 1 - 0,95^2 = 0,1.$$

Потери кинетической энергии на трение

$$\zeta h_0 = 0,1 \cdot 343 = 34,3 \text{ кДж/кг.}$$

Действительное значение энтальпии пара после истечения

$$i_{2д} = 2353 + 34,3 = 2387,3 \text{ кДж/кг.}$$

Находим на диаграмме  $i_s$  точку, характеризующую действительное состояние пара в конце расширения. Для этого из точки  $B$  откладываем вверх отрезок, соответствующий 34,3 кДж/кг, и через полученную точку проводим горизонталь до пересечения с конечной изобарой  $p_2$ . Получим точку  $D$ , для которой  $x_2 = 0,857$ .

Действительная скорость истечения по формуле (237)

$$\begin{aligned} \omega' &= \varphi \omega = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2} = \\ &= 0,95 \cdot 44,76 \sqrt{343} = 791 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Эта скорость может быть также получена из формулы

$$\begin{aligned} \omega' &= 44,76 \sqrt{i_1 - i_{2д}} = \\ &= 44,76 \sqrt{2696 - 2387,3} = 788 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Площадь выходного сечения определяем из уравнения (234):

$$M v_2 = f \omega.$$

Удельный объем пара в конце расширения

$$v_2 = v'' x_2 = 0,857 \cdot 0,902 = 0,77 \text{ м}^3/\text{кг},$$

откуда

$$f = \frac{M v_2}{\omega} = \frac{6 \cdot 0,77}{788} = 0,00587 \text{ м}^2 = 58,7 \text{ см}^2.$$

Минимальное сечение сопла определяем по уравнению (233):

$$f_{\min} = \frac{Mv_{кр}}{\omega_{кр}}.$$

Для определения  $v_{кр}$  и  $\omega_{кр}$  необходимо знать  $p_{кр}$ , которое находят из критического отношения давлений для пара рассматриваемого состояния. Примем его (ввиду высокой степени сухости пара) равным 0,577 (как для сухого насыщенного пара), тогда

$$p_{кр} = 15,7 \cdot 0,577 = 9,06 \text{ МПа.}$$

Удельный объем  $v_{кр}$  будет равен  $xv''$ , где  $x = 0,91$  (по диаграмме  $is$ ), а  $v''$  для давления  $p_{кр} = 9,06$  МПа равен  $0,2189 \text{ м}^3/\text{кг}$ , следовательно,

$$v_{кр} = 0,91 \cdot 0,2189 = 0,199 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическую скорость определяем по формуле (222):

$$\omega_{кр} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{кр}}.$$

Так как  $i_{кр} = 2596 \text{ кДж/кг}$ , то

$$\omega_{кр} = 44,76 \sqrt{2696 - 2596} = 448 \text{ м/с}.$$

Таким образом,

$$f_{\min} = \frac{Mv_{кр}}{\omega_{кр}} = \frac{6 \cdot 0,199}{448} = 0,00266 \text{ м}^2 = 26,6 \text{ см}^2.$$

**409.** Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от  $p_1 = 0,8$  МПа до  $p_2 = 0,6$  МПа. Начальная температура воздуха  $t_1 = 20^\circ \text{С}$ .

Определить изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

### Р е ш е н и е

Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия воздуха в начальном и конечном состояниях одинакова, т. е.  $i_2 = i_1$ , то конеч-

ную температуру воздуха можно принять равной начальной, т. е.

$$t_2 = t_1 = 20^\circ \text{С.}$$

Приращение энтропии можно найти по формуле (137):

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1},$$

и так как для рассматриваемого процесса  $T_2 = T_1$ , то

$$\begin{aligned} \Delta s &= -R \ln \frac{p_2}{p_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2} = 287 \cdot 2,3 \lg \frac{0,8}{0,6} = \\ &= 82,6 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

410. 1 кг воздуха при температуре  $t_1 = 200^\circ \text{С}$  дросселируется от давления 1,2 МПа до 0,7 МПа.

Определить энтальпию воздуха после дросселирования (принимая, что энтальпия его при  $0^\circ \text{С}$  равна нулю) и изменение энтропии в рассматриваемом процессе.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } i &= 202,5 \text{ кДж/кг; } \Delta s = \\ &= 0,157 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

411. В стальном баллоне находятся 6,25 кг воздуха при давлении  $p_1 = 5 \text{ МПа}$ . При выпуске из баллона воздуха он дросселируется до давления 2,5 МПа.

Найти приращение энтропии в процессе дросселирования.

$$\text{Отв. } \Delta s = 0,199 \text{ кДж/К.}$$

412. Водяной пар при давлении  $p_1 = 1,8 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 250^\circ \text{С}$  дросселируется до  $p_2 = 1 \text{ МПа}$ .

Определить температуру пара в конце дросселирования и изменение перегрева пара.

### Р е ш е н и е

По диаграмме  $ts$  находим начальное состояние пара (см. рис. 80) и проводим через полученную точку линию постоянной энтальпии. В пересечении с изобарой  $p_2 = 1 \text{ МПа}$  находим точку, характеризующую конечное состояние пара. Температура, соответствующая этой точке, равна  $234^\circ \text{С}$ .

Для определения изменения перегрева пара найдем его перегрев в начальном и конечном состояниях. По диа-

грамме  $is$  находим  $t_{н1} = 208^\circ \text{C}$ . Следовательно, перегрев в начальном состоянии

$$\Delta t_{n1} = 250 - 208 = 42^\circ \text{C}.$$

Далее находим по диаграмме  $is$  для конечного состояния  $t_{н2} = 180^\circ \text{C}$ . Следовательно, перегрев в конечном состоянии

$$\Delta t_{n2} = 234 - 180 = 54^\circ \text{C}.$$

Таким образом, перегрев пара при дросселировании увеличился на  $54 - 42 = 12^\circ \text{C}$ .

413. Пар при давлении  $p_1 = 1,2 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,9$  дросселируется до  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ .

Определить конечную сухость пара.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,96.$$

414. До какого давления необходимо дросселировать пар при  $p_1 = 6 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,96$ , чтобы он стал сухим насыщенным?

$$\text{Отв. } p_2 = 0,26 \text{ МПа}.$$

415. Пар при давлении  $p_1 = 2 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,9$  дросселируется до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$ .

Определить состояние пара в конце дросселирования.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,921.$$

416. Пар при давлении  $p_1 = 10 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 320^\circ \text{C}$  дросселируется до  $p_2 = 3 \text{ МПа}$ .

Определить параметры конечного состояния и изменение температуры пара.

$$\text{Отв. } x_2 = 0,99; \Delta t = 85^\circ \text{C}.$$

417. Отработавший пар из паровой турбины поступает в конденсатор в количестве  $125 \text{ т/ч}$ . Состояние отработавшего пара  $p_2 = 0,0045 \text{ МПа}$  и  $x = 0,89$ .

Определить диаметр входного патрубка конденсатора, если скорость пара в нем  $w = 120 \text{ м/с}$ .

$$\text{Отв. } d = 3,22 \text{ м}.$$

418. Найти площади минимального и выходного сечений сопла Лавалля, если известны параметры пара перед соплом:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ . Давление за соплом  $p_2 = 0,25 \text{ МПа}$ . Расход пара через сопло  $M = 720 \text{ кг/ч}$ . Скоростной коэффициент  $\varphi = 0,94$ .

$$\text{Отв. } f_{\min} = 165 \text{ мм}^2; f_{\max} = 210 \text{ мм}^2.$$

419. В паровую турбину подается пар со следующими параметрами:  $p_1 = 5,9$  МПа,  $t_1 = 400^\circ \text{C}$ . В клапанах турбины пар дросселируется до 5,4 МПа и поступает в расширяющиеся сопла, давление за которыми  $p_2 = 0,98$  МПа. Расход пара через одно сопло  $M = 8000$  кг/ч. Скоростной коэффициент  $\varphi = 0,94$ .

Определить площади минимального и выходного сечений.

*Отв.*  $f_{\min} = 355 \text{ мм}^2$ ;  $f_{\max} = 546 \text{ мм}^2$ .

420. По паропроводу течет влажный пар, параметры которого  $p_1 = 1$  МПа и  $x_1 = 0,98$ . Часть пара через дроссельный вентиль перепускается в паропровод, давление в котором  $p_2 = 0,12$  МПа.

Определить состояние пара в паропроводе низкого давления.

*Отв.* Пар перегретый:  $t_2 = 130^\circ \text{C}$ .

ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

На рис. 82 приведена условная схема паросиловой установки. Пар из парового котла *ПК* поступает в пароперегреватель *ПП*, откуда он направляется в турбину *Т* и далее в конденсатор *К*. В конденсаторе с помощью охлаждающей воды, подаваемой циркуляционным насосом *ЦН*,

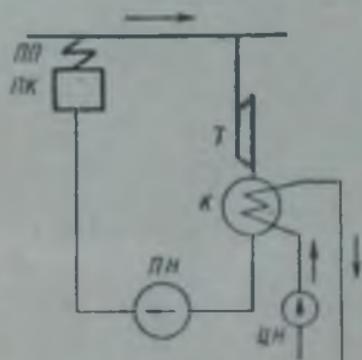


Рис. 82

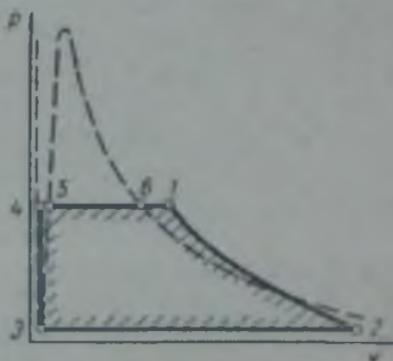


Рис. 83

сом *ЦН*, от пара отводится теплота, и он конденсируется. Образовавшийся конденсат питательным насосом *ПН* подается в котел, и цикл повторяется вновь.

На рис. 83 дан теоретический цикл Ренкина в диаграмме *p-v*.

Точка 3 характеризует состояние воды на выходе из конденсатора, линия 3—4 — процесс повышения давления в питательном насосе, 4—5 — подогрев воды в паровом котле, точка 5 — состояние воды при температуре насыщения, 5—6 — парообразование в котле, 6—1 — перегрев пара в пароперегревателе. Точка 1 характеризует состояние пара, поступившего в турбину; 1—2 — адиабатное расширение пара в турбине; точка 2 — состояние отработавшего пара, выходящего из турбины; 2—3 — процесс конденсации пара в конденсаторе.

Так как по сравнению с объемами пара объемы жидкости очень малы, то ими при не очень высоких давлениях пренебрегают. Кривая процесса сжатия жидкости при этом совпадает с осью ординат, и цикл получает вид, изображенный на рис. 84.

Этот же цикл в диаграмме  $Ts$  показан на рис. 85. Кривая 3—4 изображает нагревание воды в паровом котле. Точка 4 соответствует температуре кипящей воды при давлении  $p_1$  в котле. Площадь, лежащая под кривой 3—4, измеряет количество теплоты, подведенной к воде при ее нагреве до точки кипения. Прямая 4—5 изобра-

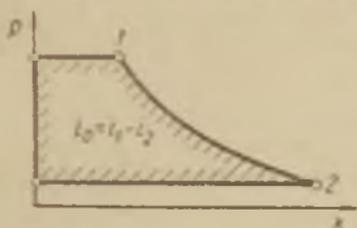


Рис. 84

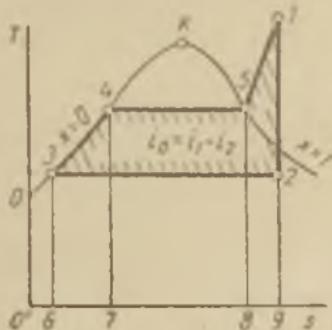


Рис. 85

жает процесс парообразования. Точка 5 соответствует состоянию сухого насыщенного пара. Площадь 4—5—8—7—4 соответствует теплоте парообразования  $r$ . Кривая 5—1 изображает процесс перегрева пара в пароперегревателе, а точка 1 — состояние перегретого пара после пароперегревателя. Площадь 5—1—9—8—5, лежащая под кривой 5—1, соответствует теплоте перегрева, площадь 0—4—5—1—9—0'—0 — энтальпии ( $i_1$ ) перегретого пара в точке 1. Энтальпия воды  $i_2'$ , поступающей в котел, изображается площадью 0—3—6—0'—0. Таким образом, для получения 1 кг пара в котле затрачивается  $i_1 - i_2$  единиц теплоты (площадь 3—4—5—1—9—6—3).

Прямая 1—2 изображает адиабатное расширение пара в турбине. Точка 2 соответствует состоянию отработавшего пара при давлении  $p_2$ . Энтальпия его ( $i_2$ ) изображается площадью 0—3—2—9—0'—0. Прямая 2—3 изображает процесс конденсации пара, причем площадь 2—3—6—9—2, лежащая под прямой 2—3, соответствует количеству теплоты, отнимаемой от 1 кг пара в конденсаторе, т. е. площадь 2—3—6—9—2 =  $i_2 - i_2'$ .

Таким образом, количество теплоты, подведенной к 1 кг пара в этом цикле, равно  $i_1 - i_2'$ .

Количество же теплоты, отведенной от 1 кг пара, равно  $i_2 - i_2'$ ; следовательно, количество теплоты, затраченной на производство работы и отнесенной к 1 кг пара, составляет

$$i_1 - i_2 = l_0 \quad (240)$$

и изображается площадью 3—4—5—1—2—3.

Термический к. п. д. цикла Ренкина есть отношение полезно использованной теплоты ко всей затраченной, т. е.

$$\eta = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} \quad (241)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  — начальное и конечное значения энтальпии пара в адиабатном процессе расширения его в турбине;

$i_2'$  — энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при давлении  $p_2$ .

Величины, входящие в формулу (241), могут быть определены при помощи диаграммы  $i_s$ . Для перегретого пара начальное состояние находится в пересечении изобары  $p_1$  и изотермы  $t_1$  (рис. 86): для влажного — в пересечении изобары  $p_1$  и линии сухости  $x_1$ ; для сухого насыщенного — в пересечении изобары  $p_1$  и верхней пограничной кривой. Проектируя точку 1, изображающую начальное состояние пара, на ось ординат, находим энтальпию пара  $i_1$ , а проведя из нее адиабату расширения (прямую, параллельную оси ординат) до конечной изобары, получаем точку 2, характеризующую состояние отработавшего пара. По этой точке находим энтальпию пара в конечном состоянии  $i_2$ . Отрезок 1—2 в определенном масштабе дает значение величины  $i_1 - i_2$ .

Энтальпию конденсата  $i_2'$  находят по температуре  $t_0$ , соответствующей конечному давлению  $p_2$ . Для этого по изобаре  $p_2$  надо подняться до верхней пограничной кривой. По значению изотермы, проходящей через точку пересечения изобары  $p_2$  с верхней пограничной кривой, получим  $t_2' \approx i_2'$ . Более точно значение  $i_2'$  определяют по таблицам насыщенного пара.

Цикл Ренкина для сухого насыщенного и влажного насыщенного пара в диаграмме  $Ts$  представлен на рис. 87 и 88.

Подробнее исследование термического к. п. д. цикла Ренкина при изменении параметров начального и конеч-

ного состояний рабочего тела приводит к выводу, что термический к. п. д. этого цикла повышается с увеличением начального давления и начальной температуры и с уменьшением давления  $p_2$  в конденсаторе.

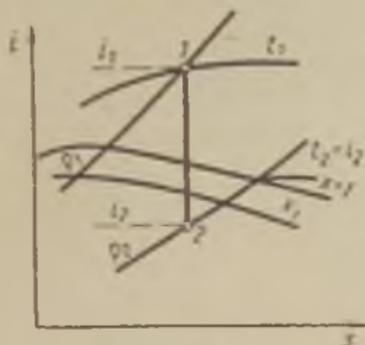


Рис. 86

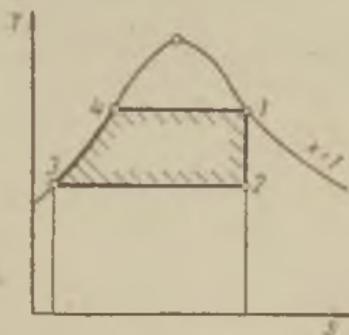


Рис. 87

Удельный расход пара и теплоты при осуществлении идеального цикла Ренкина определяется следующим образом:

$$d_0 = \frac{3600}{i_1 - i_2} \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}, \quad (242)$$

или

$$d_0 = \frac{3600}{h_0} \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}, \quad (243)$$

если значения  $i$  взяты в кДж.

Величину  $h_0 = i_1 - i_2$  называют *располагаемым теплотоперепадом*.

Так как на 1 кг пара в цикле Ренкина расходуется теплота  $i_1 - i_2$ , то удельный расход теплоты на 1 кВт·ч

$$q = d_0 (i_1 - i_2) \text{ кДж/(кВт}\cdot\text{ч)}. \quad (244)$$

Формулы (241)—(244) определяют термический к. п. д. и удельные расходы пара и теплоты в идеальном цикле паросиловой установки. Действительный цикл сопровождается неизбежными потерями, вследствие чего удельные расходы пара и теплоты увеличиваются. Так, в паровой турбине процесс расширения пара сопровождается потерями, связанными главным образом с трением.

Работа трения превращается в теплоту, повышающую энтальпию пара в конечном состоянии. Поэтому в действительном процессе, протекающем необратимо, а следовательно, с увеличением энтропии, кривая процесса

отклонится право (рис. 89). Конечное состояние пара изобразится уже не точкой 2, лежащей на пересечении адиабаты 1—2 и изобары  $p_2$ , а точкой, лежащей на той же изобаре, но расположенной правее. Условно действительный процесс расширения изображают линией 1—2д.

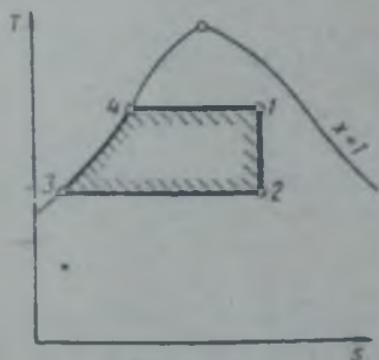


Рис. 88

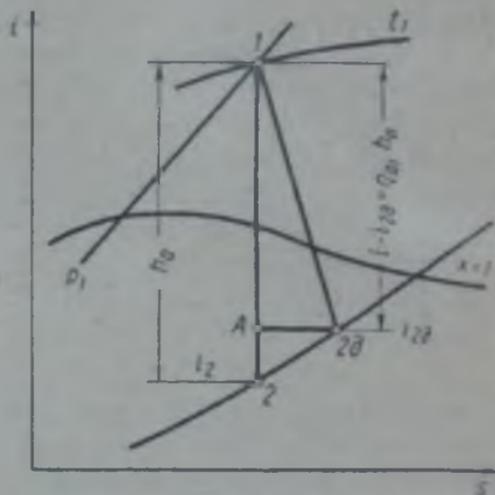


Рис. 89

Очевидно, полезная работа в действительном цикле (или, как ее называют, *внутренняя работа*)

$$l_i = \bar{i}_1 - \bar{i}_{2д} \quad (245)$$

будет меньше работы ( $l_0$ ) идеального цикла.

Отношение

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{\bar{i}_1 - \bar{i}_{2д}}{\bar{i}_1 - \bar{i}_2} = \eta_0 \quad (246)$$

называют *относительным внутренним к. п. д.* Этот коэффициент характеризует степень совершенства действительного процесса по сравнению с идеальным.

*Абсолютный внутренний к. п. д.* представляет собой отношение полезно использованной теплоты в действительном процессе к затраченной теплоте:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{\bar{i}_1 - \bar{i}_{2д}}{\bar{i}_1 - \bar{i}_2} \quad (247)$$

Из сопоставления формул (241), (246) и (247) получаем

$$\eta_{\text{в}} = \eta_0 \eta_{\text{в}} \quad (248)$$

Из формулы (246) определим

$$\bar{i}_{2д} = \bar{i}_1 - (\bar{i}_1 - \bar{i}_2) \eta_{\text{в}} = \bar{i}_1 - h_0 \eta_{\text{в}} \quad (249)$$

Это уравнение позволяет по заданному  $\eta_{0i}$  найти точку 2д.

Для этого нужно (см. рис. 89) из начальной точки 1 провести адиабату 1—2, затем от точки 2 отложить вверх отрезок 2—А и через точку А провести горизонталь. Пересечение ее с конечной изобарой  $p_2$  даст точку 2д.

Внутренняя работа, произведенная турбиной, не может быть полностью использована. Часть ее расходуется на механические потери в трущихся частях двигателя. Поэтому работа, полученная на валу турбины, или эффективная работа  $l_e$ , меньше внутренней работы  $l_i$ .

Отношение

$$\frac{l_e}{l_i} = \eta_m \quad (250)$$

есть *механический к. п. д.* турбины.

Так как преобразование механической энергии в электрическую связано с потерями в генераторе, то вводят еще понятие *к. п. д. генератора*:

$$\eta_g = \frac{l_g}{l_e}, \quad (251)$$

где  $l_g$  — работа 1 кг пара, превращенная в электрическую энергию.

Для оценки экономичности паросиловой установки в целом необходимо еще знать *к. п. д. котельной установки*  $\eta_{к. у.}$ , представляющий собой отношение полезно использованной теплоты топлива к теплоте сгорания топлива, а также *к. п. д. паропровода*  $\eta_p$ , учитывающий потери, обусловленные теплообменом пара с окружающей средой.

Таким образом, экономический к. п. д. электростанции

$$\eta_{ст} = \eta_{к. у.} \eta_p \eta_i \eta_{0i} \eta_m \eta_g. \quad (252)$$

### ЦИКЛ С ВТОРИЧНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Повышение начального давления пара с целью увеличения термического к. п. д. цикла Ренкина приводит к увеличению влажности пара на выходе его из двигателя. Так как это обстоятельство сопряжено с вредными последствиями для работы паровых турбин, то для снижения

влажности пара в конце расширения иногда применяют так называемый *вторичный или промежуточный перегрев пара*.

Цикл с вторичным перегревом пара в диаграмме  $i-s$  показан на рис. 90. Прямая 1—3 показывает адиабатное расширение пара до некоторого давления  $p_1$  в первом цилиндре двигателя, линия 3—4 — вторичный (или промежуточный) перегрев пара при давлении  $p_1$  и прямая

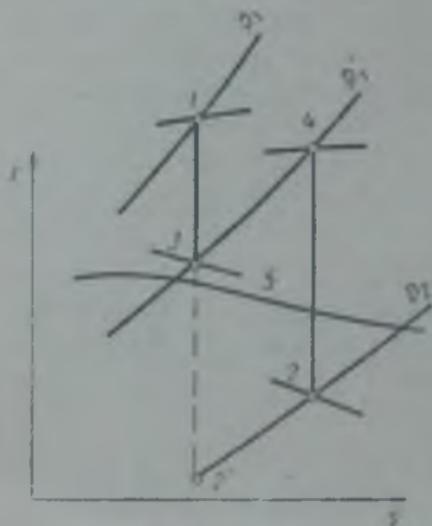


Рис. 90

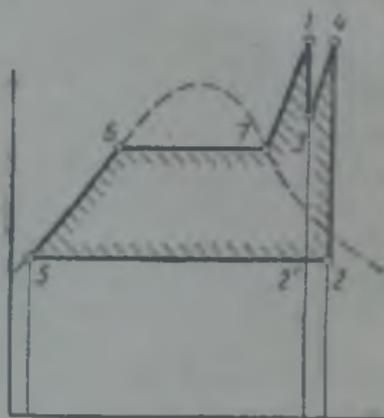


Рис. 91

4—2 — адиабатное расширение пара во втором цилиндре двигателя до конечного давления  $p_2$  в конденсаторе.

Термический к. п. д. такого цикла определяют из выражения

$$\eta_t = \frac{(i_3 - i_2) + (i_4 - i_2)}{(i_1 - i_2) + (i_4 - i_3)}. \quad (253)$$

Изображение цикла с вторичным перегревом в диаграмме  $Ts$  дано на рис. 91. Линия 5—6—7—1 изображает процесс получения перегретого пара, 1—3 — процесс адиабатного расширения пара в первом цилиндре, 4—2 — процесс адиабатного расширения пара во втором цилиндре, 3—4 — процесс вторичного перегрева пара.

Вторичный перегрев пара увеличивает термический к. п. д. основного цикла в том случае, если давление, при котором производится вторичный перегрев, выбрано так, что термический к. п. д. дополнительного цикла 3—4—2—2' больше термического к. п. д. основного цикла.

## ТЕПЛОФИКАЦИОННЫЙ ЦИКЛ

В так называемых *конденсационных установках*, которые вырабатывают только механическую (или электрическую) энергию, весь отработавший пар конденсируется охлаждающей циркуляционной водой. Последняя нагревается обычно до 15—30° С и уносит с собой огромное количество теплоты, которая не может быть использована вследствие низкой температуры воды. Эти потери с охлаждающей водой составляют в конденсационных установках до 60% теплоты, выделяющейся при сгорании топлива.

Стремление к использованию теплоты, уносимой циркуляционной (охлаждающей) водой, привело к мысли значительно повысить ее температуру за счет повышения давления отработавшего пара и использовать ее для отопления зданий, технологических процессов самых разнообразных производств, сушки, варки и т. п.

Таким образом, осуществляется комбинированная выработка электрической и тепловой энергии. Такие установки называют *теплофикационными* или *теплоэлектроцентралями* (ТЭЦ).

Повышение противодавления (конечного давления пара) приводит к уменьшению выработки механической или электрической энергии, но общее использование теплоты при этом значительно повышается. Из рис. 92 можно видеть, что вся теплота  $q_2$ , представляющая собой в конденсационных установках неизбежную потерю, в случае идеального теплофикационного цикла будет полностью использована. В действительных условиях часть теплоты теряется, и экономичность теплофикационных установок достигает 70—75%.

Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии является основой *теплофикации*, получившей особое развитие в СССР как наиболее передовой и совершенный метод производства тепловой и электрической энергии.

## РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ЦИКЛ

Эффективным способом повышения к. п. д. паросиловых установок служит регенерация.

На рис. 93 показана схема установки с регенеративным подогревом питательной воды. Эта схема отличается от схемы, приведенной на рис. 82, тем, что не весь пар, поступающий в турбину, расширяется до конечного давления, а часть его отбирается при некотором проме-



Количество отобранного пара  $\alpha$  определяется из уравнения баланса теплоты для подогревателя:

$$\alpha = \frac{i_{отб} - i_2}{i_{отб} - i_2'}, \quad (254)$$

где  $i_{отб}$  — энтальпия конденсата при давлении отбора;  
 $i_{отб}'$  — энтальпия пара, отбираемого из турбины;  
 $i_2$  — энтальпия конденсата при конечном давлении пара.

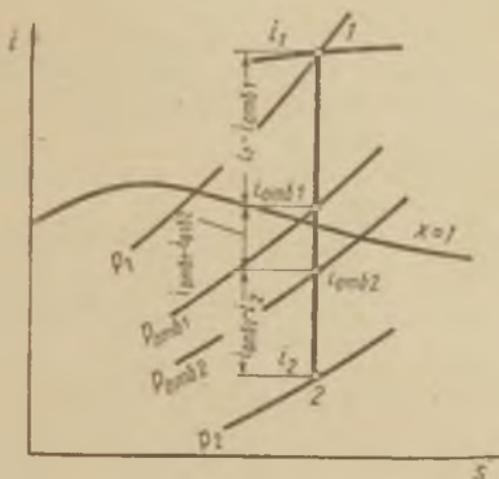


Рис. 96

Полезная работа 1 кг пара в регенеративном цикле

$$l_{op} = (1 - \alpha) (i_1 - i_2) + \alpha (i_1 - i_{отб}'),$$

или после простых преобразований

$$l_{op} = (i_1 - i_2) - \alpha (i_{отб} - i_2). \quad (255)$$

Количество теплоты, затраченной на 1 кг пара, составляет

$$i_1 - i_{отб}'.$$

Термический к. п. д. регенеративного цикла равен отношению полезно использованной теплоты ко всей затраченной:

$$\eta_{tp} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{op}}{i_1 - i_{отб}'} = \frac{i_1 - i_2 - \alpha (i_{отб} - i_2)}{i_1 - i_{отб}'}. \quad (256)$$

На рис. 95 приведена схема установки с двумя отборами пара и смешивающими подогревателями, а на рис. 96

дано условное изображение процесса расширения пара в турбине в диаграмме  $i$ - $s$ . Значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяют из уравнений баланса теплоты для первого и второго подогревателей:

$$\alpha_1 = \frac{i'_{отб1} - i'_{отб2}}{i_{отб1} - i'_{отб2}}; \quad (257)$$

$$\alpha = \frac{(1 - \alpha_1)(i'_{отб2} - i_2)}{i_{отб2} - i_2}, \quad (258)$$

где  $i_{отб1}$  — энтальпия пара в первом отборе;

$i'_{отб2}$  — энтальпия пара во втором отборе;

$i'_{отб1}$  — энтальпия конденсата при давлении пара первого отбора;

$i'_{отб2}$  — энтальпия конденсата при давлении пара второго отбора;

$i_2$  — энтальпия конденсата при конечном давлении пара.

Полезная работа 1 кг пара в регенеративном цикле с двумя отборами составляет

$$l_{op} = i_1 - i_2 - \alpha_1(i_{отб1} - i_2) - \alpha_2(i_{отб2} - i_2). \quad (259)$$

Количество теплоты, затраченной на 1 кг пара, составляет  $i_1 - i'_{отб1}$ .

Термический к. п. д. регенеративного цикла с двумя отборами

$$\begin{aligned} \eta_{tp} &= \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{op}}{i_1 - i'_{отб1}} = \\ &= \frac{i_1 - i_2 - \alpha_1(i_{отб1} - i_2) - \alpha_2(i_{отб2} - i_2)}{i_1 - i'_{отб1}}. \end{aligned} \quad (260)$$

Удельный расход пара в регенеративном цикле

$$d_{op} = \frac{3600}{i_1 - i_2 - \alpha_1(i_{отб1} - i_2) - \alpha_2(i_{отб2} - i_2)} \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}, \quad (261)$$

если значения  $i$  взяты в кДж/кг.

Подробное исследование регенеративного цикла показывает, что его термический к. п. д. всегда больше термического к. п. д. цикла Ренкина с теми же начальными и конечными параметрами. Экономия от применения регенеративного цикла растет с увеличением отборов пара.

## БИНАРНЫЙ ЦИКЛ

Сравнение цикла Ренкина с циклом Карно (рис. 97) показывает, что полезная работа цикла Ренкина (площадь 5—6—7—8—9—5) значительно меньше полезной работы цикла Карно (площадь 5—0—8—9—5). Так как при этом количество отводимой теплоты для обоих циклов одинаково, то термический к. п. д. цикла Ренкина значительно ниже к. п. д. цикла Карно, совершающегося в пределах тех же температур.

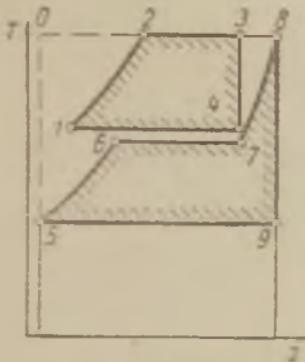


Рис. 97

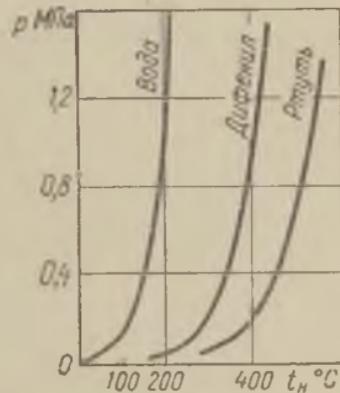


Рис. 98

\* Из рис. 97 видно, что работа цикла Ренкина, а следовательно, и к. п. д. этого цикла были бы значительно выше, если температура насыщения (точка б) при данном давлении была бы выше.

Так как зависимость  $t_n = f(p)$  определяется физическими свойствами рабочего тела, возникла мысль использовать в качестве рабочих тел для паросиловых установок другие жидкости, для которых при тех же давлениях температура кипения значительно выше температуры кипения воды. В качестве таких жидкостей были предложены ртуть и дифенил. Зависимость между давлением и температурой насыщения для воды, дифенила и ртути показана на рис. 98, а таблица ртутных насыщенных паров дана в приложении (табл. XVI).

Ввиду дополнительных требований, предъявляемых к рабочему телу паросиловых установок, и трудности подыскания такого вещества, которое удовлетворяло бы всем требованиям, осуществляют циклы с двумя рабочими телами. Такие циклы получили название *бинарных циклов*.

На рис. 99 дана тепловая схема бинарной ртутно-водяной установки.

Ртутный пар, полученный в котле 1, направляется в ртутную турбину 2. Из турбины ртутный пар поступает в конденсатор-испаритель 3, в котором пар ртути конденсируется, а освободившаяся теплота расходуется на испарение воды. Насыщенный водяной пар из конденсатора-испарителя поступает в пароперегреватель 4, затем в турбину 5 и далее идет в конденсатор 6; конденсат

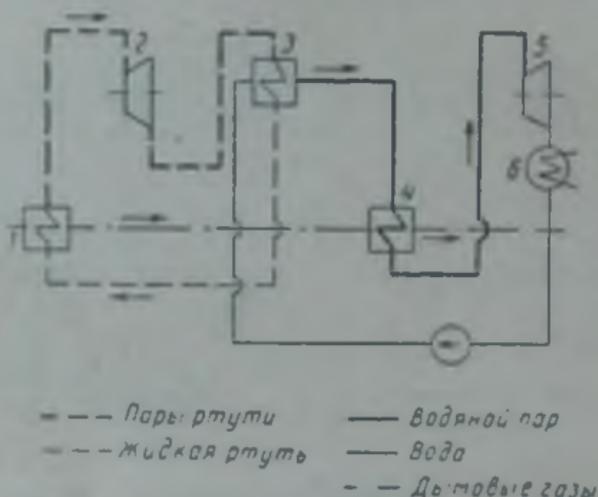


Рис. 99

с помощью насоса подается в конденсатор-испаритель. Жидкая ртуть из конденсатора-испарителя поступает в ртутный котел.

Цикл 1—2—3—4—1 (см. рис. 97) представляет собой круговой процесс, совершаемый ртутью. Начальная точка цикла — точка 1. Она характеризует состояние ртути при поступлении ее в ртутный котел. Линия 1—2 изображает нагрев жидкой ртути, причем точка 2 соответствует температуре кипения при данном давлении. Последнее выбирают таким, чтобы температура в точке 2 соответствовала наибольшей допустимой температуре. Уже при 1МПа для ртути температура кипения равна 515° С. Линия 2—3 изображает парообразование в котле, 3—4 — адиабатное расширение ртутного пара в паро-ртутной турбине и 4—1 — конденсацию отработавшего пара в конденсаторе-испарителе. Точку 4 выбирают в зависимости от того, какое давление выбрано для второго рабочего тела — воды.

225,7 = 0,069

Применение бинарных циклов значительно повышает термический к. п. д. установки.

### Задачи

421. Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния:  $p_1 = 2$  МПа,  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить термический к. п. д.

### Решение

Термический к. п. д. цикла Ренкина по формуле (241)

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}$$

По диаграмме  $is$  находим;

$$i_1 = 3019 \text{ кДж/кг}; i_2 = 2036 \text{ кДж/кг};$$

$$i_2' = 121,0 \text{ кДж/кг.}$$

Точное значение  $i_2'$  получим по таблицам:

$$i_2' = 121,4 \text{ кДж/кг.}$$

Подставляя найденные значения в эту формулу, будем иметь

$$\eta_t = \frac{3019 - 2036}{3019 - 121,4} = 0,339.$$

422. Определить термический к. п. д. цикла Ренкина, если  $p_1 = 6$  МПа,  $t_1 = 450^\circ \text{C}$  и  $p_2 = 0,004$  МПа.

Отв.  $\eta_t = 40,2\%$ .

423. Сравнить термический к. п. д. идеальных циклов, работающих при одинаковых начальных и конечных давлениях  $p_1 = 2$  МПа и  $p_2 = 0,02$  МПа, если в одном случае пар влажный со степенью сухости  $x = 0,9$ , в другом сухой насыщенный и в третьем перегретый с температурой  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ .

Отв. 1)  $\eta_t = 0,269$ ; 2)  $\eta_t = 0,278$ ;  
3)  $\eta_t = 0,286$ .

424. Определить работу 1 кг пара в цикле Ренкина, если  $p_1 = 2$  МПа,  $t_1 = 450^\circ \text{C}$  и  $p_2 = 0,004$  МПа. Изобразить данный цикл в диаграммах  $pv$ ,  $Ts$  и  $is$ .

Отв.  $l_0 = 1161$  кДж/кг.

425. Найти термический к. п. д. и мощность паровой машины, работающей по циклу Ренкина, при следующих условиях: при впуске пар имеет давление  $p_1 = 1,5$  МПа и температуру  $t_1 = 300^\circ \text{C}$ ; давление пара при выпуске  $p_2 = 0,01$  МПа; часовой расход пара составляет 940 кг/ч.

Отв.  $\eta_t = 0,296$ ;  $N = 220$  кВт.

426. Паровая турбина мощностью  $N = 12\,000$  кВт работает при начальных параметрах  $p_1 = 8$  МПа и  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. В котельной установке, снабжающей турбину паром, сжигается уголь с теплотой сгорания  $Q_H^P = 25\,120$  кДж/кг. К. п. д. котельной установки равен 0,8. Температура питательной воды  $t_{п.в} = 90^\circ \text{C}$ .

Определить производительность котельной установки и часовой расход топлива при полной нагрузке паровой турбины и условия, что она работает по циклу Ренкина.

### Р е ш е н и е

Пользуясь диаграммой  $i_s$ , находим  $i_1 = 3274$  кДж;  $i_2 = 1972$  кДж/кг. Тогда по формуле (242)

$$d_0 = \frac{3600}{3274 - 1972} = 2,77 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Следовательно, расход пара паровой турбиной

$$D = 2,77 \cdot 12\,000 = 33\,240 \text{ кг/ч}.$$

Это количество пара определяет производительность котельной установки.

Количество теплоты, подведенной к пару, равно  $D_0 (i_1 - i_{п.в})$ . Так как к. п. д. котельной установки  $\eta_{к.у} = 0,8$ , то количество теплоты, выделившейся при горении топлива, должно равняться

$$\frac{D_0 (i_1 - i_{п.в})}{\eta_{к.у}},$$

и, следовательно, при теплоте сгорания топлива  $Q_H^P = 25\,120$  кДж/кг часовой расход его

$$B = \frac{D_0 (i_1 - i_{п.в})}{Q_H^P \eta_{к.у}} = \frac{33\,240 (3274 - 377)}{25\,120 \cdot 0,8} = 4791 \text{ кг/ч}.$$

427. Определить термический к. п. д. цикла Ренкина для следующих параметров

1)  $p_1 = 3,5$  МПа;  $t_1 = 435^\circ$  С;  $p_2 = 0,004$  МПа;

2)  $p_1 = 9$  МПа;  $t_1 = 500^\circ$  С;  $p_2 = 0,004$  МПа;

3)  $p_1 = 13$  МПа;  $t_1 = 565^\circ$  С;  $p_2 = 0,0035$  МПа;

4)  $p_1 = 30$  МПа;  $t_1 = 650^\circ$  С;  $p_2 = 0,03$  МПа.

Отв. 1)  $\eta_t = 0,379$ ; 2)  $\eta_t = 0,427$ ;  
3)  $\eta_t = 0,448$ ; 4)  $\eta_t = 0,483$ .

428. Параметры пара перед паровой турбиной:  $p_1 = 9$  МПа,  $t_1 = 500^\circ$  С. Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа.

Найти состояние пара после расширения в турбине, если ее относительный внутренний к. п. д.  $\eta_{oi} = 0,84$ .

### Р е ш е н и е

Проведя в диаграмме  $is$  (см. рис. 89) адиабату 1—2, определяем располагаемый адиабатный перепад теплоты:

$$h_0 = i_1 - i_2 = 1380,4 \text{ кДж/кг.}$$

Действительный теплоперепад

$$h_i = h_0 \eta_{oi} = 1380,4 \cdot 0,84 = 1159,4 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия пара за турбиной

$$i_{2d} = i_1 - h_i = 3384 - 1159,4 = 2224,5 \text{ кДж/кг.}$$

Проведя в диаграмме  $is$  линию постоянной энтальпии  $i = 2224$  кДж/кг, находим в пересечении с изобарой  $p_2 = 0,004$  МПа точку 2д, для которой  $x = 0,865$ .

429. Определить абсолютный внутренний к. п. д. паровой турбины, работающей при начальных параметрах:  $p_1 = 9$  МПа и  $t_1 = 480^\circ$  С и конечном давлении  $p_2 = 0,004$  МПа, если известно, что относительный внутренний к. п. д. турбины  $\eta_{oi} = 0,82$ .

Отв. 0,344.

430. Определить экономию, которую дает применение паровых турбин с начальными параметрами  $p_1 = 3,5$  МПа,  $t_1 = 435^\circ$  С по сравнению с турбинами, имеющими начальные параметры  $p_1 = 2,9$  МПа и  $t_1 = 400^\circ$  С.

Давление в конденсаторе для обеих турбин принять равным  $p_2 = 0,004$  МПа. Относительный эффективный к. п. д. обеих турбин принять одинаковым и равным  $\eta_e = 0,8$  (относительный эффективный к. п. д. турбин  $\eta_e = \eta_{it}/\eta_m$ ).

*Отв.* 3,08%.

431. На электростанции сжигается топливо с теплотой сгорания  $Q_n^p = 30$  МДж/кг.

Определить удельный расход топлива на 1 кВт·ч, если известны следующие данные;  $\eta_{к.у} = 0,8$ ;  $\eta_{п} = 0,97$ ;  $\eta_i = 0,4$ ;  $\eta_{oi} = 0,82$ ;  $\eta_m = 0,98$ ;  $\eta_r = 0,97$ .

Определить также удельный расход теплоты на 1 кВт·ч.

*Отв.*  $q = 14,9$  МДж/(кВт·ч);  $b = 0,498$  кг/(кВт·ч).

432. Определить к. п. д. электростанции, если удельный расход теплоты на 1 кВт·ч равен 12 140 кДж.

*Отв.*  $\eta_{ст} = 29,6\%$ .

433. Паровая турбина мощностью  $N = 25$  МВт работает при начальных параметрах  $p_1 = 3,5$  МПа и  $t_1 = 400^\circ\text{C}$ . Конечное давление пара  $p_2 = 0,004$  МПа.

Определить часовой расход топлива при полной нагрузке паровой турбины, если к. п. д. котельной установки  $\eta_{к.у} = 0,82$ , теплота сгорания топлива  $Q_n^p = 41\,870$  кДж/кг, а температура питательной воды  $t_{п.в} = 88^\circ\text{C}$ . Считать, что турбина работает по циклу Ренкина.

*Отв.*  $B = 6430$  кг/ч.

434. Турбины высокого давления мощностью  $N = 100\,000$  кВт работают при  $p_1 = 9$  МПа и  $t_1 = 480^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,004$  МПа. Определить термический к. п. д. цикла Ренкина для данных параметров и достигнутое улучшение термического к. п. д. по сравнению с циклом Ренкина для параметров пара:  $p_1 = 2,9$  МПа,  $t_1 = 400^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 0,004$  МПа.

*Отв.*  $\eta_i = 42,1\%$ ;  $\epsilon = 14,4\%$ .

435. В паросиловой установке, работающей при начальных параметрах  $p_1 = 11$  МПа;  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 0,004$  МПа, введен вторичный перегрев пара при  $p' = 3$  МПа до начальной температуры  $t' = t_1 = 500^\circ\text{C}$ .

Определить термический к. п. д. цикла с вторичным перегревом.

## Решение

Заданный цикл изображаем в диаграмме  $i_s$  и по ней находим (рис. 100):

$$i_1 = 3360 \text{ кДж/кг}; \quad i_3 = 2996 \text{ кДж/кг};$$

$$i_4 = 3456 \text{ кДж/кг}; \quad i_2 = 2176 \text{ кДж/кг};$$

$$i_2 = 121,4 \text{ кДж/кг}.$$

Работа 1 кг пара в цилиндре высокого давления (до вторичного перегрева)

$$\begin{aligned} i_1 - i_3 &= 3360 - 2996 = \\ &= 364 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Работа 1 кг пара в цилиндре низкого давления (после вторичного перегрева)

$$\begin{aligned} i_4 - i_2 &= 3456 - 2176 = \\ &= 1280 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Суммарная работа 1 кг пара

$$\begin{aligned} l_0 &= (i_1 - i_3) + (i_4 - i_2) = \\ &= 364 + 1280 = 1644 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

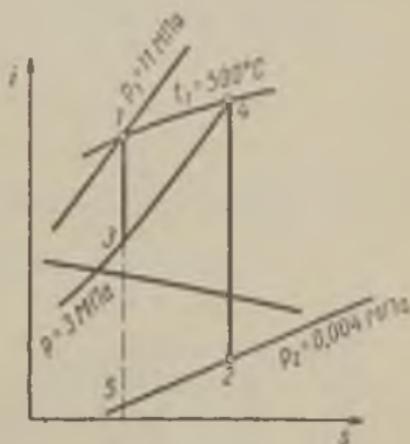


Рис. 100

Подведенная в цикле теплота в паровом котле

$$i_1 - i_2 = 3360 - 121,4 = 3238,6 \text{ кДж/кг},$$

а при вторичном перегреве

$$i_4 - i_3 = 3456 - 2996 = 460 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, затраченной в цикле,

$$\begin{aligned} (i_1 - i_2) + (i_4 - i_3) &= \\ &= 3238,6 + 460,0 = 3698,6 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Термический к. п. д. цикла с вторичным перегревом

$$\eta_t = \frac{(i_1 - i_3) + (i_4 - i_2)}{(i_1 - i_2) + (i_4 - i_3)} = \frac{1644}{3698,6} = 0,445.$$

436. Для условий предыдущей задачи определить термический к. п. д. установки при отсутствии вторичного перегрева и влияние введения вторичного перегрева на термический к. п. д. цикла.

### Р е ш е н и е

Пользуясь диаграммой  $i_s$ , получаем

$$i_5 = 1972 \text{ кДж/кг.}$$

Термический к. п. д. при отсутствии вторичного перегрева

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_2'} = \frac{1388}{3238,6} = 0,429.$$

Улучшение от введения вторичного перегрева

$$\frac{\Delta \eta}{\eta_t} 100 = \frac{(0,445 - 0,429) 100}{0,429} = 3,73\%.$$

437. Паротурбинная установка мощностью  $N = 200$  МВт работает по циклу Ренкина при начальных параметрах  $p_1 = 13$  МПа и  $t_1 = 565^\circ \text{C}$ . При давлении  $p' = 2$  МПа осуществляется промежуточный перегрев пара до первоначальной температуры. Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Температура питательной воды  $t_{п.в} = 160^\circ \text{C}$ .

Определить часовой расход топлива, если теплота сгорания топлива  $Q_g^0 = 29,3$  мДж/кг, а к. п. д. котельной установки  $\eta_{к.у} = 0,92$ .

$$\text{Отв. } B = 49\,624 \text{ кг/ч.}$$

438. Проект паротурбинной установки предусматривает следующие условия ее работы:  $p_1 = 30$  МПа,  $t_1 = 550^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 0,1$  МПа. При давлении  $p' = 7$  МПа вводится вторичный перегрев до температуры  $540^\circ \text{C}$ .

Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить конечную степень сухости пара при отсутствии вторичного перегрева и улучшение термического к. п. д. и конечную сухость пара после применения вторичного перегрева

$$\text{Отв. } x_2 = 0,782; \quad x_3 = 0,928; \quad \epsilon = 3,65\%.$$

439. На рис. 101 представлена схема паросиловой установки, в которой осуществлен вторичный перегрев пара до первоначальной температуры. В этой схеме: ПК — паровой котел; ВП — вторичный пароперегреватель; Т — турбина; К — конденсатор; КН — конденсационный насос; ПН — питательный насос. Начальные

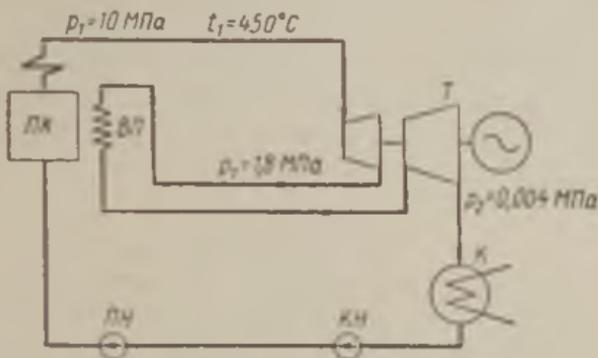


Рис. 101

параметры пара:  $p_1 = 10$  МПа,  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ ; давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Внутренний относительный к. п. д.  $\eta_{\text{вн}} = 0,8$ . Вторично пар перегревается при давлении  $p' = 1,8$  МПа.

Определить уменьшение влажности пара на выходе его из турбины вследствие введения вторичного перегрева, удельные расходы теплоты при вторичном перегреве и без него и достигнутую экономию теплоты.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } x_1 &= 0,853; \quad x_2 = 0,955; \quad q_1 = \\ &= 9734 \text{ кДж}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}); \quad q_2 = \\ &= 10\,752 \text{ кДж}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}); \quad \frac{\Delta \eta}{\eta_i} 100 = \\ &= 9,45\%. \end{aligned}$$

440. Паросиловая установка работает при начальных параметрах  $p_1 = 9$  МПа и  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ . Конечное давление  $p_2 = 0,006$  МПа. При  $p_1 = 2,4$  МПа введен вторичный перегрев до  $t' = 440^\circ \text{C}$ .

Определить термический к. п. д. цикла с вторичным перегревом и влияние введения вторичного перегрева на термический к. п. д.

$$\text{Отв. } \eta_t = 0,417; \quad \frac{\Delta \eta}{\eta_i} 100 = 2,96\%.$$

441. На заводской теплоэлектроцентрали установлены две паровые турбины с противодавлением мощностью 4000 кВт·ч каждая. Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается обратно в котельную в виде конденсата при температуре насыщения. Турбины работают с полной нагрузкой при следующих параметрах пара:  $p_1 = 3,5$  МПа,  $t_1 = 435^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 0,12$  МПа.

Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить часовой расход топлива, если к. п. д. котельной равен 0,84, а теплота сгорания топлива  $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 28\,470$  кДж/кг.

### Решение

По диаграмме  $i_s$  находим:  $i_1 = 3302$  кДж/кг;  $i_2 = 2538$  кДж/кг;  $i_2' = 439,4$  кДж/кг.

Удельный расход пара определяем по формуле (242):

$$d_0 = \frac{3600}{i_1 - i_2} = \frac{3600}{3302 - 2538} = 4,71 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Часовой расход пара, потребляемого турбинами,

$$D_0 = Nd_0 = 8000 \cdot 4,71 = 37\,680 \text{ кг/ч.}$$

Так как все это количество пара направляется на производство, то количество потребляемой им теплоты

$$Q_{\text{оп}} = D_0 (i_2 - i_2') = 37\,680 (2538 - 439,4) = 79,075 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, сообщенной пару в котельной,

$$Q = D_0 (i_1 - i_2') = 37\,680 (3302 - 439,4) = 107,9 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Расход топлива в котельной определяется из уравнения

$$Q = BQ_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{к. у.}}$$

Следовательно, часовой расход топлива

$$B = \frac{Q}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{к. у.}}} = \frac{107,9 \cdot 10^6}{28\,470 \cdot 0,84} = 4511 \text{ кг/ч.}$$

442. Для условий предыдущей задачи подсчитать расход топлива в случае, если вместо комбинированной выработки электрической и тепловой энергии на теплоэлектроцентрали будет осуществлена раздельная выработка электроэнергии в конденсационной установке и тепловой энергии в котельной низкого давления.

Конечное давление пара в конденсационной установке принять  $p_2 = 0,004$  МПа. К. п. д. котельной низкого давления принять тот же, что для котельной высокого давления.

Определить для обоих случаев коэффициент использования теплоты.

### Решение

По диаграмме  $is$  находим:  $i_1 = 3302$  кДж/кг;  $i_2 = 2092$  кДж/кг;  $i'_2 = 121,4$  кДж/кг.

Удельный расход пара на турбину

$$d_0 = \frac{3600}{i_1 - i_2} = \frac{3600}{3302 - 2092} = 2,97 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Полный расход пара на турбину

$$D_0 = Nd_0 = 8000 \cdot 2,97 = 23\,760 \text{ кг/ч}.$$

Количество теплоты, сообщенной пару в котельной,

$$Q = D_0(i_1 - i'_2) = 23\,760(3302 - 121,4) = 75,57 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Расход топлива  $B_1$  в котельной высокого давления определится из уравнения

$$Q = B_1 Q_{н\eta_{к.у}}^{\eta_{к.у}}$$

Следовательно,

$$B_1 = \frac{Q}{Q_{н\eta_{к.у}}^{\eta_{к.у}}} = \frac{75,57 \cdot 10^6}{28\,470 \cdot 0,84} = 3160 \text{ кг/ч}.$$

Количество теплоты, потребляемой производством, а следовательно, сообщенной пару в котельной низкого давления, по-прежнему

$$Q_{нр} = 79,075 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Расход топлива  $B_2$  в котельной низкого давления определится из уравнения

$$Q_{\text{пр}} = B_2 Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{к.у}}$$

и, следовательно,

$$B_2 = \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{к.у}}} = \frac{79,075 \cdot 10^6}{28\,470 \cdot 0,84} = 3306 \text{ кг/ч.}$$

Суммарный расход топлива в обеих котельных установках

$$3160 + 3306 = 6466 \text{ кг/ч.}$$

Экономия топлива на ТЭЦ в сравнении с отдельной выработкой электрической и тепловой энергии

$$\frac{(6466 - 4511) 100}{6466} = 30,3\%.$$

Коэффициент использования теплоты топлива определяется как отношение всей полезно использованной теплоты ко всей затраченной. Следовательно, в случае комбинированной выработки электрической и тепловой энергии

$$k = \frac{3600N + Q_{\text{пр}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{3600 \cdot 8000 + 79,075 \cdot 10^6}{4511 \cdot 28\,470} = 0,840.$$

В случае же отдельной выработки обоих видов энергии

$$k = \frac{3600 \cdot 8000 + 79,075 \cdot 10^6}{6466 \cdot 28\,470} = 0,586.$$

**443.** Паротурбинная установка мощностью 12 000 кВт работает по циклу Ренкина при следующих параметрах пара:  $p_1 = 3,5$  МПа,  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ ;  $p_2 = 0,2$  МПа.

Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается в котельную в виде конденсата при температуре насыщения. Топливо, сжигаемое в котельной, имеет теплоту сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29,3$  МДж/кг, к. п. д. котельной установки  $\eta_{\text{к.у}} = 0,85$ .

Определить часовой расход топлива. Сравнить его с тем расходом топлива, который был бы в случае отдельной выработки электрической энергии в конденсационной установке с давлением пара в конденсаторе  $p_3 =$

= 0,004 МПа, а тепловой энергии — в котельной низкого давления. К. п. д. котельной низкого давления принять таким же, как и к. п. д. котельной высокого давления.

$$\text{Отв. } B_1 = 7220 \text{ кг/ч; } B_2 = 10\,030 \text{ кг/ч.}$$

444. Для снабжения предприятия электрической и тепловой энергией запроектирована паротурбинная установка мощностью  $N = 25\,000$  кВт, работающая при следующих параметрах пара:  $p_1 = 9$  МПа;  $t_1 = 480^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 1$  МПа.

Весь пар из турбины направляется на производство и оттуда возвращается обратно в котельную в виде конденсата при температуре насыщения.

Считая, что установка работает по циклу Ренкина и при полной нагрузке, определить экономию, полученную вследствие комбинированной выработки электрической и тепловой энергии по сравнению с отдельной выработкой обоих видов энергии. Топливо, сжигаемое в котельной, имеет теплоту сгорания  $Q_n^p = 25\,960$  кДж/кг; к. п. д. котельной высокого и низкого давления принять одинаковым и равным 0,83. Конечное давление пара в турбине при конденсационном режиме  $p_2 = 0,004$  МПа.

$$\text{Отв. } 26,5\%.$$

445. Турбина мощностью 6000 кВт работает при параметрах пара:  $p_1 = 3,5$  МПа;  $t_1 = 435^\circ\text{C}$ ;  $p_2 = 0,004$  МПа.

Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при  $p = 0,12$  МПа (рис. 102).

Определить термический к. п. д. установки, удельный расход пара и теплоту и улучшение термического к. п. д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

### Р е ш е н и е

Пользуясь диаграммой  $i_s$  (см. рис. 102) и таблицами водяного пара, находим:  $i_1 = 3302$  кДж/кг;  $i_{отб} = 2538$  кДж/кг;  $i_2 = 2092$  кДж/кг;  $i_{отб}^* = 439,4$  кДж/кг;  $i_2' = 121,4$  кДж/кг;  $t_{отб.н} = 104,8^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 29,0^\circ\text{C}$ .

Определяем долю отбора  $\alpha$ , считая, что конденсат нагревается в смешивающем подогревателе до температуры насыщения, соответствующей давлению в отборе, т. е. до  $t_{отб.н} = 104,8^\circ\text{C}$ .

По уравнению (254) находим

$$\alpha = \frac{i'_{отб} - i_2}{i_{отб} - i_2} = \frac{439,4 - 121,4}{2538 - 121,4} = \frac{318}{2416,6} = 0,13.$$

Полезная работа 1 кг пара определится по формуле (255):

$$l_{op} = i_1 - i_2 - \alpha (i_{отб} - i_2);$$

$$l_{op} = 3302 - 2092 - 0,13 (2538 - 2092) = 1152 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход пара по формуле (242) составит

$$d_{op} = \frac{3600}{h_{op}} = \frac{3600}{1152} =$$

$$= 3,12 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч).}$$

Удельный расход теплоты

$$q_{op} = d_{op} (i_1 - i'_{отб}) =$$

$$= 3,12 (3302 - 439,4) =$$

$$= 8938 \text{ кДж/(кВт}\cdot\text{ч).}$$

Термический к. п. д. регенеративного цикла по формуле (256)

$$\eta_{тер} = \frac{l_{op}}{i_1 - i'_{отб}} = \frac{1152}{3302 - 439,4} = 0,4.$$

При отсутствии регенеративного подогрева термический к. п. д.

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{1210}{3180,0} = 0,38.$$

Удельный расход пара и теплоты при отсутствии регенерации соответственно составит

$$d_0 = \frac{3600}{h_0} = \frac{3600}{1210} = 2,98 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч),}$$

$$q_0 = d_0 (i_1 - i_2) =$$

$$= 2,98 (3302 - 121,4) = 9452 \text{ кДж/(кВт}\cdot\text{ч).}$$

Легко видеть, что удельный расход пара без регенерации меньше, чем при регенеративном подогреве. Однако эта величина не характеризует экономичности процесса.

Показателем последней является или термический к. п. д., или удельный расход теплоты, который при наличии регенерации всегда меньше удельного расхода теплоты, чем при конденсационном режиме без регенерации.

Улучшение термического к. п. д. вследствие регенерации составит

$$\frac{0,4 - 0,38}{0,38} 100 = 5,26\%$$

446. Турбина мощностью 24 МВт работает при параметрах пара:  $p_1 = 2,6$  МПа;  $t_1 = 420^\circ \text{C}$ ,  $p_2 = 0,004$  МПа. Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при  $p_0 = 0,12$  МПа.

Определить термический к. п. д. и удельный расход пара. Определить также улучшение термического к. п. д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

$$\begin{aligned} \text{Отв. } \eta_{tp} &= 0,38; \quad d_{op} = \\ &= 3,32 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}; \quad \eta_t = 0,361; \\ &\frac{\Delta\eta}{\eta} 100 = 5,26\%. \end{aligned}$$

447. Из паровой турбины мощностью  $N = 25\,000$  кВт, работающей при  $p_1 = 9$  МПа,  $t_1 = 480^\circ \text{C}$ ,  $p_2 = 0,004$  МПа, производится два отбора: один при  $p_{отб1} = 1$  МПа и другой при  $p_{отб2} = 0,12$  МПа (рис. 103).

Определить термический к. п. д. установки, улучшение термического к. п. д. по сравнению с циклом Ренкина и часовой расход пара через каждый отбор.

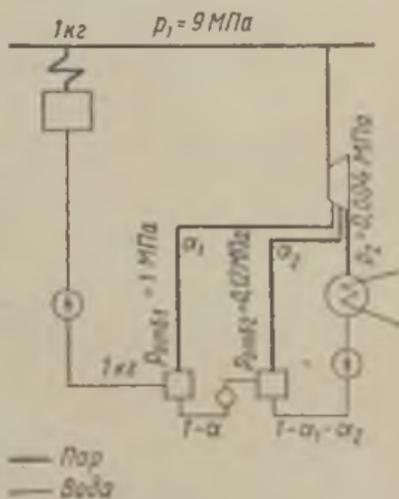


Рис. 103

### Решение

По диаграмме  $is$  (рис. 104) и по таблицам находим:  $i_1 = 3334$  кДж/кг;  $i_{отб1} = 2772$  кДж/кг;  $i_{отб2} = 2416$  кДж/кг;  $i_2 = 1980$  кДж/кг;  $i'_{отб1} = 762,7$  кДж/кг;  $i'_{отб2} = 439,4$  кДж/кг;  $i' = 121,4$  кДж/кг.

Определяем расход пара на подогрев питательной воды. Для этого находим  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по формулам (257) и (258):

$$\alpha_1 = \frac{i_{от61} - i_{от62}}{i_{от61} - i_{от62}} = \frac{762,7 - 439,4}{2772 - 439,4} = 0,138,$$

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \alpha_1)(i_{от62} - i_2)}{i_{от62} - i_2} = \frac{(1 - 0,138)(439,4 - 121,4)}{2416 - 121,4} = 0,119.$$

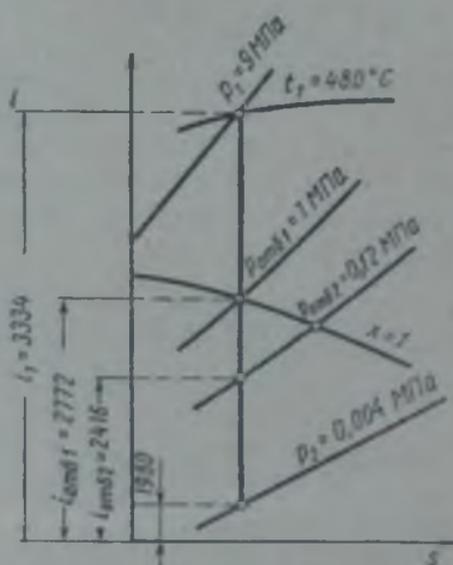


Рис. 104

Полезная работа 1 кг пара по формуле (259)

$$l_{ор} = i_1 - i_2 - \alpha_1(i_{от61} - i_2) - \alpha_2(i_{от62} - i_2),$$

$$l_{ор} = 3334 - 1980 - 0,138(2772 - 1980) - 0,119(2416 - 1980) = 1192,8 \text{ кДж/кг.}$$

Следовательно, удельный расход пара

$$d_0 = \frac{3600}{h_{ор}} = \frac{3600}{1192,8} = 3,02 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)},$$

а полный часовой расход пара на турбину

$$D_0 = Nd_0 = 25\,000 \cdot 3,02 = 75\,500 \text{ кг/ч.}$$

Из этого количества расходуется на первый отбор

$$D_{от61} = D_0 \alpha_1 = 75\,500 \cdot 0,138 = 10\,420 \text{ кг/ч;}$$

на второй отбор

$$D_{от62} = D_0 \alpha_2 = 75\,500 \cdot 0,119 = 8985 \text{ кг/ч}$$

и поступает в конденсатор

$$D_k = D_0 - D_{от61} - D_{от62} = 75\,500 - 10\,420 - 8985 = \\ = 56\,095 \text{ кг/ч.}$$

Термический к. п. д. регенеративного цикла по формуле (260)

$$\eta_{тр} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{0p}}{i_1 - i'_{от61}} = \frac{1192,8}{3334 - 762,7} = 0,464.$$

Термический к. п. д. цикла Ренкина при тех же начальных и конечных параметрах

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} = \frac{3334 - 1980}{3334 - 121,4} = 0,421.$$

Улучшение термического к. п. д. регенеративного цикла по сравнению с циклом без регенерации составляет

$$\frac{\Delta \eta}{\eta_t} 100 = \frac{0,464 - 0,421}{0,421} 100 = 10,2\%.$$

448. Турбогенератор работает при параметрах пара  $p_1 = 9$  МПа,  $t_1 = 535^\circ \text{C}$  и  $p_2 = 0,0035$  МПа. Для подогрева питательной воды имеются два отбора: один при  $p_{от61} = 0,7$  МПа и другой при  $p_{от62} = 0,12$  МПа.

Определить термический к. п. д. регенеративного цикла и сравнить его с циклом без регенерации.

$$\text{Отв. } \eta_{тр} = 0,471; \quad \eta_t = 0,432;$$

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} 100 = 9,03\%.$$

449. Паро-ртутная турбина мощностью 10 000 кВт работает при следующих параметрах;  $p_{Hg1} = 0,8$  МПа; пар — сухой насыщенный;  $p_{Hg2} = 0,01$  МПа. Получающийся в конденсаторе-испарителе ртутной турбины сухой насыщенный водяной пар поступает в пароперегреватель, где его температура повышается до  $450^\circ \text{C}$ , и затем направляется в пароводяную турбину, работающую при конечном давлении  $p_2 = 0,004$  МПа.

Определить термический к. п. д. бинарного цикла, термический к. п. д. пароводяной турбины, улучшение к. п. д. от применения бинарного цикла, а также мощность пароводяной турбины.

### Р е ш е н и е

По диаграмме  $i_s$  ртутного пара и таблице ртутного насыщенного пара (табл. XVI) находим:

$$i_{Hg1} = 360,5 \text{ кДж/кг}; i_{Hg2} = 259,5 \text{ кДж/кг.}$$

Полезная работа 1 кг ртутного пара

$$l_{0Hg} = 360,5 - 259,5 = 101 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход ртутного пара в турбине

$$d_{0Hg} = \frac{3600}{i_{Hg1} - i_{Hg2}} = \frac{3600}{101} = 35,7 \text{ кг/(кВт·ч).}$$

Полный расход ртутного пара на турбине составит

$$D_0 = N_{0Hg} = 10\,000 \cdot 35,7 = 357\,000 \text{ кг/ч.}$$

Из таблицы ртутного пара видно, что температура насыщения при  $p_{Hg2} = 0,01$  МПа составляет  $t_{Hgн} = 249,6^\circ \text{C}$ . Принимаем температуру насыщенного водяного пара такой же; это определяет давление водяного пара:

$$p_1 = 4 \text{ МПа } (t_{H_2Oн} = 250,33^\circ \text{C}).$$

Вода поступает в ртутный конденсатор с температурой насыщения при давлении в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа. Ее энтальпия при этом  $i_{H_2O2} = 121,4$  кДж/кг. Энтальпия водяного пара  $i_{H_2O1} = 2801$  кДж/кг. Таким образом, каждый килограмм воды в конденсаторе получает

$$\Delta i = i_{H_2O1} - i_{H_2O2} = 2801 - 121,4 = 2679,6 \text{ кДж/кг.}$$

Количество воды, которое может быть пропущено через ртутный конденсатор, определяется из уравнения

$$D_{0Hg} (i_{Hg2} - i_{Hgк}) = D_{0H_2O} \Delta i.$$

Подставляя в это уравнение соответствующие значения, получаем

$$D_{0H_2O} = \frac{357\,000 (259,5 - 34,5)}{2679,6} = 29\,970 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, на 1 кг водяного пара приходится ртутного пара

$$\frac{357\,000}{29\,970} = 11,9 \text{ кг.}$$

Для пароводяной турбины, пользуясь диаграммой  $i_s$  и таблицами водяного пара, получаем

$$i_1 = 3329 \text{ кДж/кг; } i_2 = 2093 \text{ кДж/кг;}$$

$$i_2 = 121,4 \text{ кДж/кг.}$$

Полезная работа 1 кг водяного пара

$$l_{0H,O} = 3329 - 2093 = 1235 \text{ кДж/кг.}$$

Полезная работа 11,9 кг ртутного пара

$$L_{0Hg} = 11,9 l_{0Hg} = 11,9 \cdot 101 = 1202 \text{ кДж.}$$

Полезная работа обоих рабочих тел в цикле на 1 кг водяного пара

$$l_0 = l_{0H,O} + L_{0Hg} = 1235 + 1202 = 2437 \text{ кДж/кг.}$$

Подведенная теплота на цикл:  
для подогрева и испарения 11,9 кг ртути

$$11,9 (360,5 - 34,5) = 3879 \text{ кДж;}$$

для перегрева водяного пара

$$3329 - 2801 = 528 \text{ кДж.}$$

- Всего подведенной теплоты на цикл

$$3879 + 528 = 4407 \text{ кДж.}$$

Термический к. п. д. бинарного цикла

$$\eta_{тс} = \frac{2437}{4407} = 0,553.$$

Термический к. п. д. цикла Ренкина для водяного пара

$$\eta_{тн,O} = \frac{1235}{3329 - 121,4} = 0,385.$$

Улучшение термического к. п. д. от введения добавочного ртутного цикла

$$\frac{\Delta \eta}{\eta_t} 100 = \frac{(0,553 - 0,385) 100}{0,385} = 43,6\%$$

Мощность пароводяной турбины

$$N_{H_2O} = \frac{D_{0H_2O} l_{0H_2O}}{860} = \frac{357\,000 \cdot 1235}{3600} = 12\,260 \text{ кВт.}$$

Суммарная мощность установки

$$N = N_{Hg} + N_{H_2O} = 10\,000 + 12\,260 = 22\,260 \text{ кВт.}$$

450. Пароводяная установка мощностью 5000 кВт работает по циклу Ренкина. Начальные параметры:  $p_1 = 3$  МПа и  $t_1 = 450^\circ \text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  МПа.

Определить к. п. д. цикла, если к нему присоединить ртутный цикл, высший температурный предел которого будет таким же, как и у цикла с водяным паром.

$$\text{Отв. } \eta_{t6} = 53,8\%; \quad \eta_{tH_2O} = 37,8\%; \\ \frac{\Delta \eta}{\eta_{tH_2O}} 100 = 42,3\%.$$

## Глава XII

### ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Холодильные установки служат для искусственного охлаждения тел ниже температуры окружающей среды. Рабочее тело в холодильных машинах совершает обратный круговой процесс, в котором в противоположность прямому циклу затрачивается работа извне и отнимается теплота от охлаждаемого тела.

Идеальным циклом холодильных машин является обратный цикл Карно (рис. 105). В результате осуществления этого цикла затрачивается работа  $l_0$  и тепло  $q$  от холодного тела переносится к более нагретому телу.

Отношение отведенной от охлаждаемого тела теплоты  $q_0$  (произведенного холода) к затраченной работе  $q - q_0$  носит название *холодильного коэффициента* и является характеристикой экономичности холодильной машины:

$$\epsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_0}{l_0}. \quad (262)$$

Очевидно, максимальное значение холодильного коэффициента при заданном температурном интервале равно холодильному коэффициенту обратного цикла Карно, т. е.

$$\epsilon_k = \frac{T}{T - T_0}. \quad (263)$$

Отношение  $\frac{\epsilon}{\epsilon_k}$  характеризует степень термодинамического совершенства применяемого цикла.

В качестве холодильных агентов применяют *воздух* и *жидкости с низкими температурами кипения*: ам-

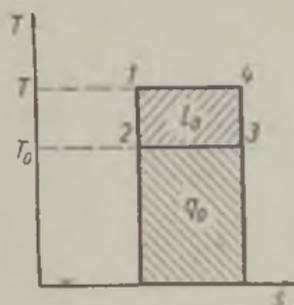


Рис. 105

миак, углекислоту, сернистый ангидрид и в последнее время фреоны (галондные производные насыщенных углеводородов).

### ЦИКЛ ВОЗДУШНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 106 дана схема воздушной холодильной установки: охлаждаемое помещение 1, или *холодильная камера*, в которой по трубам циркулирует охлажденный воздух; *компрессор* 2, всасывающий этот воздух и сжимающий его; *охладитель* 3, в котором охлаждается сжатый в компрессоре воздух; *расширительный цилиндр* 4, в ко-

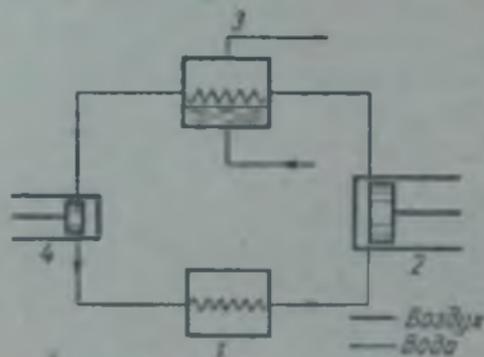


Рис. 106

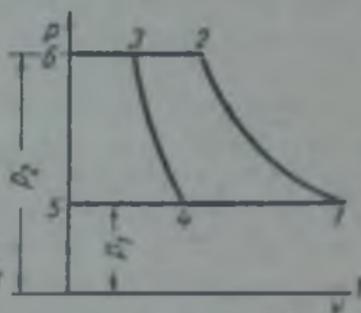


Рис. 107

тором воздух расширяется, совершая при этом работу и понижая свою температуру. Из расширительного цилиндра холодный воздух направляют в холодильную камеру, где он, отнимая теплоту от охлаждаемых тел, нагревается и вновь поступает в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

На рис. 107 дан теоретический цикл воздушной холодильной установки в диаграмме  $pv$ . Точка 1 характеризует состояние воздуха, поступающего в компрессор; линия 1—2 — процесс адиабатного сжатия в компрессоре; точка 2 — состояние воздуха, поступающего в охладитель; точка 3 — состояние воздуха, поступающего в расширительный цилиндр; линия 3—4 — адиабатный процесс расширения; точка 4 — состояние воздуха, поступающего в холодильную камеру (охлаждаемое помещение), и линия 4—1 — процесс нагревания воздуха в этой камере. Площадь 1—2—6—5—1 измеряет работу, затраченную компрессорами на сжатие, а площадь 3—6—5—4—3 представляет собой работу, полученную в расшири-

тельном цилиндре. Следовательно, затрата работы в теоретическом цикле воздушной холодильной установки измеряется площадью  $1-2-3-4$ , а количество теплоты, отнятой от охлаждаемых тел, равно количеству теплоты, воспринятой воздухом в процессе  $4-1$ . Этот же цикл в диаграмме  $Ts$  изображен на рис. 108. Площадь, лежащая под кривой  $4-1$ , соответствует количеству теплоты  $q_0$ , отведенной от охлаждаемых тел; площадь, лежащая под кривой  $4-1$ , соответствует количеству теплоты, переданной охлаждающей воде в охладителе, а площадь  $1-2-3-4-1$  — работе, затраченной в цикле.

Холодопроизводительность 1 кг воздуха  $q_0$  определяется из уравнения

$$q_0 = i_1 - i_4 = c_{pm} (T_1 - T_4), \quad (264)$$

где  $T_1$  — температура воздуха, выходящего из холодильной камеры и поступающего в компрессор;

$T_4$  — температура воздуха, входящего в холодильную камеру;

$c_{pm}$  — средняя массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Работа, затраченная компрессором,

$$l_k = i_2 - i_1 = c_{pm} (T_2 - T_1), \quad (265)$$

где  $T_2$  — температура воздуха после его сжатия в компрессоре.

Работа, полученная в расширительном цилиндре,

$$l_{p.ц} = i_3 - i_4 = c_{pm} (T_3 - T_4), \quad (266)$$

где  $T_3$  — температура воздуха перед расширительным цилиндром.

Работа, затраченная в цикле, определяется по уравнению

$$l_0 = l_k - l_{p.ц}. \quad (267)$$

Расход холодильного агента

$$M = \frac{Q_0}{q_0} \text{ кг/с}, \quad (268)$$

где  $Q_0$  и  $q_0$  — соответственно холодопроизводительность установки и холодопроизводительность 1 кг воздуха в кдж/с и кдж/кг (или в ккал/с и ккал/кг).

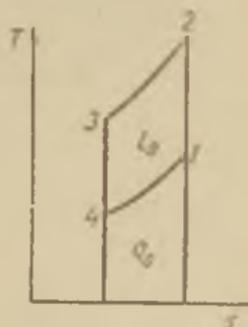


Рис. 108

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_0}{l_0} = \frac{T_3}{T_2 - T_1} = \frac{T_4}{T_3 - T_4} \quad (269)$$

Холодильный коэффициент можно выразить также в функции отношения конечного и начального давлений в компрессоре:

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} = \frac{1}{\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (270)$$

Теоретическая мощность, необходимая для привода компрессора,

$$N_{\text{теор}} = M l_0 \text{ кВт}, \quad (271)$$

если  $l_0$  выражено в кДж/кг.

Основным недостатком воздуха как холодильного агента является его малая теплоемкость, а следовательно, и малое количество теплоты, отнимаемой от охлаждаемого тела одним килограммом агента. Вследствие этого, а также других причин воздушные холодильные установки в настоящее время не имеют широкого распространения.

### ЦИКЛ ПАРОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема паровой компрессорной холодильной установки дана на рис. 109. Насыщенный пар аммиака (или другого рабочего тела) при температуре, близкой к температуре охлаждаемого помещения 1,

всасывается компрессором 2 и адиабатно сжимается. Из компрессора пар аммиака поступает в конденсатор 3, где при постоянном давлении он конденсируется вследствие отнятия у него теплоты охлаждающей водой. Полученный жидкий аммиак поступает в *редукционный вентиль* 4, в котором происходит

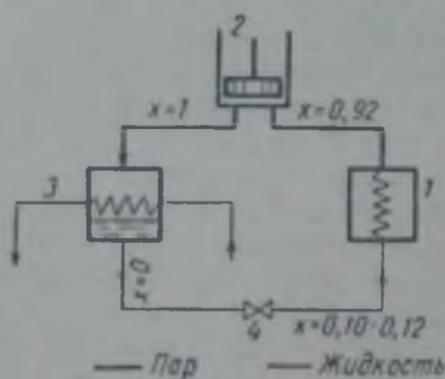


Рис. 109

его дросселирование, сопровождаемое падением давления и температуры. При этом аммиак частично испаряется.

Полученный весьма влажный насыщенный пар (степень сухости  $x$  обычно находится в пределах 0,01—0,15) с низкой температурой и является *хладоносителем*. Его направляют в трубы охлаждаемого помещения, где за счет теплоты, отбираемой от охлаждаемых тел, степень сухости его увеличивается, и он снова направляется в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

На практике применяют паровые компрессорные установки с *промежуточным теплоносителем*. В качестве

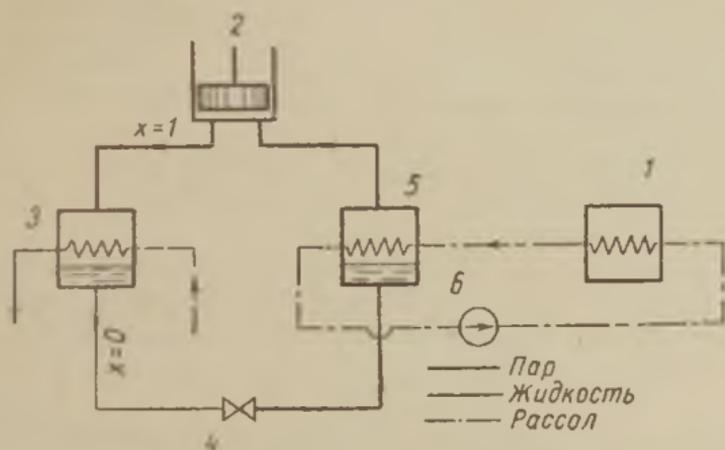


Рис. 110

такого теплоносителя применяют рассолы, т. е. растворы в воде различных солей, главным образом поваренной соли  $\text{NaCl}$ , хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$  и хлористого магния  $\text{MgCl}_2$ , не замерзающие при низких температурах. В этом случае в схему установки, изображенной на рис. 109, вводится дополнительно *испаритель 5*, в который направляется влажный пар аммиака после редукционного вентиля (рис. 110). В испарителе аммиак испаряется, отнимая теплоту от рассола. Охлажденный рассол при помощи насоса *б* направляется в охлаждаемое помещение *1*, в котором он нагревается вследствие отнятия теплоты от тел, подлежащих охлаждению, и возвращается в испаритель, где он снова отдает теплоту пару аммиака, поступающему в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

На рис. 111 в диаграмме  $Ts$  дан цикл изменения состояния 1 кг аммиака в паровой компрессорной установке с промежуточным теплоносителем. Точка *1* характеризует состояние пара аммиака при входе его в компрессор,

линия 1—2 — процесс адиабатного сжатия в компрессоре, точка 3 — состояние жидкого аммиака перед входом его в редуцирующий вентиль, в котором он подвергается дросселированию. Так как этот процесс характеризуется равенством значений энтальпий в начальном и конечном состояниях, то в точке 4, соответствующей состоянию аммиака после дросселирования, последний имеет ту же энтальпию, что и в точке 3. Линия 4—1 соответствует процессу парообразования в испарителе.

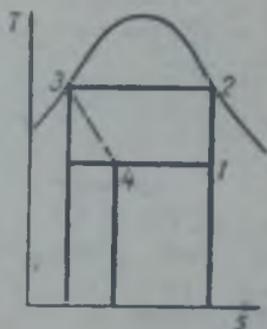


Рис. 111

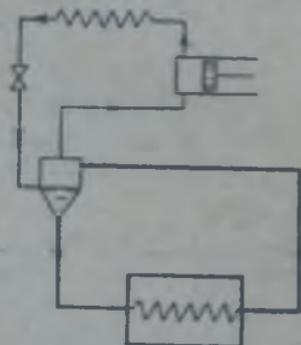


Рис. 112

В зависимости от того, какой пар всасывается компрессором (сухой или влажный), процесс в холодильных машинах называют *сухим* или *влажным*. При сухом процессе в испарителе получается сухой насыщенный пар. Чтобы обеспечить поступление в компрессор сухого пара, холодильную установку снабжают *отделителем* жидкости, или *сепаратором*, через который жидкость возвращается в испаритель. Схема такой установки дана на рис. 112.

*Затрата работы* в компрессоре при адиабатном сжатии определяют по формуле

$$l_k = i_2 - i_1. \quad (272)$$

*Холодопроизводительность* 1 кг холодильного агента

$$q_0 = i_1 - i_3 = r(x_1 - x_4), \quad (273)$$

где  $r$  — теплота парообразования, а  $x_1$  и  $x_4$  — соответственно степень сухости пара после испарителя и после редуцирующего вентиля.

*Тепловая нагрузка конденсатора* определяется по формуле

$$q = q_0 + l_0 = i_2 - i_3. \quad (274)$$

Количество холодильного агента и теоретическую мощность, подводимую к компрессору, определяют по формулам (268) и (271).

Из цикла паровой компрессорной установки, изображенной на рис. 113, видно, что замена расширительного цилиндра редукционным вентилем обуславливает некоторую потерю холодопроизводительности, которая может быть частично уменьшена путем *переохлаждения* жидкости ниже температуры конденсации. Это видно на рис. 113, где изображен цикл паровой компрессорной холодильной установки с переохлаждением конденсата до температуры  $t_5$ , лежащей ниже температуры конденсации  $t_4$ .

Данные о насыщенных парах аммиака и углекислоты приведены в табл. XVII и XVIII (см. приложения).

При решении задач, связанных с холодильными процессами, весьма удобно пользоваться энтропийными диа-

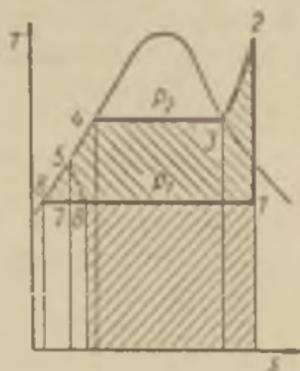


Рис. 113

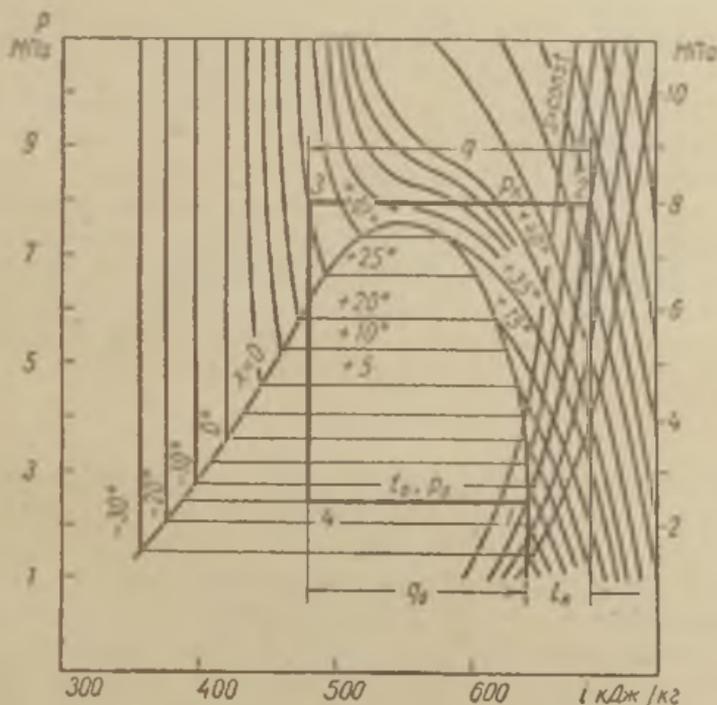


Рис. 114

граммами, помещенными в специальных курсах холодильных установок.

Весьма удобной является также диаграмма  $i\rho$  (см. рис. 114). На ней по оси абсцисс отложены энтальпии, а по оси ординат — давления. Для лучшего использования площади диаграммы давления нанесены в логарифмической шкале ( $\bar{i} - \lg p$ ). На диаграмме нанесены также пограничные кривые, кривые равной сухости пара, изотермы, изохоры и кривые постоянной энтропии.

Диаграмма  $i\rho$  позволяет быстро находить параметры пара и дает возможность определять в виде отрезков прямых характеристики рабочего процесса холодильных установок: холодопроизводительность, тепловую нагрузку конденсатора и теоретическую затрату работы в компрессоре.

На рис. 114 дана диаграмма  $i\rho$  для углекислоты с изображением цикла холодильной установки. Точка 1 характеризует состояние сухого насыщенного пара на выходе из испарителя и перед поступлением его в компрессор, линия 1—2 — процесс адиабатного сжатия в компрессоре ( $s = \text{const}$ ), точка 2 — состояние сжатой углекислоты, линия 2—3 — процесс отдачи теплоты ( $q$ ) в конденсаторе при постоянном давлении. Процесс дросселирования в редукционном вентиле можно условно представить вертикалью 3—4, а процесс испарения углекислоты — линией 4—1.

Холодопроизводительность  $q_0$  измеряется отрезком 1—4 ( $i_1 - i_4$ ), тепловая нагрузка конденсатора  $q$  — отрезком 2—3 ( $i_2 - i_3$ ), а теоретическая затрата работы в компрессоре  $l_k$  измеряется разностью энтальпий в точках 2—1. Все указанные величины относятся к 1 кг углекислоты.

### Задачи

451. В компрессор воздушной холодильной установки поступает воздух из холодильной камеры давлением  $p_1 = 0,1$  МПа и температурой  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ . Адиабатно сжатый в компрессоре воздух до давления  $p_2 = 0,5$  МПа направляется в охладитель, где он при  $p = \text{const}$  снижает свою температуру до  $t_3 = +10^\circ\text{C}$ . Отсюда воздух поступает в расширительный цилиндр, где расширяется по адиабате до первоначального давления, после чего возвращается в холодильную камеру. Отнимая теплоту

от охлаждаемых тел, воздух нагревается до  $t_1 = -10^\circ \text{C}$  и вновь поступает в компрессор.

Определить температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру, теоретическую работу, затрачиваемую в цикле, холодопроизводительность воздуха и холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур.

### Решение

Рассматриваемый цикл холодильной установки изображен в диаграммах  $p-v$  и  $T-s$  на рис. 115 и 116. Температуру

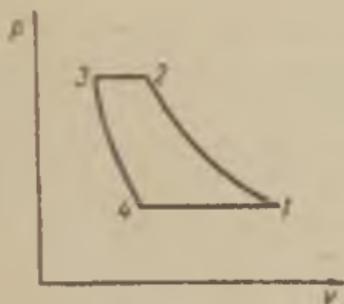


Рис. 115

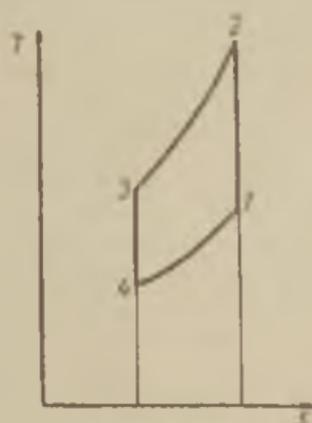


Рис. 116

ратуру  $T_4$  воздуха, поступающего в холодильную камеру, определяем из соотношения параметров адиабатного процесса 3—4:

$$\begin{aligned} T_4 &= T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_3 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \\ &= 283 \left( \frac{0,1}{0,5} \right)^{0,286} = \frac{283}{1,583} = 179 \text{ K.} \end{aligned}$$

Температуру  $T_2$  сжатого воздуха, выходящего из компрессора, определяем из соотношения параметров процесса 1—2:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 263 \cdot 5^{0,286} = 263 \cdot 1,583 = 416 \text{ K.}$$

Работа, затраченная в цикле, равна разности работ: затраченной в компрессоре и полученной в расширительном цилиндре.

Работу затраченную в компрессоре, определяем по формуле (265):

$$l_k = c_{pm} (T_2 - T_1) = 1,012 (416 - 263) = \\ = 154,8 \text{ кДж/кг (37 ккал/кг).}$$

Работу, полученную в расширительном цилиндре, находим по формуле (266):

$$l_{p.ц} = c_{pm} (T_3 - T_4) = 1,012 (283 - 179) = \\ = 105,2 \text{ кДж/кг (25,1 ккал/кг).}$$

Следовательно, работа цикла

$$l_0 = l_k - l_{p.ц} = 154,8 - 105,2 = \\ = 49,6 \text{ кДж/кг (11,8 ккал/кг).}$$

Удельная холодопроизводительность воздуха по формуле (264)

$$q_0 = c_{pm} (T_1 - T_4) = 1,012 (263 - 179) = \\ = 85 \text{ кДж/кг (20,3 ккал/кг).}$$

Холодильный коэффициент установки

$$\epsilon = \frac{q_0}{l_0} = \frac{85}{49,6} = 1,71.$$

Холодильный коэффициент установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур:

$$\epsilon_k = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{263}{283 - 263} = \frac{263}{20} = 13,15.$$

452. Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность  $Q = 837$  МДж/ч. Состояние воздуха, всасываемого компрессором, характеризуется давлением  $p_1 = 0,1$  МПа и температурой  $t_1 = -10^\circ \text{C}$ . Давление воздуха после сжатия  $p_2 = 0,4$  МПа. Температура воздуха, поступающего в расширительный цилиндр, равна  $20^\circ \text{C}$ .

Определить теоретическую мощность двигателя компрессора и расширительного цилиндра, холодильный

коэффициент установки, расход холодильного агента (воздуха), а также количество теплоты, передаваемой охлаждающей воде.

$$\text{Отв. } N_{\text{дв}} = 114 \text{ кВт}; N_{\text{х}} = 452 \text{ кВт}; \\ N_{\text{р.ц.}} = 338 \text{ кВт}; \varepsilon = 2,04; M_{\text{в}} = \\ = 12\,650 \text{ кг/ч}; Q = 1246 \text{ МДж/ч.}$$

453. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки  $Q = 83,7$  МДж/ч.

Определить ее холодильный коэффициент и потребную теоретическую мощность двигателя, если известно, что максимальное давление воздуха в установке  $p_2 = 0,5$  МПа, минимальное давление  $p_1 = 0,11$  МПа, температура воздуха в начале сжатия  $t_1 = 0^\circ \text{C}$ , а при выходе из охладителя  $t_3 = 20^\circ \text{C}$ . Сжатие и расширение воздуха принять политропным с показателем политропы  $m = 1,28$ .

$$\text{Отв. } \varepsilon = 2,56; N_{\text{дв}} = 9,3 \text{ кВт.}$$

454. На рис. 117 представлена схема, а на рис. 118 изображен цикл паровой компрессорной холодильной установки. Пар аммиака при температуре  $t_1 = -10^\circ \text{C}$  поступает в компрессор  $B$ , где адиабатно сжимается

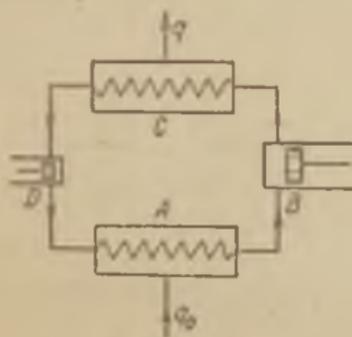


Рис. 117

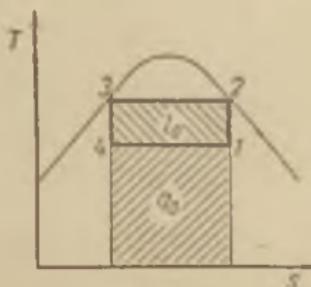


Рис. 118

до давления, при котором его температура  $t_2 = 20^\circ \text{C}$ , а сухость пара  $x_2 = 1$ . Из компрессора аммиак поступает в конденсатор  $C$ , где при постоянном давлении обращается в жидкость ( $x_3 = 0$ ), после чего в особом расширительном цилиндре  $D$  адиабатно расширяется до температуры  $t_4 = -10^\circ \text{C}$ ; при этой же температуре аммиак поступает в охлаждаемое помещение  $A$ , где, забирая теплоту от охлаждаемых тел, он испаряется, образуя влажный пар со степенью сухости  $x_1$ .

Определить холодопроизводительность аммиака, тепловую нагрузку конденсатора, работу, затраченную в цикле, и холодильный коэффициент.

### Решение

Холодопроизводительность аммиака, т. е. количество теплоты, поглощаемой 1 кг аммиака в охлаждаемом помещении, по уравнению (273)

$$q_0 = i_1 - i_4 = r(x_1 - x_4).$$

По табл. XVII при  $t_1 = -10^\circ \text{C}$

$$r_1 = 1296,6 \text{ кДж/кг.}$$

Значения  $x_1$  и  $x_4$  определяем или при помощи диаграммы  $Ts$ , или аналитически. В последнем случае используем постоянство энтропии в обратимом адиабатном процессе. Следовательно, в процессе 1—2

$$s_2 = s_1 = s_1' + (s_1'' + s_1')x_1;$$

По табл. XVII находим

$$s_1' = 4,0164 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}; \quad s_1'' = 8,9438 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$s_2 = s_2' = 8,5658 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Тогда

$$x_1 = \frac{s_2 - s_1'}{s_1'' - s_1'} = \frac{8,5658 - 4,0164}{8,9438 - 4,0164} = \frac{4,5494}{4,9174} = 0,925.$$

Точно таким же образом определяем  $x_4$ :

$$x_4 = \frac{s_3 - s_1'}{s_1'' - s_1'} = \frac{4,5155 - 4,0164}{8,9438 - 4,0164} = \frac{0,4991}{4,9174} = 0,1015.$$

Следовательно,

$$q_0 = 1296,6 (0,925 - 0,1015) = 1067,8 \text{ кДж/кг.}$$

Тепловая нагрузка конденсатора, т. е. количество теплоты, отводимой с охлаждающей водой, по уравнению (274)

$$q = i_2 - i_3 = r_2.$$

По табл. XVII при  $t = 20^\circ \text{C}$   $r_2 = 1186,9$  кДж/кг и, следовательно,

$$q = 1186,9 \text{ кДж/кг.}$$

Работа, затраченная в цикле,

$$l_0 = q - q_0 = 1186,9 - 1067,8 = 119,1 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_0} = \frac{1067,8}{119,1} = 8,96.$$

455. В схеме аммиачной холодильной установки, приведенной в предыдущей задаче, расширительный цилиндр заменяется редукционным вентилем. Новая схема представлена на рис. 109. В остальном все условия предыдущей задачи сохраняются.

Определить новое значение холодильного коэффициента  $\varepsilon'$  и сравнить его с  $\varepsilon$  для схемы с расширительным цилиндром.

$$\text{Отв. } \varepsilon' = 8,17; \quad \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = 0,927.$$

456. Компрессор аммиачной холодильной установки всасывает пар аммиака при температуре  $t_1 = -10^\circ \text{C}$  и степени сухости  $x_1 = 0,92$  и сжимает его адиабатно до давления, при котором его температура  $t_2 = 20^\circ \text{C}$  и степень сухости  $x_2 = 1$ . Из компрессора пар аммиака поступает в конденсатор, в котором охлаждающая вода имеет на входе температуру  $t'_в = 12^\circ \text{C}$ , а на выходе  $t''_в = 20^\circ \text{C}$ .

В редукционном (регулирующем) вентиле жидкий аммиак подвергается дросселированию до 0,3 МПа, после чего он направляется в испаритель, из которого выходит со степенью сухости  $x = 0,92$  и снова поступает в компрессор. Теплота, необходимая для испарения аммиака, заимствуется из рассола, имеющего на входе в испаритель температуру  $t'_р = -2^\circ \text{C}$ , а на выходе из него температуру  $t''_р = -5^\circ \text{C}$ .

Определить теоретическую мощность двигателя холодильной машины и часовой расход аммиака, рассола и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки  $Q_0 = 58,15 \text{ кДж/с}$ . Теплоемкость рассола принять равной  $4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ .

### Решение

Условный цикл аммиачной холодильной установки для данных, указанных в задаче, показан на рис. 111.

Работа, затраченная на компрессор, по уравнению (272)

$$l_k = i_2 - i_1.$$

Энтальпия пара, выходящего из компрессора, поскольку он является сухим насыщенным, определяется непосредственно по табл. XVII насыщенного пара аммиака:

$$i_2 = i'' = 1699,4 \text{ кДж/кг}; \quad r_2 = 1186,9 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия влажного пара, всасываемого компрессором, определяется по формуле для влажного пара

$$i_1 = i_x = i_1' + r_1 x.$$

По табл. XVII находим

$$i_1' = 372,6 \text{ кДж/кг}; \quad r_1 = 1296,6 \text{ кДж/кг};$$

откуда

$$i_1 = 372,6 + 1296,6 \cdot 0,92 = 1565,5 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, работа, затраченная на привод компрессора,

$$l_k = i_2 - i_1 = 1699,4 - 1565,6 = 133,8 \text{ кДж/кг}.$$

Для определения мощности двигателя холодильной машины необходимо знать количество холодильного агента (аммиака), всасываемого компрессором. Оно определяется из уравнения (268):

$$M_a = \frac{Q_0}{q_0}.$$

Холодопроизводительность  $Q_0$  аммиачной машины известна, а величина  $q_0$  определяется по формуле (273):

$$q_0 = i_1 - i_4.$$

Так как процесс дросселирования (линия 3—4) характеризуется равенством начального и конечного значений энтальпии, то

$$i_4 = i_3 = i_2' = 512,5 \text{ кДж/с}.$$

Следовательно,

$$q_0 = 1565,5 - 512,5 = 1053 \text{ кДж/кг}.$$

Количество холодильного агента (аммиака)

$$M_a = \frac{58,15}{1053} = 0,0552 \text{ кг/с}.$$

Таким образом, теоретическая мощность двигателя по формуле (271)

$$N_{\text{теор}} = M l_0 = 0,0552 \cdot 133,8 = 7,39 \text{ кДж/с} = 7,39 \text{ кВт.}$$

Потребное количество рассола по уравнению

$$M_p = c (i_p' - i_p'')$$

при  $c = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$$M_p = \frac{58,15}{4,19 [-2 - (-5)]} = 4,626 \text{ кг/с.}$$



Рис. 119

Необходимое количество охлаждающей воды определяем из уравнения

$$M_w = \frac{M_{ar}}{c (i_w'' - i_w')} = \frac{0,0552 \cdot 1186,9}{4,19 (20 - 12)} = 1,96 \text{ кг/с.}$$

457. В диаграмме  $Ts$  для аммиака даны точки 1 и 5 (рис. 119).

Определить значения давлений изобар, проходящих через эти точки.

### Решение

Точки 1 и 5 характеризуют состояние перегретого пара и принадлежат изобарам. Но изотермы 2—3 и 6—7 одновременно являются также изобарами. Поэтому значения давлений этих изобар определяются точками пересечений горизонтальной части этих изобар с кривой  $t_c = f(p)$  — соответственно точки 4 и 8. Проектируя эти точки на ось абсцисс, получаем значения давлений изобар 1—2—3 и 5—6—7.

458. Аммиачная холодильная машина работает при температуре испарения  $t_1 = -10^\circ \text{С}$ . Пар из испарителя выходит сухим насыщенным. Температура конденсации пара  $t_2 = 20^\circ \text{С}$ . Температура сконденсированного аммиака понижается вследствие дросселирования.

Определить холодильный коэффициент. Представить цикл в диаграммах  $p-v$  и  $Ts$ . Задачу решить при помощи диаграммы  $Ts$ .

Отв.  $\epsilon = 7,5$ .

459. Теоретическая мощность аммиачного компрессора холодильной установки составляет 50 кВт. Температура испарения аммиака  $t_1 = -5^\circ \text{C}$ . Из компрессора пар аммиака выходит сухим насыщенным при температуре  $t_2 = 25^\circ \text{C}$ . Температура жидкого аммиака понижается в редукционном вентиле.

Определить холодопроизводительность 1 кг аммиака и часовую холодопроизводительность всей установки.

$$\text{Отв. } q_0 = 1040 \text{ кДж/ч; } Q = 1474 \text{ МДж/ч.}$$

460. Компрессор углекислотной холодильной установки всасывает сухой пар и сжимает его по адиабате. Температура испарения углекислоты  $t_1 = -10^\circ \text{C}$ , а температура конденсации  $t_2 = 20^\circ \text{C}$ . После конденсации жидкая углекислота расширяется в редукционном вентиле.

Определить тепловую нагрузку конденсатора, если холодопроизводительность углекислотной установки равна 419 МДж/ч. Представить цикл в диаграмме  $Ts$ .

$$\text{Отв. } Q = 52,34 \text{ МДж/ч.}$$

461. В углекислотной холодильной установке с регулирующим вентилем компрессор всасывает сухой пар и сжимает его по адиабате так, что его энтальпия становится равной 700 кДж/кг. Температура испарения углекислоты  $t_1 = -20^\circ \text{C}$ , а температура ее конденсации  $t_2 = 20^\circ \text{C}$ .

Определить часовой расход углекислого газа и теоретическую мощность двигателя, если холодопроизводительность установки  $Q = 502,4 \text{ МДж/ч}$ .

$$\text{Отв. } M_a = 2810 \text{ кг/ч; } N_{\text{теор}} = 35 \text{ кВт.}$$

462. Аммиачная холодильная установка производительностью  $Q_0 = 116,3 \text{ кДж/с}$  работает при температуре испарения  $t_1 = -15^\circ \text{C}$ . Пар из испарителя выходит сухим насыщенным. Температура конденсации  $t_2 = 30^\circ \text{C}$ , причем конденсат переохлажден до  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Определить холодильный коэффициент теоретического цикла, часовой расход аммиака и теоретическую мощность двигателя холодильной машины. Задачу решить, пользуясь диаграммой  $i = \lg p$ .

## Р е ш е н и е

Состояние пара аммиака, поступающего из испарителя в компрессор, определяется в диаграмме  $i - \lg p$  пересечением изобары  $p = 0,24$  МПа, соответствующей температуре насыщения аммиака  $t_1 = -15^\circ \text{C}$ , с кривой насыщения (рис. 120). Адиабатный процесс сжатия аммиака в компрессоре изобразится линией  $1-2$  ( $s = \text{const}$ ), причем точка 2 получается в пересечении этой

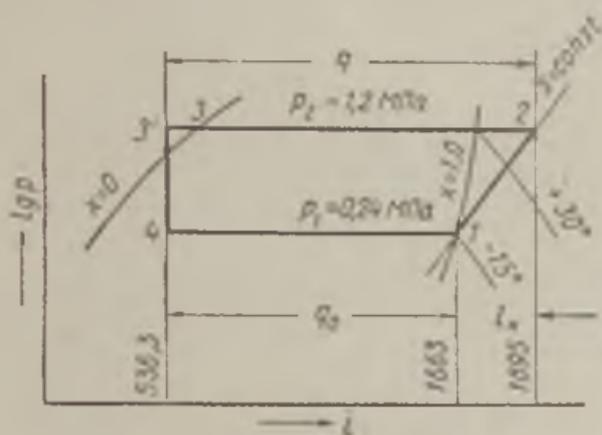


Рис. 120

линии с изобарой  $p_2 = 1,2$  МПа, соответствующей температуре насыщения аммиака  $t_2 = 30^\circ \text{C}$ .

Процесс конденсации изобразится линией  $2-3$ , а процесс переохлаждения — линией  $3-3'$ . Процесс дросселирования условно изобразится линией  $3'-4$ .

Из диаграммы  $i - \lg p$  получаем

$$i_1 = i_1' = 1662,6 \text{ кДж/кг}; \quad i_2 = 1895 \text{ кДж/кг};$$

$$i_3 = 536,3 \text{ кДж/кг};$$

$$i_4 = i_3' = 536,3 \text{ кДж/кг}.$$

Холодопроизводительность 1 кг аммиака определяем по формуле (273):

$$q_0 = i_1 - i_4 = 1662,6 - 536,3 = 1126,3 \text{ кДж/кг}.$$

Часовой расход аммиака по формуле (268)

$$M_a = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{116,3}{1126,3} = 0,1033 \text{ кг/с.}$$

Теоретическая затрата работы в компрессоре по уравнению (272)

$$l_0 = i_2 - i_1 = 1895 - 1662,2 = 232,8 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильный коэффициент находим по формуле (262):

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_0} = \frac{1126,3}{232,4} = 4,85.$$

Теоретическая мощность двигателя холодильной машины по уравнению (271)

$$N_{\text{теор}} = M_a l_0 = 0,1033 \cdot 232,8 = 24 \text{ кВт.}$$

**463.** Из испарителя аммиачной холодильной установки пар выходит сухим насыщенным при температуре  $t_1 = -20^\circ \text{C}$ . Температура адиабатно сжатого пара аммиака  $t_2 = 25^\circ \text{C}$ . Пройдя через конденсатор и переохладитель, пар превращается в жидкий аммиак с температурой  $t = 15^\circ \text{C}$ .

Принимая производительность холодильной установки  $Q_0 = 290,7 \text{ кДж/с}$ , провести сравнение данной установки с установкой, работающей без переохлаждения, определив для них холодопроизводительность 1 кг аммиака, часовое количество аммиака, холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной машины. Задачу решить, пользуясь диаграммой  $i - \lg p$ .

$$\begin{aligned} \text{Отв. 1. } q &= 1167,3 \text{ кДж/кг; } M_a = \\ &= 897 \text{ кг/ч; } \varepsilon = 4,36; N_{\text{теор}} = \\ &= 66,7 \text{ кВт. 2. } q_0 = 1119,6 \text{ кДж/кг; } \\ M_a &= 936 \text{ кг/ч; } \varepsilon = 4,57; N_{\text{теор}} = \\ &= 63,7 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

**464.** Аммиачная холодильная установка должна производить 500 кг/ч льда при  $0^\circ \text{C}$  из воды, имеющей температуру  $20^\circ \text{C}$ . Компрессор этой установки всасывает пар аммиака при температуре  $-10^\circ \text{C}$  и степени сухости  $x = 0,98$  и сжимает его адиабатно до давления 1 МПа. Из компрессора пар аммиака поступает в конденсатор, конденсируется в нем, причем жидкий аммиак пере-

охлаждается до  $15^{\circ}\text{C}$ . После дросселирования аммиак поступает в испаритель, где он испаряется при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$  и вновь всасывается компрессором.

Определить часовой расход аммиака, холодопроизводительность установки, количество теплоты, отводимой в конденсаторе охлаждающей водой, степень сухости аммиака в конце дросселирования и теоретическую мощность двигателя для привода компрессора. Представить цикл в диаграмме  $Ts$ . Сравнить значения холодильных коэффициентов данного цикла и цикла Карно, осуществляемого в том же интервале температур. Теплоту плавления льда принять равной  $331\text{ кДж/кг}$ .

$$\begin{aligned} \text{Отв. } M_a &= 181,5 \text{ кг/ч; } Q = \\ &= 58,15 \text{ кДж/с; } Q_{\text{охл. в}} = 66,4 \text{ кДж/с; } \\ x_1 &= 8,95\%; \quad N_{\text{теор}} = 8,26 \text{ кВт; } \varepsilon = \\ &= 7,05; \quad \varepsilon_k = 7,70. \end{aligned}$$

## Глава XIII

### ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

В воздухе всегда содержится то или иное количество влаги в виде водяного пара. Такую смесь сухого воздуха с водяным паром называют влажным воздухом.

Так как обычно расчеты, связанные с влажным воздухом, выполняют при давлениях, близких к атмосферному, и парциальное давление пара в нем невелико, то с достаточной точностью можно применять к влажному пару все формулы, полученные для идеальных газов. Поэтому в дальнейшем принимаем, что влажный воздух подчиняется уравнению состояния идеальных газов

$$pV = MRT,$$

а также закону Дальтона

$$p = p_v + p_n, \quad (275)$$

где  $p$  — давление влажного воздуха;

$p_v$  — парциальное давление сухого воздуха;

$p_n$  — парциальное давление пара.

Величины  $p$ ,  $p_v$  и  $p_n$  измеряются в одних и тех же единицах.

*Абсолютной влажностью воздуха* называют массу водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, или (что то же) плотность пара  $\rho_n$  при его парциальном давлении и температуре воздуха.

Величину

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{\max}}, \quad (276)$$

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*.

Если температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщения водяного пара при давлении

смеси, то  $\rho_{\max}$  будет равна плотности насыщенного пара при данной температуре, т. е.  $\rho_{\text{п}}$ , и значение ее определяется по таблицам насыщенного пара. Если же температура влажного воздуха больше температуры насыщения водяного пара при давлении смеси, то  $\rho_{\max}$  будет равна плотности перегретого водяного пара при температуре и давлении смеси. Значения  $\rho_{\max}$  в этом случае определяют из таблиц для перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть также приближенно найдена из уравнения

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п}}}, \quad (277)$$

где  $p_{\text{п}}$  — давление насыщения водяного пара при температуре смеси (по таблицам насыщенного пара).

Для характеристики влажного воздуха пользуются также понятием влагосодержание, под которым понимают отношение массы влаги (пара) во влажном воздухе к массе сухого воздуха в нем:

$$d = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{в}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}. \quad (278)$$

Величину  $d$  обычно измеряют в г/кг (в граммах влаги на 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе). Выражение (278) можно привести к следующему виду:

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}} \text{ г/кг}. \quad (279)$$

Из этого уравнения следует, что

$$p_{\text{п}} = p \frac{d}{622 + d}. \quad (280)$$

Нетрудно видеть, что парциальное давление водяного пара при данном давлении влажного воздуха является функцией только влагосодержания, и наоборот. Поэтому аналогично уравнениям (279) и (280) можно написать

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}; \quad (281)$$

$$p_{\text{п}} = p \frac{d_{\max}}{622 + d_{\max}}, \quad (282)$$

где  $d_{\max}$  — максимально возможное влагосодержание влажного воздуха (если температура его ниже температуры насыщения водяного пара при давлении смеси).

Отношение влагосодержания  $d$  к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха (при той же температуре и давлении смеси) называют *степенью насыщения* и обозначают через

$$\psi = \frac{d}{d_{\max}}. \quad (283)$$

Из уравнений (280) и (282) получаем зависимость между  $\varphi$  и  $\psi$ :

$$\varphi = \psi \frac{622 + d_{\max}}{622 + d}. \quad (284)$$

Та температура, до которой надо охладить при постоянном давлении влажный воздух, чтобы он стал насыщенным ( $\varphi = 100\%$ ), называется *точкой росы*  $t_p$ . Она, следовательно, может быть определена (по таблицам насыщенного пара) как температура насыщения при парциальном давлении пара.

Плотность влажного воздуха определяется из уравнения

$$\rho = \frac{p}{287T} - 0,0129 \frac{\varphi p_n}{T} \text{ кг/м}^3, \quad (285)$$

где  $p$  и  $p_n$  выражены в Па, а  $T$  — в К.

Энтальпию  $I$  влажного воздуха определяем как сумму энтальпий сухого воздуха и водяного пара. Энтальпию влажного воздуха относят к 1 кг сухого воздуха, т. е. к  $(1 + d)$  кг влажного воздуха. Поэтому

$$I = i_a + i_n d, \quad (286)$$

или

$$I = i_a + \frac{i_n d}{1000}, \quad (287)$$

если  $d$  берем в г/кг.

Энтальпия 1 кг сухого воздуха, выраженная в кДж, численно равна его температуре  $t$  °С, так как теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении равна 1 кДж/(кг·К). Следовательно,

$$i_a = c_p t = 1t \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, с достаточной точностью определяется из формулы

$$i_n = 2500 + 1,93t \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, энтальпия влажного воздуха

$$I = t + 0,001 (2500 + 1,93t) \text{ кДж/кг.} \quad (288)$$

При сушке различных продуктов нагретым воздухом влагосодержание его увеличивается за счет испарения воды. Этот процесс называют адиабатным испарением воды, если теплоту, необходимую для испарения, берем только из окружающего воздуха. Температура воздуха при этом понижается, причем если этот процесс продолжается до полного насыщения воздуха, то температура его понижается до так называемой температуры адиабатного насыщения воздуха, известной также под названием *истинной температуры мокрого термометра*.

На практике для определения относительной влажности воздуха часто пользуются психрометром — прибором, состоящим из двух термометров. Шарик одного из них обернут влажной тканью, вследствие чего показания сухого и мокрого термометров различны. Температура, показываемая мокрым термометром психрометра, не равна истинной температуре мокрого термометра, а всегда несколько выше ее. Объясняется это притоком теплоты через выступающий столбик ртути и восприятием шариком термометра теплоты, излучаемой окружающими предметами.

Истинная температура мокрого термометра  $t_m$  определяется из формулы

$$t_m = t_m^* - \frac{x(t_c - t_m^*)}{1000} \text{ } ^\circ\text{C,} \quad (289)$$

где  $t_m^*$  — показания мокрого термометра;  
 $t_c - t_m^*$  — психрометрическая разность;  
 $x$  — поправка к показанию мокрого термометра в процентах, определяемая из рис. 121.

Отклонение показаний мокрого термометра от истинной температуры мокрого термометра значительно уменьшается, если шарик термометра оmyвается потоком воздуха, имеющим большую скорость, а также если шарик и столбик термометра защищены от восприятия теплоты, отдаваемой окружающими предметами.

Диаграмма  $Id$  влажного воздуха, предложенная проф. Л. К. Рамзиным, весьма удобна для определения параметров влажного воздуха. Она также значительно упрощает решение различных задач, связанных с измене-

нием состояния влажного воздуха и особенно с процессами осушения. В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание  $d$ , а по оси ординат — энтальпия  $I$  влажного воздуха (на 1 кг сухого воздуха). Барометри-

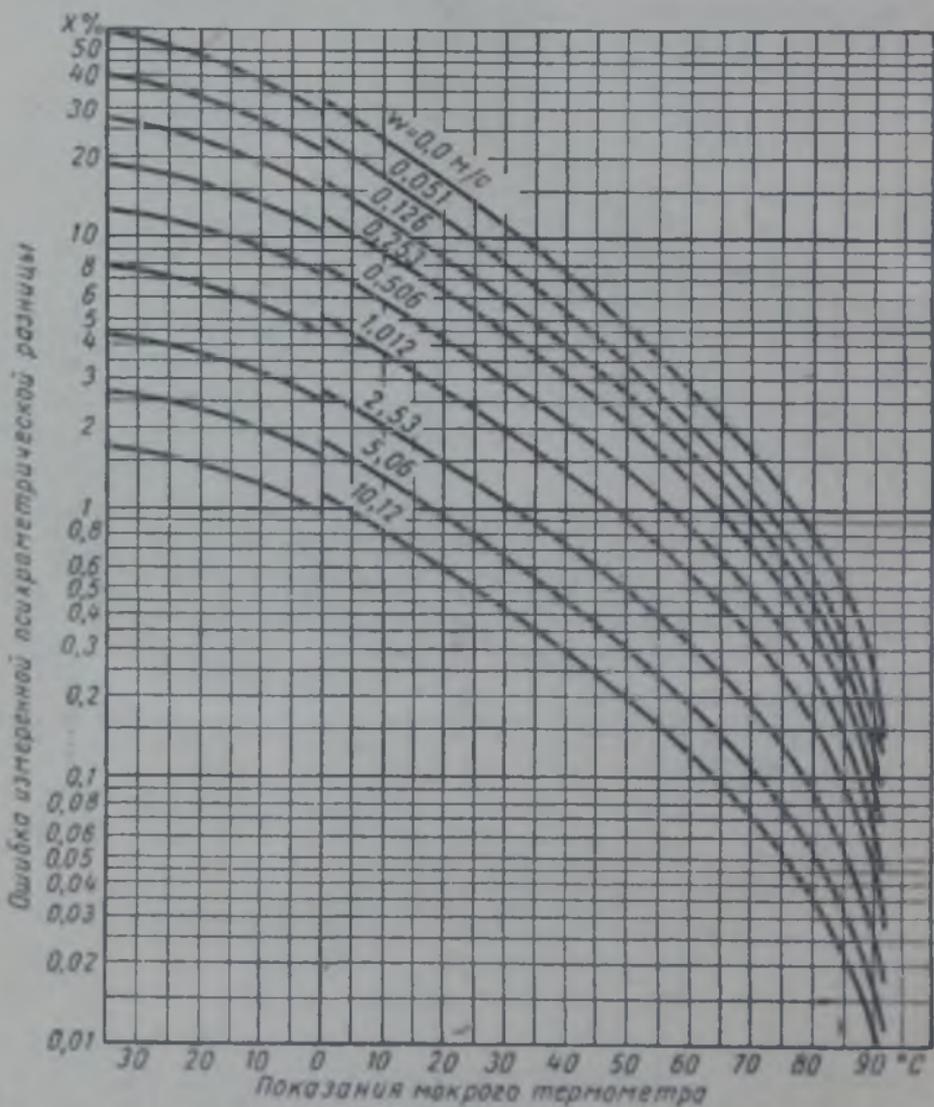


Рис. 121

ческое давление принято  $B = 745$  мм рт. ст. (среднегодовое давление для центральной полосы СССР). Для более удобного расположения отдельных линий на диаграмме координатные оси в ней проведены под углом  $135^\circ$  (рис. 122).

В выполненных диаграммах наклонная ось влагосодержания не вычерчивается, а вместо нее из начала

координат проводится горизонталь, на которую значения  $d$  спроектированы с наклонной оси. Поэтому линии  $I = \text{const}$  идут наклонно, параллельно наклонной оси абсцисс, линии же  $d = \text{const}$  идут вертикально, параллельно оси ординат. В диаграмме  $I-d$  построены также изотермы ( $t = \text{const}$ ), весьма близкие к прямым.

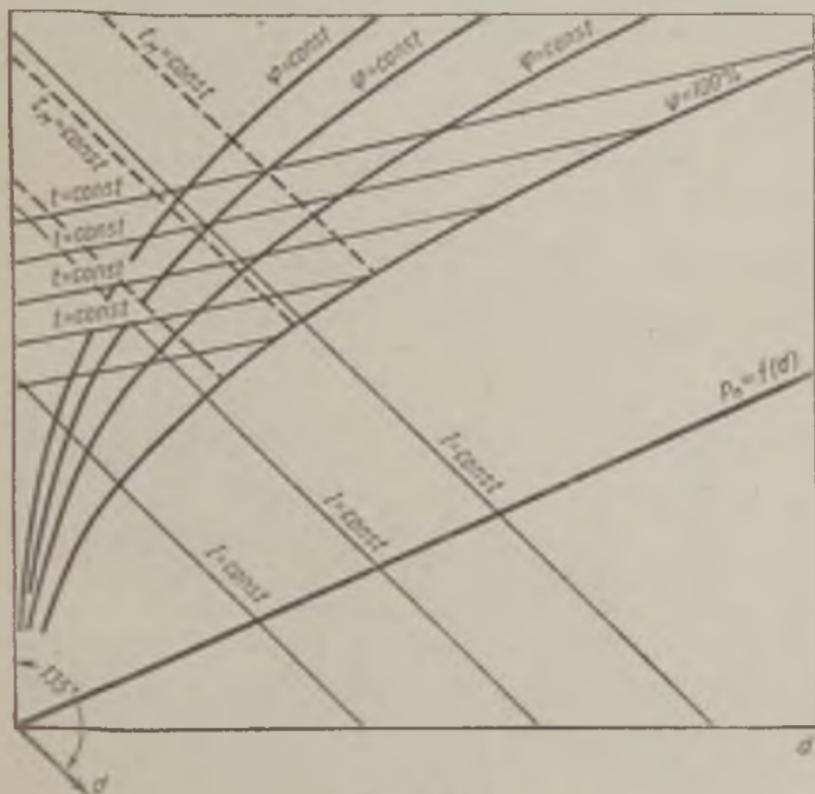


Рис. 122

Кривая  $\varphi = 100\%$  является своего рода пограничной кривой, кривой насыщения. Вся область над линией  $\varphi = 100\%$  соответствует влажному насыщенному воздуху (для различных значений  $\varphi$ ). Область, лежащая под этой линией, характеризует состояние воздуха, насыщенного водяным паром.

Кроме указанных кривых, в последних изданиях диаграмм  $I-d$  приведены также линии постоянных истинных температур мокрого термометра  $t_m$ . Внизу диаграммы построена кривая  $p_n = f(d)$  по формуле (280) в прямоугольной системе координат. По оси ординат отложено парциальное давление в мм рт. ст., а по оси абсцисс — влагосодержание.



ного воздуха (обычно  $\varphi$  и  $t$ ) определить  $I$ ,  $d$  и  $\rho_n$ . По этой диаграмме можно также найти и точку росы. Для этого нужно из точки, характеризующей данное состояние воздуха, провести вертикаль ( $d = \text{const}$ ) до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$ . Изотерма, проходящая через эту точку, определяет температуру точки росы.

Состояние влажного воздуха можно также определить по диаграмме  $Id$ , если известны показания сухого и мокрого термометров психрометра. Внося необходимую поправку в показание мокрого термометра по формуле (289), находим истинную температуру мокрого термометра. Далее из точки, соответствующей относительной влажности  $\varphi = 100\%$  и истинной температуре мокрого термометра, проводят параллельно изотерме  $t_m$  прямую до пересечения с изотермой сухого термометра  $t_c$ . Полученная точка характеризует состояние влажного воздуха.

### Задачи

465. Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем  $p_n = 0,014$  МПа, а температура  $t = 60^\circ \text{C}$ . Барометрическое давление равно 10 325 Па (760 мм рт. ст.).

### Решение

Температуре  $t = 60^\circ \text{C}$  по табл. XIII соответствует давление  $p_n = 0,019917$  МПа. Следовательно, при парциальном давлении  $p_n = 0,014$  МПа пар перегрет. По табл. XV для  $p = 0,014$  МПа и  $t = 60^\circ \text{C}$  имеем

$$v = 10,95 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно, абсолютная влажность

$$\rho_n = \frac{1}{v} = \frac{1}{10,95} = 0,0913 \text{ кг/м}^3.$$

466. Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем  $p = 0,03$  МПа, а температура воздуха  $t = 80^\circ \text{C}$ . Показание барометра  $B = 99\,325$  Па (745 мм рт. ст.).

$$\text{Отв. } \rho_n = 0,185 \text{ кг/м}^3.$$

467. Определить влагосодержание воздуха при температуре  $t = 60^\circ \text{C}$  и барометрическом давлении  $B = 99\,325$  Па (745 мм рт. ст.), если относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ .

## Решение

По формуле (278)

$$d = \frac{p_n}{\rho_v},$$

а так как по уравнению (277)

$$\psi = \frac{p_n}{p_n},$$

то

$$p_n = \psi p_n.$$

$p_n$  определяют по табл. XIII насыщенного водяного пара для температуры  $t = 60^\circ \text{C}$ . Из этой таблицы  $p_n = 0,019917$  МПа и, следовательно,

$$p_n = 0,6 \cdot 0,019917 = 0,012 \text{ МПа.}$$

По таблицам перегретого пара для  $p = 0,012$  МПа и  $t = 60^\circ \text{C}$  находим  $v = 12,78 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Тогда

$$\rho_n = \frac{1}{12,78} = 0,078 \text{ кг/м}^3.$$

Парциальное давление воздуха

$$\begin{aligned} p_v &= p - p_n = 99\,325 - 12\,000 = \\ &= 87\,325 \text{ Па} = 0,0873 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_v = \frac{p_n}{RT} = \frac{0,0873 \cdot 10^6}{287(273 + 60)} = 0,913 \text{ кг/м}^3,$$

поэтому

$$d = \frac{0,078}{0,913} = 0,0854 \text{ кг/кг} = 85,4 \text{ г/кг.}$$

Значение  $d$  можно также определить из формулы (279):

$$d = 622 \cdot \frac{p_n}{p - p_n} = 622 \cdot \frac{0,012}{0,0873} = 85,2 \text{ г/кг.}$$

468. Каково состояние воздуха, если температура его равна  $50^\circ \text{C}$ , а парциальное давление пара в нем  $p_n = 8000$  Па (60 мм рт. ст.).

## Решение

По табл. XIII определяем  $p_n$ . При температуре  $t = 50^\circ \text{C}$

$$p_n = 0,012335 \text{ МПа (93 мм рт. ст.)}$$

Так как

$$p_n = 8000 \text{ Па} < p_n = 12\,335 \text{ Па},$$

то пар воздуха перегрет, а следовательно, воздух при этом не насыщен.

469. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе составляет 0,02 МПа, температура воздуха равна  $70^\circ \text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха.

## Решение

Температуре  $70^\circ \text{C}$  соответствует давление  $p_n = 0,03117 \text{ МПа}$ . Следовательно, при парциальном давлении  $p_n = 0,02 \text{ МПа}$  пар перегрет. Из табл. XV для  $p = 0,02 \text{ МПа}$  и  $t = 70^\circ \text{C}$  получаем

$$v = 7,037 \text{ м}^3/\text{кг},$$

отсюда

$$\rho_n = \frac{1}{v} = 0,127 \text{ кг/м}^3.$$

Из табл. XIII для  $t = 70^\circ \text{C}$

$$\rho_n = \rho'' = 0,1982 \text{ кг/м}^3,$$

отсюда относительная влажность воздуха

$$\varphi = \frac{0,127}{0,1982} = 64,1\%.$$

Тот же результат получится, если из табл. XIII найти давление насыщения при температуре  $t = 70^\circ \text{C}$ :

$$p_n = 0,03117 \text{ МПа}.$$

Тогда по уравнению (277)

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} = \frac{0,02}{0,03117} = 64,2\%.$$

470. Задано состояние влажного воздуха  $t = 80^\circ \text{C}$ ,  $p_n = 0,015 \text{ МПа}$ .

Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность. Барометрическое давление  $B = 99\,325$  Па (745 мм рт. ст.).

$$\text{Отв. } \varphi = 0,31; d = 108 \text{ г/кг}; \rho = 0,925 \text{ кг/м}^3.$$

471. Газовый двигатель всасывает  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при  $t = 25^\circ \text{С}$ . Относительная влажность воздуха  $\varphi = 0,4$ .

Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

$$\text{Отв. } 4,6 \text{ кг/ч.}$$

472. Состояние влажного воздуха характеризуется температурой  $t = 25^\circ \text{С}$  и относительной влажностью  $\varphi = 0,8$ . Барометрическое давление  $B = 99\,325$  Па (745 мм рт. ст.)

Найти парциальное давление пара в воздухе и его влагосодержание.

$$\text{Отв. } p_n = 0,0025 \text{ МПа}; d = 16,3 \text{ г/кг.}$$

473. Для условий, данных в предыдущей задаче, определить степень насыщения воздуха.

### Решение

Степень насыщения воздуха определяем по формуле (283)

$$\varphi = \frac{d}{d_{\max}},$$

а максимальное влагосодержание  $d_{\max}$  — по формуле (281):

$$d_{\max} = 622 \frac{p_n}{p - p_n} = \frac{0,003166}{0,099325 - 0,003166} = 20,5 \text{ г/кг.}$$

Следовательно,

$$\psi = \frac{d}{d_{\max}} = \frac{16,3}{20,5} = 0,795.$$

Таким образом, полученные значения степени насыщения и относительной влажности  $\varphi$  почти совпадают:

$$\psi \approx \varphi = 0,8.$$

474. Наружный воздух, имеющий температуру  $t = 20^\circ \text{С}$  и влагосодержание  $d = 6$  г/кг, подогревается до температуры  $45^\circ \text{С}$ .

Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 0,1 МПа.

### Р е ш е н и е

Относительную влажность воздуха находим по формуле (277):

$$\varphi = \frac{p_n}{p_s}$$

Величина  $p_n$  определяется по таблицам насыщенного пара и при температуре  $t = 20^\circ \text{C}$  составляет

$$p_n = 0,002337 \text{ МПа.}$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе при данном барометрическом давлении является функцией только влагосодержания и определяется по формуле (280):

$$p_n = p \frac{d}{622 + d} = 0,1 \frac{6}{628} = 0,00096 \text{ МПа.}$$

Следовательно,

$$\varphi_1 = \frac{0,00096 \cdot 100}{0,002337} = 41 \% .$$

В процессе подогрева влагосодержание воздуха не изменяется. Следовательно, остается неизменным и парциальное давление пара. Давление насыщения  $p_n$  при температуре  $t = 45^\circ \text{C}$  по табл. XV составит

$$p_n = 0,009584 \text{ МПа,}$$

поэтому

$$\varphi_2 = \frac{0,00096 \cdot 100}{0,009584} = 10,01 \% .$$

**475.** Определить истинную температуру мокрого термометра  $t_m$ , если сухой термометр психрометра показывает температуру  $t_s = 35^\circ \text{C}$ , а мокрый термометр — температуру  $t'_m = 15^\circ \text{C}$ . Скорость движения воздуха  $w = 0,25 \text{ м/с}$ .

$$\text{Отв. } t_m = 13,4^\circ \text{C.}$$

**476.** Во влажный воздух с параметрами  $t_s = 75^\circ \text{C}$  и  $\varphi = 10\%$  испаряется вода при адиабатных условиях. Температура воздуха при этом понижается до  $45^\circ \text{C}$ .

Определить относительную влажность и влагосодержание воздуха в конечном состоянии.

## Решение

Начальное состояние воздуха в диаграмме  $t-d$  (рис. 124) определяется пересечением изотермы  $t = 75^\circ \text{C}$  и линии  $\varphi = \text{const} = 10\%$  (точка  $A$ ). Так как в процессе адиабатного испарения воды температура мокрого термометра не изменяется, то конечное состояние воздуха опреде-

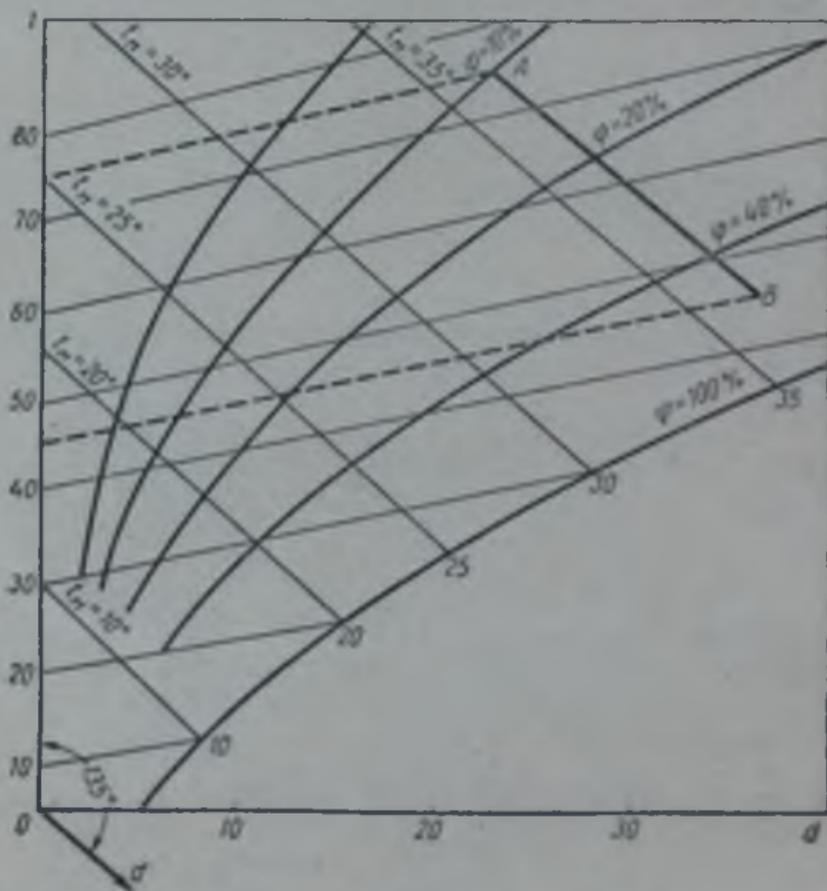


Рис. 124

ляется пересечением изотермы  $t_w = \text{const}$ , проходящей через точку  $A$ , с изотермой  $t = 45^\circ \text{C}$  (точка  $B$ ). Этой точке соответствуют относительная влажность  $\varphi = 60\%$  и влагосодержание  $d = 38,5 \text{ г/кг}$ .

477. Психрометр, установленный в сушильной камере, показывает температуру  $t_c = 30^\circ \text{C}$  и  $t_w = 20^\circ \text{C}$ . Скорость движения воздуха  $\omega = 0,5 \text{ м/с}$ .

Определить состояние воздуха, если его барометрическое давление  $B = 99\,325 \text{ Па}$  (745 мм рт. ст.).

*Отв.*  $\varphi = 40\%$ ;  $d = 11,5 \text{ г/кг}$ .

478. В сушилку помещен материал, от которого нужно отнять 3000 кг воды. Температура наружного воздуха  $t_1 = 10^\circ \text{C}$  при относительной влажности  $\varphi = 0,4$ . При входе в сушилку воздух подогревается и выходит из нее при  $t_2 = 40^\circ \text{C}$  и  $\varphi = 0,85$ .

Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.

$$\text{Отв. } V_{\text{н}} = 64\,500 \text{ м}^3.$$

479. Для сушки используют воздух при  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  и  $\varphi_1 = 60\%$ . В калорифере его подогревают до  $t_2 = 95^\circ \text{C}$  и направляют в сушилку, откуда он выходит при  $t_3 = 35^\circ \text{C}$ .

Вычислить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и теплоту на 1 кг испаренной влаги.

### Решение

В диаграмме  $Id$  (рис. 123) находим точку  $K$  на пересечении линии  $t = 20^\circ \text{C}$  и  $\varphi_1 = 60\%$  и определяем  $d_1 = 9 \text{ г/кг}$ ;  $I_1 = 40 \text{ кДж/кг}$ .

Проведя линию  $d = \text{const}$ , находим в пересечении ее с  $t_2 = 95^\circ \text{C}$  точку  $L$ , характеризующую состояние воздуха после выхода его из калорифера. Из точки  $L$  ведем линию  $I = \text{const}$  до пересечения с изотермой  $t_3 = 35^\circ \text{C}$ , где находим точку  $M$ , характеризующую состояние воздуха по выходе из сушилки. Для точки  $M$

$$d_3 = 33 \text{ г/кг}; I_3 = 117,6 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, на 1 кг сухого воздуха изменение влагосодержания составляет

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 33 - 9 = 24 \text{ г/кг}.$$

Для испарения 1 кг влаги потребуется сухого воздуха

$$\frac{1000}{24} = 41,7 \text{ кг}.$$

Расход теплоты в калорифере ( $I_3 - I_1$ ) на 1 кг воздуха составляет

$$\Delta I = I_3 - I_1 = 117,6 - 40 = 77,6 \text{ кДж/кг}.$$

Расход теплоты на 1 кг испаренной влаги (на 41,7 кг сухого воздуха) составит

$$q = 77,6 \cdot 41,7 = 3236 \text{ кДж/кг}.$$

480. Состояние влажного воздуха характеризуется следующими параметрами:

$$t_c = 60^\circ \text{С и } \varphi = 10\%.$$

Определить истинную температуру мокрого термометра и температуру точки росы.

### Решение

Заданное состояние воздуха в диаграмме  $Id$  (рис. 125) определяется пересечением изотермы  $t_c = 60^\circ \text{С}$  и кри-

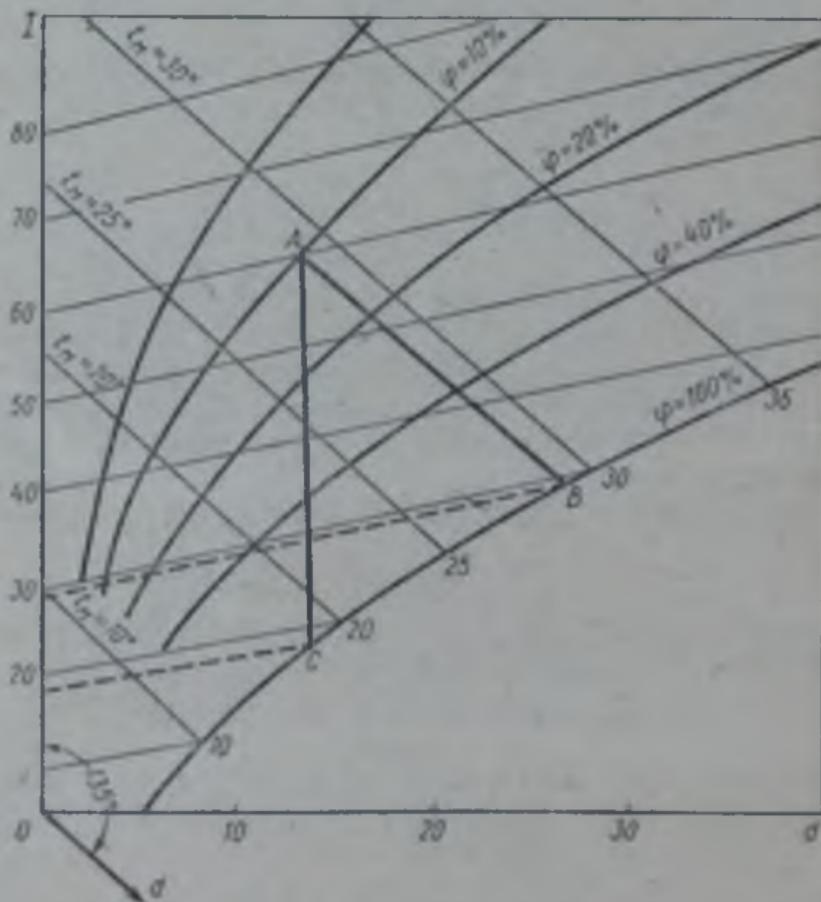


Рис. 125

вой  $\varphi = 10\%$  (точка A). Так как истинная температура мокрого термометра есть температура адиабатного насыщения воздуха, а этот процесс характеризуется постоянством температуры испаряющейся жидкости  $t_m = \text{const}$ , то проводим из точки A прямую параллельно линии  $t_m =$

= const до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$  (точка B). Эта точка определяет искомую температуру мокрого термометра, равную  $29^\circ \text{C}$ .

Для получения температуры точки росы необходимо влажный воздух охладить при постоянном давлении до состояния полного насыщения. Так как процесс охлаждения протекает при постоянном влагосодержании, то точка росы получается пересечением вертикали из точки A с кривой  $\varphi = 100\%$  (точка C). Из диаграммы видно, что  $t_p = 18^\circ \text{C}$ .

481. Для использования теплоты газов, уходящих из паровых котлов, в газоходах последних устанавливают водоподогреватели (водяные экономайзеры). Минимально допустимая температура воды, поступающей в экономайзер, должна быть по крайней мере на  $10^\circ$  выше температуры точки росы водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

Определить допускаемую температуру питательной воды, если объем продуктов сгорания  $V_{\text{п.с}} = 9,60 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а объем водяных паров  $V_{\text{в.п}} = 0,24 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Давление продуктов сгорания в газоходе экономайзера равно  $0,1 \text{ МПа}$ .

Отв.  $t \geq 30,8^\circ \text{C}$ .

## ТЕРМОДИНАМИКА ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Химическими процессами* называются процессы, в результате которых образуются новые вещества, отличающиеся по своим физическим и химическим свойствам от исходных веществ.

Все химические процессы или *химические реакции* сопровождаются или выделением теплоты, или ее поглощением. Реакции, происходящие с выделением теплоты, называются *экзотермическими*, а реакции, сопровождающиеся поглощением теплоты, — *эндотермическими*.

Химические реакции обычно рассматриваются при постоянном объеме или постоянном давлении и одновременно при постоянной температуре до и после реакции. Такие реакции называются соответственно *изохорно-изотермическими* и *изобарно-изотермическими* реакциями.

При протекании химических реакций число молей реагирующих веществ может оставаться неизменным ( $\Delta n = n_2 - n_1 = 0$ ), увеличиваться ( $\Delta n = n_2 - n_1 > 0$ ) или уменьшаться ( $\Delta n = n_2 - n_1 < 0$ ), где  $n_1$  и  $n_2$  — число молей реагентов соответственно до и после реакции, а  $\Delta n$  — изменение числа молей.

*Первый закон термодинамики* в применении к химическим процессам имеет следующий вид;

$$q = \Delta U + L, \quad (290)$$

где  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии системы;

$q$  — теплота, подводимая к системе или отданная ею;

$L$  — работа, совершаемая системой или полученная ею.

Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  считается положительным при увеличении внутренней энергии системы и отрицательным — при ее уменьшении.

Теплота  $q$ , подводимая к системе, считается положительной, а отводимая от нее — отрицательной.

Работа  $L$ , совершаемая системой, считается положительной, а получаемая ею — отрицательной.

Работа, производимая системой в химических процессах, может состоять из работы расширения и работы, не связанной с изменением объема системы. В дальнейшем будем считать, что расширение есть единственный вид работы, совершаемый системой (для подавляющего большинства химических процессов это в действительности так). Тогда уравнение (290) первого закона термодинамики принимает вид

$$q = \Delta U + \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (291)$$

*Тепловым эффектом  $Q$  реакции* называется количество теплоты, которой система обменивается с внешней средой при условии, что температура до и после реакции остается одной и той же. *Знаки теплоты, подводимой к системе или отводимой от нее, и теплового эффекта реакции противоположны.* Поэтому тепловой эффект экзотермической реакции считается отрицательным, а эндотермической — положительным.

Для изохорных процессов уравнение (291) принимает вид

$$q_v = \Delta U.$$

Следовательно,

$$Q_v = -\Delta U = U_1 - U_2, \quad (292)$$

т. е. *тепловой эффект  $Q_v$  в изохорных реакциях равен уменьшению внутренней энергии системы.*

Для изобарных реакций уравнение (291) имеет вид

$$q_p = \Delta I,$$

следовательно,

$$Q_p = -\Delta I = I_1 - I_2, \quad (293)$$

т. е. *тепловой эффект  $Q_p$  в изобарных реакциях равен уменьшению энтальпии системы.*

Соотношение тепловых эффектов  $Q_v$  и  $Q_p$  для идеальных газов зависит от изменения в реакции числа молей:

$$Q_p = Q_v + \mu R \Delta n T. \quad (294)$$

Таким образом, в реакциях, где число молей уменьшается ( $\Delta n < 0$ ),  $Q_v < Q_p$ ; в реакциях, где число молей

увеличивается ( $\Delta n \geq 0$ ),  $Q_v \geq Q_p$ , а в реакциях, где число молей остается неизменным ( $\Delta n = 0$ ),  $Q_v = Q_p$ .

При пользовании уравнением (294) следует иметь в виду, что если в реакции участвуют твердые или жидкие вещества, то при определении  $\Delta n$  следует брать лишь изменение числа молей газообразных компонентов реакции.

Русским академиком Г. И. Гессом в 1840 г. опытным путем был установлен следующий закон, которому дано имя Гесса; *тепловой эффект реакции не зависит от пути ее протекания и от промежуточных процессов, а зависит лишь от начального и конечного состояния.*

Из закона Гесса вытекают два важнейших следствия:

1. *Тепловой эффект реакции равен сумме теплот образования конечных продуктов реакции минус сумма теплот образования исходных веществ:*

$$Q = Q_{\text{обр. кон}} - Q_{\text{обр. исх.}} \quad (295)$$

2. *Тепловой эффект реакции равен сумме теплот сгорания исходных веществ минус сумма теплот сгорания продуктов реакции:*

$$Q = Q_{\text{сг. исх.}} - Q_{\text{сг. кон.}} \quad (296)$$

Пользуясь этими следствиями, можно вычислить тепловые эффекты реакций, осуществление которых на практике затруднительно или совершенно невозможно.

Тепловые эффекты химических реакций изменяются с изменением температуры. Закон изменения теплового эффекта в зависимости от температуры определяется уравнением

$$Q = Q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3, \quad (297)$$

где  $Q$  — тепловой эффект реакции при температуре  $T$  К;

$Q_0$  — тепловой эффект реакции при абсолютном нуле;

$\alpha, \beta, \gamma$  — коэффициенты, определяемые на основании уравнения реакции и уравнений истинных молярных теплоемкостей реагентов.

Для реакции вида



и уравнения температурной зависимости истинной теплоемкости

$$\mu c = a + bT + dT^2$$

коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно:

$$\alpha = \sum (na_1) - \sum (na_2) = n_A a_A + n_B a_B - n_C a_C - n_D a_D; \quad (298)$$

$$\beta = \frac{\sum (nb_1) - \sum (nb_2)}{2} = \frac{n_A b_A + n_B b_B - n_C b_C - n_D b_D}{2}; \quad (299)$$

$$\gamma = \frac{\sum (nd_1) - \sum (nd_2)}{3} = \frac{n_A d_A + n_B d_B - n_C d_C - n_D d_D}{3}. \quad (300)$$

Величины  $n_A$ ,  $n_B$ ,  $n_C$  и  $n_D$  — числа молей веществ  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , а величины  $a$ ,  $b$  и  $d$  с соответствующими индексами — коэффициенты уравнения истинной теплоемкости каждого реагента. Величина  $Q_0$ , входящая в уравнение (297), определяется по значению теплового эффекта реакции для известной температуры.

Формула (297) дает возможность найти значение теплового эффекта реакции при любой температуре, если известны тепловой эффект реакции при какой-либо температуре и зависимости теплоемкостей всех реагентов от температуры.

Изменение теплового эффекта реакции при изменении температуры может быть также определено по таблицам теплоемкостей. В этом случае следует пользоваться формулой

$$Q_2 - Q_1 = \sum [n_1 (\mu c)_0^{t_2}] t_2 - \sum [n_2 (\mu c)_0^{t_1}] t_1, \quad (301)$$

где  $Q_1$  — тепловой эффект реакции при температуре  $t_1$  °C;

$Q_2$  — тепловой эффект реакции при температуре  $t_2$  °C;

$n_1 (\mu c)_0^{t_2}$  — сумма произведений из числа молей каждого исходного вещества на его среднюю мольную теплоемкость в пределах от 0 до  $t_2$  °C;

$n_2 (\mu c)_0^{t_1}$  — сумма произведений из числа молей каждого полученного вещества на его среднюю мольную теплоемкость в пределах от 0 до  $t_1$  °C.

Характеристическими или термодинамическими функциями называют такие функции состояния системы, при помощи которых можно наиболее просто определить термодинамические свойства системы, а также находить условия равновесия в ней. К этим функциям принадлежат: внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $I$ , энтропия  $S$ , изохорный потенциал  $F$  и изобарный потенциал  $Z$ . Наиболее удобными для характеристики химических процессов являются последние две функции. Убыль этих функций в обратимых изохорно-изотермических и изобарно-изотермических реакциях позволяет определить максимальную работу этих реакций, являющуюся мерой химического сродства.

Изохорный потенциал определяется уравнением

$$F = U - TS, \quad (302)$$

а изобарный потенциал — уравнением

$$Z = U - TS + pv = I - TS. \quad (303)$$

Максимальная работа в обратимых изохорно-изотермических реакциях равна уменьшению изохорного потенциала системы:

$$L_o = F_1 - F_2. \quad (304)$$

Максимальная работа в обратимых изобарно-изотермических реакциях (за вычетом работы расширения) равна уменьшению изобарного потенциала системы:

$$L_p = Z_1 - Z_2. \quad (305)$$

Концентрация вещества может быть выражена различно. Чаще всего ее определяют числом молей вещества в единице объема. Таким образом,

$$C = \frac{n}{V} \text{ кмоль/м}^3, \quad (306)$$

где  $n$  — число молей вещества;

$V$  — объем вещества в  $\text{м}^3$ .

При постоянной температуре реакции концентрации отдельных веществ прямо пропорциональны их парциальным давлениям:

$$C_1 \pm \frac{P_1}{\mu RT}, \quad (307)$$

где  $p_i$  — парциальное давление отдельного газообразного вещества в газовой смеси;

$\mu R$  — газовая постоянная;

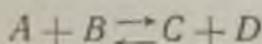
$T$  — температура реакции в К.

Истинную скорость реакции находим из уравнения

$$\omega = - \frac{dC}{dt}. \quad (308)$$

Знак минус относится к случаю, когда  $C$  обозначает концентрацию одного из исходных веществ, количество которых в ходе реакции уменьшается.

Скорость химической реакции пропорциональна концентрации веществ, принимающих участие в реакции. Если для реакции вида



начальные концентрации элементов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  обозначить соответственно через  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  и  $C_D$ , то на основании закона действующих масс скорость прямой реакции, идущей слева направо,

$$\omega_1 = k_1 C_A C_B,$$

а скорость обратной реакции, идущей справа налево,

$$\omega_2 = k_2 C_C C_D,$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты пропорциональности, называемые *константами скорости химической реакции*.

Для реакции вида



где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — число молей элементов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , скорости прямой и обратной при химическом равновесии реакций выражаются соответственно уравнениями:

$$\omega_1 = k_1 C_A^a C_B^b$$

и

$$\omega_2 = k_2 C_C^c C_D^d.$$

Величина

$$K_c = \frac{k_2}{k_1} = \frac{C_A^a C_B^b}{C_C^c C_D^d}, \quad (309)$$

в которой  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ,  $C_D$  — концентрации веществ в момент равновесия, называется *константой равновесия реакции*.

Константа равновесия химической реакции может быть также выражена через парциальные давления в момент равновесия:

$$K_p = \frac{p_A^a p_B^b}{p_C^c p_D^d}. \quad (310)$$

Величины  $K_c$  и  $K_p$  связаны между собой уравнением

$$K_c = K_p (\mu RT)^{\Delta n}; \quad (311)$$

$\Delta n$  равно изменению числа молей в реакции:

$$\Delta n = c + d - a - b.$$

*Диссоциацией* называется распад соединения на более простые вещества. *Степенью диссоциации*  $\alpha$  называется отношение числа молей вещества, распавшихся к моменту равновесия на продукты диссоциации, к общему числу молей в начале реакции.

Степень диссоциации зависит от температуры, а в тех реакциях, которые сопровождаются изменением числа молей, — также от давления и объема.

Между степенью диссоциации  $\alpha$  и константой равновесия  $K$  существует прямая зависимость; следовательно, с увеличением степени диссоциации константа равновесия увеличивается и наоборот. Имея значения констант равновесия, можно вычислить степень диссоциации при любой температуре и любом давлении.

Величина максимальной работы реакции определяется следующими уравнениями:

$$L = \mu RT \left[ \ln \frac{C_A^a C_B^b}{C_C^c C_D^d} - \ln K_c \right]; \quad (312)$$

$$L = \mu RT \left[ \ln \frac{p_A^a p_B^b}{p_C^c p_D^d} - \ln K_p \right]. \quad (313)$$

В уравнении (313) величины  $p_A$ ,  $p_B$ ,  $p_C$  и  $p_D$  обозначают парциальные давления элементов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . Остальные обозначения, приведенные в уравнениях (312) и (313), соответствуют ранее принятым. Эти уравнения часто называют *уравнениями изотермы химической реакции*. Они позволяют определить направление реакции:

если  $L > 0$ , то реакция протекает в сторону образования конечных продуктов, т. е. *слева направо*;

если  $L < 0$ , то прямая реакция невозможна, и происходит обратная реакция, т. е. реакция протекает справа налево;

если  $L = 0$ , то система находится в химическом равновесии.

Изменение константы равновесия с изменением температуры устанавливается уравнением

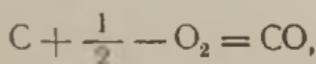
$$\lg \frac{k_2}{k_1} = \frac{Q}{4.574} \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}. \quad (314)$$

Это уравнение позволяет найти значение константы равновесия  $k_2$  при любой температуре  $T_2$ , если известны тепловой эффект реакции и константа равновесия  $k_1$  при какой-либо температуре  $T_1$ .

Уравнение (314) дает приближенное решение. Однако им широко пользуются в технических расчетах. Точность его тем больше, чем меньше разность температур  $T_1$  и  $T_2$ .

### Задачи

482. Тепловой эффект реакции



протекающей при постоянном давлении,

$$Q_p = 110\,598 \text{ кДж/кмоль при } t = 25^\circ \text{ С.}$$

Определить тепловой эффект этой реакции при той же температуре и постоянном объеме.

### Решение

Зависимость тепловых эффектов  $Q_v$  и  $Q_p$  определяется уравнением (294):

$$Q_v = Q_p + \mu R \Delta n T.$$

Для рассматриваемой реакции

$$\Delta n = n_2 - n_1 = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2},$$

так как объемом углерода по сравнению с объемом газов можно пренебречь. Следовательно,

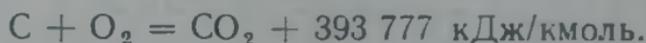
$$Q_v = 110\,598 + 8,315 \cdot \frac{1}{2} \cdot 298 = 111\,837 \text{ кДж/кмоль.}$$

483. По опытным данным, образование  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  при  $p = \text{const}$  сопровождается выделением теплоты  $Q_p = 283\,170$  кДж/кмоль при  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Определить тепловой эффект реакции при  $v = \text{const}$ .

$$\text{Отв. } Q_v = 281\,931 \text{ кДж/кмоль.}$$

484. Для реакции полного сгорания твердого углерода известен тепловой эффект при  $p = \text{const}$ :



Определить тепловой эффект реакции при  $v = \text{const}$ :

$$\text{Отв. } Q_v = 393\,777 \text{ кДж/кмоль.}$$

485. Определить тепловой эффект  $Q_v$  реакции



при  $t = 25^\circ \text{C}$ , если тепловой эффект  $Q_p$  этой реакции при той же температуре равен  $131\,390$  кДж/кмоль.

$$\text{Отв. } Q_v = 128\,912 \text{ кДж/кмоль.}$$

486. Определить теплоту сгорания  $1$  кг  $\text{CO}$  и  $1$  кг  $\text{H}_2$  при постоянном давлении и температуре  $t = 25^\circ \text{C}$ , если известно, что тепловые эффекты реакций сгорания  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в  $\text{H}_2\text{O}$  при постоянном объеме и той же температуре соответственно равны:  $Q_{v\text{CO}} = 281\,931$  кДж/кмоль;  $Q_{v\text{H}_2} = 282\,287$  кДж/кмоль (с образованием воды).

### Р е ш е н и е

Теплотой сгорания данного вещества называется количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы или единицы объема вещества. Очевидно, теплота сгорания  $\text{CO}$  есть не что иное, как тепловой эффект реакции, отнесенный к  $1$  кг или  $1$  м<sup>3</sup> вещества при нормальных условиях. Следовательно, теплота сгорания  $\text{CO}$  при постоянном давлении

$$q_{p\text{CO}} = \frac{Q_{p\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}}},$$

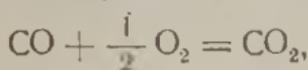
а теплота сгорания  $\text{H}_2$  при постоянном давлении

$$q_{p\text{H}_2} = \frac{Q_{p\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2}}.$$

Для нахождения  $Q_p$  для CO воспользуемся формулой (294):

$$Q_v = Q_p + \mu R \Delta n T.$$

Так как горение CO происходит по формуле



то изменение числа молей составляет

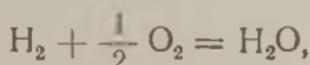
$$\Delta n = n_2 - n_1 = 1 - \left(1 + \frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2}$$

и, следовательно,

$$Q_{p\text{CO}} = 281\,931 + 8,314 \cdot \frac{1}{2} \cdot 298 = 283\,170 \text{ кДж/кмоль.}$$

Точно так же находим  $Q_p$  для  $\text{H}_2$ .

Так как горение водорода происходит по формуле



то изменение числа кмолей в реакции

$$\Delta n = 0 - n_1 = 0 - \left(1 + \frac{1}{2}\right) = -1\frac{1}{2}$$

(объемом воды, образовавшейся при горении, пренебрегаем) и, следовательно,

$$Q_{p\text{H}_2} = Q_{v\text{H}_2} - 8,314 \Delta n T = 282\,287 + 8,314 \cdot \frac{3}{2} \cdot 298 = 286\,000 \text{ кДж/кмоль.}$$

Теплота сгорания CO при  $p = \text{const}$  составит

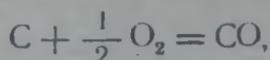
$$q_{p\text{CO}} = \frac{Q_{p\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}}} = \frac{283\,170}{28} = 10\,113 \text{ кДж/кг (2416 ккал/кг);}$$

$$q_{p\text{H}_2} = \frac{Q_{p\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2}} = \frac{286\,000}{2,016} =$$

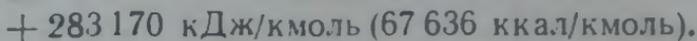
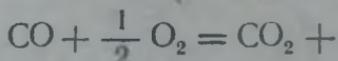
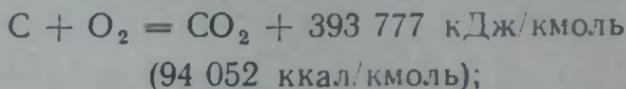
$$= 141\,867 \text{ кДж/кг (33\,887 ккал/кг).}$$

Нетрудно видеть, что разница между  $Q_p$  и  $Q_v$  не превышает 0,4—1,3%, и поэтому ею часто пренебрегают.

487. Определить тепловой эффект реакции



экспериментальное проведение которой весьма затруднительно, если известны тепловые эффекты при постоянном давлении следующих реакций:



### Решение

Схема протекания реакций показана на рис. 126. Так как на основании закона Гесса тепловой эффект реакции вполне определяется начальным и конечным состоянием системы и не зависит от пути протекания процесса, то тепловой эффект реакции I равен алгебраической сумме тепловых эффектов реакций II и III. Следовательно,

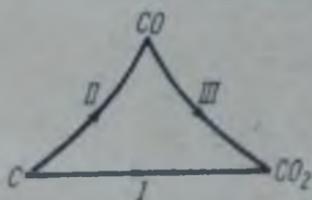


Рис. 126

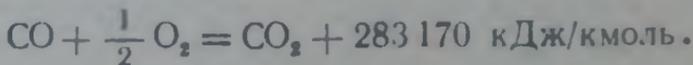
$$Q_{II} = Q_I - Q_{III} = 393\,777 - 283\,178 =$$

$$= 110\,607 \text{ кДж/кмоль}.$$

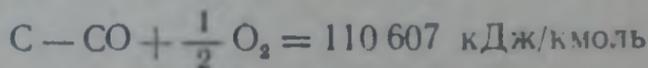
Аналогичный результат получается при почленном вычитании из уравнения реакции



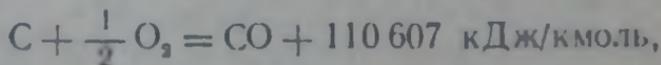
уравнения реакции



Получаем



или



т. е. тепловой эффект рассматриваемой реакции равен 110 607 кДж/кмоль (26 416 ккал/кмоль).

488. Из опытных данных известны тепловые эффекты при  $p = \text{const}$  для реакций сгорания CO в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в  $\text{H}_2\text{O}$  (пар), а именно

$$Q_{p\text{CO}} = 283\,170 \text{ кДж/кмоль}; \quad Q_{p\text{H}_2} = 241\,989 \text{ кДж/кмоль}.$$

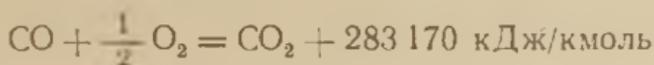
Определить теоретическим путем тепловой эффект реакции



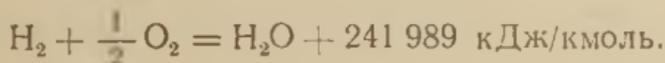
опытное определение которой затруднительно.

### Решение

Составляем уравнения реакций, для которых тепловые эффекты известны:



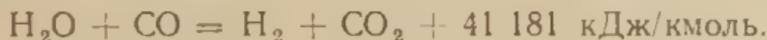
и



После почленного вычитания получаем



или

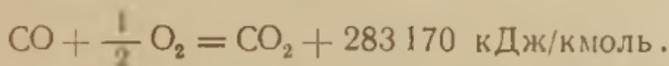
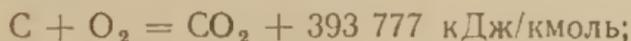


Следовательно, тепловой эффект реакции  $Q_p = 41\,181 \text{ кДж/кмоль}$  (9838 ккал/кмоль).

489. Определить тепловой эффект  $Q_p$  реакции



если известны тепловые эффекты для реакции полного сгорания углерода в углекислоту и для реакции горения окиси углерода:



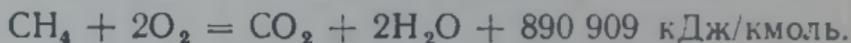
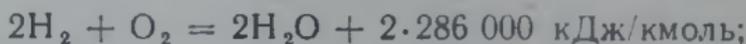
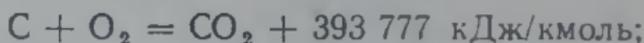
Отв.  $Q_p = -172\,580 \text{ кДж/кмоль}.$

490. Теплоты образования воды и водяного пара равны соответственно 286 030 кДж/кмоль (68 317 ккал/моль) и 241 989 кДж/кмоль (57 798 ккал/моль).

Определить теплоту парообразования воды.

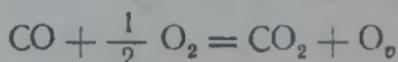
$$\text{Отв. } r = 44\,041 \text{ кДж/кмоль} \\ (10\,519 \text{ ккал/кмоль}).$$

491. Определить тепловой эффект при  $p = \text{const}$  реакции  $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$ , зная тепловые эффекты следующих реакций:



$$\text{Отв. } Q_p = 74\,868 \text{ кДж/кмоль}.$$

492. Определить тепловой эффект реакции



при  $t = 1727^\circ \text{C}$ , если при  $25^\circ \text{C}$  тепловой эффект этой реакции равен  $281\,931 \text{ кДж/кмоль}$ .

### Решение

Изменение теплового эффекта химической реакции с изменением температуры может быть определено по формуле (301):

$$Q_2 - Q_1 = \sum [n(\mu_c)_0^2] t_2 - \sum [n(\mu_c)_0^1] t_1.$$

Для рассматриваемой реакции эта формула примет вид

$$Q_2 - Q_1 = [n_A(\mu_A)_0^2 + n_B(\mu_B)_0^2 - n_C(\mu_C)_0^2] t_2 - \\ - [n_A(\mu_A)_0^1 + n_B(\mu_B)_0^1 - n_C(\mu_C)_0^1] t_1.$$

По табл. V, VII и IX находим:

для  $\text{CO}$

$$(\mu_c)_0^{1727} = 24,962 \text{ кДж/кмоль}; (\mu_c)_0^{25} = 20,823 \text{ кДж/кмоль};$$

для  $\text{O}_2$

$$(\mu_{\text{O}_2})_0^{1727} = 26,391 \text{ кДж/кмоль};$$

$$(\mu_{\text{O}_2})_0^{25} = 21,030 \text{ кДж/кмоль};$$

для  $\text{CO}_2$

$$(\mu_{Cv})_0^{1727} = 45,007 \text{ кДж/кмоль};$$

$$(\mu_{Cv})_0^{35} = 28,153 \text{ кДж/кмоль}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} Q_2 - Q_1 &= \left( 1 \cdot 24,962 + \frac{1}{2} \cdot 26,391 - 1 \cdot 45,007 \right) 1727 - \\ &- \left( 1 \cdot 20,823 + \frac{1}{2} \cdot 21,030 - 1 \cdot 28,153 \right) 25 = \\ &= -11910 \text{ кДж/кмоль}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_1 - 11910 = 281931 - 11910 = \\ &= 270021 \text{ кДж/кмоль (64535 ккал/кмоль)}. \end{aligned}$$

493. Для условий предыдущей задачи найти зависимость теплового эффекта  $Q_2$  от температуры и частное значение его при  $t = 1727^\circ \text{C}$ , если известны истинные молярные теплоемкости при постоянном объеме:

для  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$

$$\mu_{Cv} = 18,9 + 0,042T;$$

для  $\text{CO}_2$

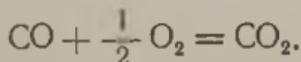
$$\mu_{Cv} = 21,38 + 0,0298T - 0,00000779T^2.$$

### Р е ш е н и е

Изменение теплового эффекта реакции при изменении ее температуры можно определить, пользуясь уравнением (297):

$$Q_2 = Q_0 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3.$$

Определяем значение коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  для рассматриваемой реакции:



Получаем

$$\begin{aligned} \alpha &= \sum a_1 - \sum a_2 = n_A a_A + n_B a_B - n_C a_C = \\ &= 1 \cdot 18,9 + \frac{1}{2} \cdot 18,9 - 1 \cdot 21,38 = 6,97; \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{\sum b_1 - \sum b_2}{2} = \frac{n_A b_A + n_B b_B - n_C b_C}{2} =$$

$$= \frac{1 \cdot 0,0042 + \frac{1}{2} \cdot 0,0042 - 1 \cdot 0,0298}{2} = 0,0117;$$

$$\gamma = \frac{\sum d_1 - \sum d_2}{3} = \frac{1,0 + \frac{1}{2} \cdot 0 - (-0,00000778)}{3} = 2,6 \cdot 10^{-6}.$$

При этих значениях коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  зависимость теплового эффекта от температуры будет иметь следующий вид:

$$Q_v = Q_0 + 6,97T - 0,0117T^2 + 2,6 \cdot 10^{-6}T^3.$$

Находим значение  $Q_0$  по заданному тепловому эффекту при  $t = 298^\circ\text{C}$ .

$$281\,931 = Q_0 + 6,97 \cdot 298 - 0,0117 \cdot 298^2 +$$

$$+ 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 298^3,$$

откуда  $Q_0 = 280\,804$  кДж/кмоль и, следовательно,

$$Q_v = 280\,888 + 6,97T - 0,0117T^2 +$$

$$+ 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 298^3.$$

В частном случае при  $T = 2000$  К получим

$$Q_v = 280\,888 + 6,97 \cdot 2000 - 0,0117 \cdot 2000^2 +$$

$$+ 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^3 = 268\,629 \text{ кДж/кмоль}.$$

Сравнивая полученное значение теплового эффекта с его значением, найденным другим способом в предыдущей задаче, получаем расхождение, составляющее всего 0,52%.

494. При образовании генераторного газа в присутствии накаливаемого углерода происходит реакция



Определить состав смеси к моменту достижения равновесия, если известно, что при  $t = 657^\circ\text{C}$  константа равновесия  $K_c$  равна единице и до реакции в смеси было по одному молю CO и H<sub>2</sub>O.

## Решение

Обозначим через  $x$  долю кмоля  $\text{CO}$ , прореагировавшего к моменту равновесия. Так как вещества реагируют в эквивалентных количествах, то доля прореагировавшего кмоля  $\text{H}_2\text{O}$  также будет равна  $x$  и, следовательно, к моменту равновесия в смеси будет

$\text{CO}$ . . . . .	$1 - x$ кмолей
$\text{H}_2\text{O}$ . . . . .	$1 - x$ кмолей
$\text{CO}_2$ . . . . .	$x$ кмолей
$\text{H}_2$ . . . . .	$x$ кмолей

Если объем газовой смеси составляет  $V \text{ м}^3$ , то концентрация реагентов в состоянии равновесия

$$C_{\text{CO}} = \frac{1-x}{V}; \quad C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1-x}{V};$$

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{x}{V}; \quad C_{\text{H}_2} = \frac{x}{V}.$$

Так как по формуле (309) константа равновесия для данной реакции

$$K_C = \frac{C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{H}_2} C_{\text{CO}_2}},$$

то, подставляя значения концентрации всех реагентов, получаем

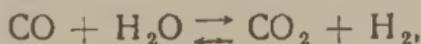
$$K_C = \frac{(1-x)(1-x)}{xx},$$

а так как по условию  $K_C = 1$ , то  $\frac{(1-x)^2}{x^2} = 1$ , откуда  $x = \frac{1}{2}$ .

Следовательно, к моменту равновесия количество каждого реагента в смеси будет равно  $\frac{1}{2}$  кмоля.

Так как  $x$  положительно, то реакция протекает слева направо, т. е. в сторону образования углекислоты и водорода.

495. Определить состав смеси к моменту равновесия для реакции



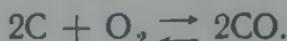
если известно, что при  $T = 1200$  К константа равновесия  $K_C = 1,35$  и начальный состав газов по объему равен  $r_{CO} = 20\%$ ,  $r_{H_2O} = 4\%$ ;  $r_{CO_2} = 2\%$ ;  $r_{H_2} = 6\%$ ;  $r_{N_2} = 68\%$ .

*Отв.*  $r_{CO} = 18,5\%$ ;  $r_{H_2O} = 2,5\%$ ;  
 $r_{H_2} = 7,5\%$ ;  $r_{CO_2} = 3,5\%$ ;  $r_{N_2} = 68\%$ .

496. Определить степень диссоциации окиси углерода в газогенераторе при давлении в нем  $p = 0,085$  МПа и  $T = 2000$  К, если константа равновесия при этих условиях  $K_p = 5,62 \cdot 10^{-13}$ .

### Решение

Диссоциация окиси углерода происходит по следующей реакции:



Обозначим степень диссоциации CO через  $\alpha$ , тогда количество CO уменьшится на  $2\alpha$  кмоль и, следовательно, неразложенными останутся  $2(1 - \alpha)$  кмоль CO. Таким образом, к моменту равновесия смесь будет состоять из

CO . . . . .  $2(1 - \alpha)$  кмоль

O<sub>2</sub> . . . . .  $\alpha$  кмоль

---

Всего  $2 - \alpha$  кмоль

(выпадающим твердым углеродом пренебрегаем). Парциальные давления отдельных компонентов будут соответственно

$$p_{CO} = r_{CO}p = \frac{2(1 - \alpha)}{2 - \alpha} p;$$

$$p_{O_2} = r_{O_2}p = \frac{\alpha}{2 - \alpha} p.$$

В этих выражениях  $r_{CO}$  и  $r_{O_2}$  — соответственно объемные доли CO и O<sub>2</sub>, а  $p$  — общее давление смеси газов. По уравнению (310)

$$K_p = \frac{p_{O_2}}{p_{CO}^2} = \frac{\alpha p (2 - \alpha)^2}{(2 - \alpha)^2 4p^2 (1 - \alpha)^2} = \frac{\alpha (2 - \alpha)}{4 (1 - \alpha)^2 p}.$$

Считая  $\alpha$  очень малой величиной, упрощаем последнюю формулу, принимая

$$2 - \alpha \approx 2;$$

$$1 - \alpha \approx 1.$$

Тогда

$$K_p = \frac{\alpha}{2p},$$

откуда

$$\alpha = K_p 2p = 5,62 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 0,085 = 9,554 \cdot 10^{-11}.$$

497. Определить степень диссоциации водяного пара в цилиндре двигателя с воспламенением от сжатия при  $T = 2000$  К, если давление в цилиндре  $p = 0,41$  МПа, а константа равновесия  $K_p = 4,9 \cdot 10^{-8}$ .

$$\text{Отв. } \alpha = 0,29\%.$$

498. Определить степень диссоциации и состав смеси в момент равновесия реакции



если известно, что давление смеси  $p = 0,98$  МПа, константа равновесия при  $T = 727^\circ \text{C}$   $K_p = 0,082$  и до реакции в сосуде находилось 6 кмоль СО.

$$\text{Отв. } \alpha = 13,1\%; \text{CO} = 5,214 \text{ кмоль}.$$

499. Для реакции



при  $t = 450^\circ \text{C}$  константа равновесия  $K_c = 0,518$ . Начальные концентрации реагентов равны

$$C_{\text{H}_2} = 5 \text{ кмоль/м}^3; C_{\text{N}_2} = 3 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$C_{\text{NH}_3} = 6 \text{ кмоль/м}^3.$$

Определить максимальную работу реакции и ее направление.

### Решение

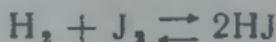
Максимальная работа рассматриваемой реакции на основании уравнения (312) имеет вид

$$L = \mu RT \left[ \ln \frac{C_{\text{H}_2}^3 C_{\text{N}_2}}{C_{\text{NH}_3}^2} - \ln K_c \right].$$

Подставляя значения соответствующих величин, получаем

$$L = 8,314 \cdot 723 \cdot 2,3 \left( \ln \frac{5^{33}}{6^2} - 0,518 \right) = \\ = 8,314 \cdot 723 \cdot 2,3 \cdot 1,303 = 18\,016 \text{ кДж.}$$

Так как  $L > 0$ , то реакция протекает слева направо.  
500. Для реакции



при  $t = 445^\circ \text{C}$  константа равновесия  $K = K_c = K_p = 0,02$ .

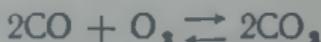
Определить направление реакции при этой температуре по заданным начальным концентрациям для следующих случаев:

1)  $\text{C}_{\text{H}_2} = 1,5 \text{ кмоль/м}^3$ ;  $\text{C}_{\text{J}_2} = 0,25 \text{ кмоль/м}^3$ ;  $\text{C}_{\text{HJ}} = 10 \text{ кмоль/м}^3$ ;

2)  $\text{C}_{\text{H}_2} = 1 \text{ кмоль/м}^3$ ;  $\text{C}_{\text{J}_2} = 2 \text{ кмоль/м}^3$ ;  $\text{C}_{\text{HJ}} = 10 \text{ кмоль/м}^3$ .

Отв. 1)  $L = -1717 \text{ кДж}$ ; реакция идет справа налево; 2)  $L = 0$ ; реакция — в динамическом равновесии.

501. Для реакции



известны константы равновесия:

$$K_1 = 3,97 \cdot 10^{-6} \text{ при } T_1 = 2000 \text{ К};$$

$$K_2 = 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ при } T_2 = 2100 \text{ К.}$$

Определить тепловой эффект реакции, принимая, что в данном небольшом температурном интервале он остается постоянным.

Отв.  $Q = 607\,086 \text{ кДж}$ .

502. В газогенераторном процессе окись углерода реагирует с водяным паром по реакции



В начальный момент, до впуска пара в газогенератор, в состав газов входят лишь окись углерода и азот (последний как инертная составляющая не имеет значения для расчета). Даны начальная температура  $T_1 = 2000$  К и константа  $K_1$  в начальный момент (при впуске 1 кмоль  $\text{H}_2\text{O}$  на 1 кмоль  $\text{CO}$ ), равная 4,63.

Определить состав газов к моменту равновесия при температуре смеси  $T_2 = 1700$  К.

*Отв.*  $\text{CO} = 0,645$  кмоль;  $\text{H}_2\text{O} =$   
 $= 0,645$  кмоль;  $\text{H}_2 = 0,355$  кмоль;  
 $\text{CO}_2 = 0,355$  кмоль.

1. ВАЖНЕЙШИЕ ЕДИНИЦЫ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ (СИ)

Наименование	Единица измерения	Обозначение
<i>Основные единицы</i>		
Длина . . . . .	метр	м
Масса . . . . .	килограмм	кг
Время . . . . .	секунда	с
Сила электрического тока . . . . .	ампер	А
Термодинамическая температура Кельвина . . . . .	кельвин	К
Сила света . . . . .	кандела	кд
Количество вещества . . . . .	моль	моль
<i>Дополнительные единицы</i>		
Плоский угол . . . . .	радиан	рад
Телесный угол . . . . .	стерадиан	ср
<i>Производные единицы пространства и времени</i>		
Площадь . . . . .	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем . . . . .	кубический метр	м <sup>3</sup>
Скорость . . . . .	метр в секунду	м/с
Ускорение . . . . .	метр на секунду в ква- драте	м/с <sup>2</sup>
Угловая скорость . . . . .	радиан в секунду	рад/с
Угловое ускорение . . . . .	радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>
<i>Производные единицы механических величин</i>		
Плотность . . . . .	килограмм на кубиче- ский метр	кг/м <sup>3</sup>
Удельный объем . . . . .	кубический метр на килограмм	м <sup>3</sup> /кг
Сила . . . . .	ньютон	Н
Вес . . . . .	ньютон на кубический метр	Н·м <sup>3</sup>
Удельный вес . . . . .	метр	
Давление . . . . .	паскаль	Па
Напряжение (механическое) . . . . .	джоуль	Дж
Работа . . . . .		
Мощность . . . . .	ватт	Вт
Массовый расход . . . . .	килограмм в секунду	кг/с
Объемный расход . . . . .	кубический метр в се- кунду	м <sup>3</sup> /с
<i>Производные единицы тепловых величин</i>		
Количество теплоты, термодинами- ческий потенциал . . . . .	джоуль	Дж
Удельное количество теплоты, удельный термодинамический по- тенциал . . . . .	джоуль на килограмм	Дж/кг
Теплоемкость системы . . . . .	джоуль на кельвин	Дж/К
Энтропия системы . . . . .	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная теплоемкость . . . . .	джоуль на килограмм- кельвин	Дж/(кг·К)
Удельная вятровая . . . . .	джоуль на килограмм- кельвин	Дж/(кг·К)
Удельная газовая постоянная . . . . .	джоуль на килограмм- кельвин	Дж/(кг·К)
Тепловой поток . . . . .	ватт	Вт

**II. ЕДИНИЦЫ, ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ  
НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ**

Наименование	Название	Обозначение	Значение в единицах СИ
Масса	тонна	т	$10^3$ кг
Время	минута час сутки	мин ч сут	60 с 3 600 с 86 400 с
Плоский угол	градус	...°	$\frac{\pi}{180}$ рад =
	минута	...'	= $1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	секунда	..."	$\frac{\pi}{10\,800}$ рад = = $2,908882 \cdot 10^{-4}$ рад
Объем	литр	л	$\frac{\pi}{648\,000}$ рад =
			= $4,848137 \cdot 10^{-6}$ рад
Температура Цельсия, разность температур	градус Цельсия	°С	$10^{-3}$ м <sup>3</sup>  Температура Цельсия символ $t$ , определяется выражением $t = T - T_0$ , где $T$ — температура Кельвина, $T_0 = 273,15$ К. По размеру градус Цельсия равен Кельвину

**III. 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	$10^{-1}$	
Гекто	г	$10^2$	Санти	$10^{-2}$	
Кило	к	$10^3$	Милли	$10^{-3}$	
Мега	М	$10^6$	Микро	$10^{-6}$	
Гига	Г	$10^9$	Нано	$10^{-9}$	
Тера	Т	$10^{12}$	Пико	$10^{-12}$	

**IV. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАССЫ, ПЛОТНОСТИ  
И ОБЪЕМЫ КИЛОМОЛЕЙ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ  
И ГАЗОВЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ВАЖНЕЙШИХ ГАЗОВ**

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса $\mu$	Плотность $\rho$ в кг/м <sup>3</sup>	Объем киломоля $\mu_0$ в м <sup>3</sup> /кг	Газовая постоянная в Дж/(кг·К)
Воздух . . . . .	—	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород . . . . .	O <sub>2</sub>	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот . . . . .	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот <sup>1</sup>	N <sub>2</sub>	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий . . . . .	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон . . . . .	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород . . . . .	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ . . . .	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан . . . . .	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен . . . . .	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	—	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак . . . . .	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар <sup>2</sup> . . . .	H <sub>2</sub> O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

<sup>1</sup> Атмосферный азот — условный 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.

**V. ТЕПЛОЕМКОСТЬ КИСЛОРОДА<sup>1</sup>**

Температура в °C	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu_{cp}$	$\mu_{cv}$	$\mu_{cpm}$	$\mu_{cvm}$	$\epsilon_{pm}$	$\epsilon_{vm}$	$\epsilon'_{pm}$	$\epsilon'_{vm}$
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

<sup>1</sup> Значения объемных теплоемкостей в табл. V—XII относятся к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> его при нормальных условиях.

Температура в °C	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	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	26,169	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	38,858	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

VI. ТЕПЛОЕМКОСТЬ АЗОТА  $N_2$ 

Температура в °C	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
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	29,864	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	35,757	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	36,795	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

## VII. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОКСИ УГЛЕРОДА

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$\mu_{CO}$	$\mu_{CO_2}$	$\mu_{CO_2}$	$\mu_{CO}$	$c_{CO_2}$	$c_{CO}$	$c'_{CO_2}$	$c'_{CO}$
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	28,282	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

## VIII. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДОРОДА

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$\mu_{H_2}$	$\mu_{H_2O}$	$\mu_{H_2O}$	$\mu_{H_2}$	$c_{H_2O}$	$c_{H_2}$	$c'_{H_2O}$	$c'_{H_2}$
0	28,617	20,302	28,617	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	20,984	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

Температура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$t$ в °С	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$
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

## IX. ТЕПЛОЕМКОСТЬ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Температура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$t$ в °С	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$
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	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	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	53,604	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

## X. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$t$ в °C	$\mu_{c_p}$	$\mu_{c_v}$	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$
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	1,1716
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	1,2188
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

## XI. ТЕПЛОЕМКОСТЬ СЕРНИСТОГО ГАЗА

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м³·К)	
	$t$ в °C	$\mu_{c_p}$	$\mu_{c_v}$	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$
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	35,65	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	38,05	0,724	0,595	2,068	1,700

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
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

## XII. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОЗДУХА

Тем- пера- тура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
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	36,798	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	37,170	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

### XIII. НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (ПО ТЕМПЕРАТУРАМ)

Параметры даны в единицах системы СИ

$t$ в °C	$p$ в МПа	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ в кг/м	$i'$ в кДж/кг	$i''$ в кДж/кг	$r$ в кДж/кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)
0,01	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,0008719	0,0010001	147,2	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,0012277	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,0017041	0,0010010	77,97	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,003166	0,0010030	43,40	0,02304	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,005622	0,0010061	25,24	0,03962	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,009584	0,0010099	15,28	0,06544	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	0,015740	0,0010145	9,578	0,1044	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	0,019917	0,0010171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,03117	0,0010228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,04736	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,05781	0,0010324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,08451	0,0010396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	0,12079	0,0010474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2959
110	0,14326	0,0010515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
115	0,16905	0,0010559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298
125	0,23208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
135	0,3130	0,0010747	0,5820	1,718	567,5	2727	2159	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8859

150	0.4760	0.0010906	0.3926	2.547	632.2	2746	2114	1.8418	6.8383
155	0.5433	0.0010962	0.3466	2.885	653.9	2753	2099	1.8924	6.7940
160	0.6180	0.0011021	0.3068	3.258	675.5	2758	2082	1.9427	6.7508
165	0.7008	0.0011081	0.2725	3.670	697.3	2763	2066	1.9924	6.7081
170	0.7920	0.0011144	0.2426	4.122	719.2	2769	2050	2.0417	6.6666
175	0.8925	0.0011208	0.2166	4.617	741.1	2773	2032	2.0909	6.6256
180	1.0027	0.0011275	0.1939	5.157	763.1	2778	2015	2.1395	6.5858
185	1.1234	0.0011344	0.1739	5.750	785.2	2782	1997	2.1876	6.5465
190	1.2553	0.0011415	0.1564	6.394	807.5	2786	1979	2.2357	6.5074
195	1.3989	0.0011489	0.1409	7.097	829.9	2790	1960	2.2834	6.4694
200	1.5551	0.0011565	0.1272	7.862	852.4	2793	1941	2.3308	6.4318
205	1.7245	0.0011644	0.1151	8.688	875.0	2796	1921	2.3777	6.3945
210	1.9080	0.0011726	0.1043	9.588	897.7	2798	1900	2.4246	6.3577
215	2.1062	0.0011812	0.09465	10.56	920.7	2800	1879	2.4715	6.3212
220	2.3201	0.0011900	0.08606	11.62	943.7	2802	1858	2.5179	6.2849
225	2.5504	0.0011992	0.07837	12.76	966.9	2802	1835	2.5640	6.2488
230	2.7979	0.0012087	0.07147	13.99	990.4	2803	1813	2.6101	6.2133
235	3.0635	0.0012187	0.06527	15.32	1013.9	2804	1790	2.6561	6.1780
240	3.3480	0.0012291	0.05967	16.76	1037.5	2803	1766	2.7021	6.1425
245	3.6524	0.0012399	0.05462	18.30	1061.6	2803	1741	2.7478	6.1073
250	3.9776	0.0012512	0.05006	19.98	1085.7	2801	1715	2.7934	6.0721
255	4.325	0.0012631	0.04591	21.78	1110.2	2799	1689	2.8394	6.0366
260	4.694	0.0012755	0.04215	23.72	1135.1	2796	1661	2.8851	6.0013
265	5.087	0.0012886	0.03872	25.83	1160.2	2794	1634	2.9307	5.9667
270	5.505	0.0013023	0.03560	28.09	1185.3	2790	1605	2.9764	5.9297
275	5.949	0.0013168	0.03274	30.53	1210.7	2785	1574.2	3.0223	5.8938
280	6.491	0.0013321	0.03013	33.19	1236.9	2780	1542.9	3.0681	5.8573
285	6.918	0.0013483	0.02774	36.05	1263.1	2773	1510.2	3.1146	5.8205
290	7.445	0.0013655	0.02554	39.15	1290.0	2766	1476.3	3.1611	5.7827
295	8.002	0.0013839	0.02351	42.53	1317.2	2758	1441.0	3.2079	5.7443
300	8.592	0.0014036	0.02164	46.22	1344.9	2749	1404.2	3.2548	5.7049
305	9.214	0.001425	0.01992	50.20	1373.1	2739	1365.6	3.3026	5.6647
310	9.870	0.001447	0.01832	54.58	1402.1	2727	1325.2	3.3508	5.6233
315	10.561	0.001472	0.01683	59.42	1431.7	2714	1282.3	3.3996	5.5802
320	11.290	0.001499	0.01545	64.72	1462.1	2700	1237.8	3.4495	5.5353
325	12.057	0.001529	0.01417	70.57	1493.6	2684	1190.3	3.5002	5.4891

$t$ в °С	$p$ в МПа	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ в кг/м <sup>3</sup>	$i'$ в кДж/кг	$i''$ в кДж/кг	$r$ в кДж/кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)
330	12,865	0,001562	0,01297	77,10	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412
335	13,714	0,001599	0,01184	84,46	1559,8	2646	1085,7	5,6056	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	92,76	1594,7	2622	1027,0	3,6065	5,3361
345	15,548	0,001686	0,009771	102,34	1639	2595	963,5	3,7184	5,2769
350	16,537	0,001741	0,008803	113,6	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	127,1	1714	2527	813,0	3,8439	5,1385
360	18,674	0,001894	0,006943	144,0	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00599	166,3	1817	2421	603,5	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	203	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951
374	22,522	0,00280	0,00347	286	485,3	512,7	27,4	1,0332	1,0755

Примечание. Параметры критического состояния:  $t_{кр} = 374,15^\circ$ ,  $p_{кр} = 22,129$  МПа,  $\rho_{кр} = 0,00326$  м<sup>3</sup>/кг.

#### XIV. НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (ПО ДАВЛЕНИЯМ)

Параметры даны в единицах системы СИ

$p$ в МПа	$t$ в °С	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ в кг/м <sup>3</sup>	$i'$ в кДж/кг	$i''$ в кДж/кг	$r$ в кДж/кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)
0,0010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,0015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,0020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,0025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,0030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3516	8,576
0,0035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521

0.0040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0.0045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0.0050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0.0060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0.0070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0.0080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0.0090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0.010	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0.011	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0.012	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0.013	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0.014	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0.015	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0.020	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0.025	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0.030	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0.040	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0.050	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0.060	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0.070	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0.080	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0.090	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0.100	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0.11	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
0.12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0.13	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
0.14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
0.15	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
0.16	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0.17	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
0.18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0.19	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
0.20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
0.21	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
0.22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0.23	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081

$p$ в МПа	$t$ в °С	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ в кг/м <sup>3</sup>	$i'$ в кДж/кг	$i''$ в кДж/кг	$r$ в кДж/кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)
15	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
16	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
17	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
18	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
19	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
20	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
21	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
22	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Примечание. Параметры критического состояния:  $t_{кр} = 374,15^\circ\text{C}$ ;  $p_{кр} = 22,129$  МПа;  $v_{кр} = 0,00326$  м<sup>3</sup>/кг.

### XV. ВОДА И ПЕРЕГРЕТЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР

Параметры даны в единицах системы СИ (числа слева от ступенчатой линии относятся к воде)

$p$ в МПа	$t$ в °С	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,004	$v$	0,0010018	36,12	38,45	40,75	43,07	45,39	47,69	50,01	52,31	54,63
	$i$	83,7	2574	2612	2650	2688	2726	2764	2803	2841	2880
	$s$	0,2964	8,537	8,651	8,762	8,867	8,966	9,060	9,150	9,238	9,321
0,008	$v$	0,0010018	0,0010079	19,19	20,34	21,50	22,66	23,82	24,97	26,13	27,29
	$i$	83,7	167,5	2612	2650	2688	2726	2764	2802	2841	2880
	$s$	0,2964	0,5715	8,331	8,441	8,546	8,645	8,740	8,830	8,917	9,000
0,010	$v$	0,0010018	0,0010079	15,35	16,27	17,20	18,13	19,06	19,98	20,90	21,83
	$i$	83,7	167,5	2611	2649	2688	2726	2764	2802	2841	2879
	$s$	0,2964	0,5715	8,227	8,337	8,442	8,542	8,636	8,727	8,814	8,897

0,012	v	0,0010018	0,0010079	12,78	13,55	14,33	15,10	15,87	16,64	17,42	18,19
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,143	8,253	8,358	8,457	8,552	8,643	8,730	8,813
0,014	v	0,0010018	0,0010079	10,95	11,61	12,27	12,94	13,60	14,26	14,92	15,58
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,071	8,181	8,287	8,386	8,481	8,572	8,659	8,742
0,016	v	0,0010018	0,0010079	9,573	10,160	10,740	11,320	11,899	12,478	13,057	13,635
	i	83,7	167,5	2610	2649	2687	2725	2,763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,009	8,120	8,225	8,324	8,419	8,510	8,597	8,680
0,020	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	8,119	8,584	9,049	9,513	9,977	10,441	10,905
	i	83,7	167,5	251,1	2648	2687	2725	2763	2801	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	0,8307	8,015	8,120	8,220	8,315	8,406	8,493	8,576
0,030	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	5,400	5,713	6,025	6,335	6,645	6,955	7,264
	i	83,7	167,5	251,1	2646	2685	2724	2762	2801	2839	2878
	s	0,2964	0,5715	0,8307	7,825	7,931	8,031	8,126	8,217	8,304	8,388
0,10	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	1,695	1,795	1,889	1,984	2,078	2,172
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	2676	2717	2757	2796	2835	2875
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	7,361	7,465	7,562	7,654	7,743	7,828
0,12	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	0,0010434	1,491	1,572	1,650	1,729	1,807
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	419,0	2715	2755	2795	2834	2874
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	1,3067	7,376	7,475	7,668	7,657	7,742
0,60	v	0,0010015	0,0010076	0,0010168	0,0010287	0,0010432	0,0010601	0,0010797	0,3167	0,3348	0,3520
	i	84,3	167,9	251,5	335,2	419,1	503,1	589,1	2759	2805	2849
	s	0,2964	0,7516	0,8302	1,0744	1,3062	1,5265	1,738	6,767	6,869	6,963
0,80	v	0,0010015	0,0010076	0,0010167	0,0010286	0,0010431	0,0010600	0,0010795	0,0011020	0,2473	0,2609
	i	84,5	168,1	251,7	335,3	419,2	503,8	589,1	675,3	2792	2839
	s	0,2962	0,5714	0,8300	1,0742	1,3060	1,5263	1,737	1,941	6,715	6,814
1,0	v	0,0010014	0,0010075	0,0010166	0,0010285	0,0010430	0,0010598	0,0010794	0,0011018	0,1949	0,2060
	i	84,7	168,3	251,8	335,4	419,3	503,9	589,2	675,4	2778	2827
	s	0,2960	0,5712	0,8298	1,0740	1,3058	1,5261	1,737	1,941	6,588	6,692
1,2	v	0,0010013	0,0010074	0,0010165	0,0010284	0,0010429	0,0010597	0,0010793	0,0010016	0,1645	0,1693
	i	84,9	168,5	251,9	335,5	419,4	504,0	589,3	675,5	2790	2816
	s	0,2959	0,5711	0,8297	1,0738	1,3056	1,5259	1,737	1,940	6,534	6,588

13	$\nu$ $i$ $s$	0,0009961 96,0 0,2931	0,0010020 179,0 0,5664	0,0010112 262,2 0,8230	0,0010231 345,4 1,0655	0,0010373 428,9 1,2959	0,0010538 512,7 1,5166	0,0010725 597,4 1,726	0,0010939 683,0 1,926	0,0011182 769,7 2,119	0,0011458 857,4 2,309
14	$\nu$ $i$ $s$	0,0009957 96,9 0,2930	0,0010016 179,9 0,5660	0,0010108 263,0 0,8224	0,0010226 346,2 1,0648	0,0010368 429,6 1,2951	0,0010533 513,4 1,5148	0,0010719 598,0 1,724	0,0010932 683,6 1,925	0,0011174 770,2 2,118	0,0011448 857,9 2,308
16	$\nu$ $i$ $s$	0,0009948 98,9 0,2925	0,0010007 181,7 0,5653	0,0010099 264,7 0,8212	0,0010217 347,9 1,0634	0,0010359 431,2 1,2937	0,0010522 514,9 1,5131	0,0010707 599,4 1,722	0,0010918 684,9 1,922	0,0011157 771,3 2,116	0,0011430 858,8 2,305
24	$\nu$ $i$ $s$	0,0009912 106,4 0,2911	0,0009973 188,8 0,5625	0,0010065 271,5 0,8169	0,0010182 354,3 1,0582	0,0010320 437,2 1,2881	0,0010479 520,8 1,5062	0,0010660 604,9 1,715	0,0010864 689,9 1,915	0,0011095 775,7 2,108	0,0011357 862,6 2,295
30	$\nu$ $i$ $s$	0,0009886 112,0 0,2902	0,0009949 194,1 0,5603	0,0010041 276,5 0,8140	0,0010156 359,1 1,0545	0,0010293 441,9 1,2834	0,0010450 525,1 1,5024	0,0010626 609,0 1,709	0,0010825 693,6 1,908	0,0011050 779,1 2,100	0,0011305 865,4 2,287

$\rho$ в МПа	$t$ в °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,004	$\nu$ $i$ $s$	56,93 2918 9,402	59,24 2958 9,479	61,56 2997 9,554	63,87 3037 9,627	66,18 3077 9,698	71,96 3177 9,866	77,73 3280 10,024	85,31 3384 10,174	89,28 3490 10,317	100,84 3707 10,585
0,008	$\nu$ $i$ $s$	28,44 2918 9,081	29,60 2957 9,159	30,75 2997 9,234	31,90 3037 9,306	33,06 3077 9,377	35,94 3177 9,546	38,84 3280 9,704	41,72 3384 9,854	44,61 3490 9,997	50,38 3707 10,265
0,010	$\nu$ $i$ $s$	22,76 2918 8,978	23,68 2957 9,056	24,60 2997 9,131	25,53 3037 9,203	26,46 3077 9,274	28,76 3177 9,443	31,08 3280 9,601	33,39 3384 9,751	35,70 3490 9,895	40,32 3707 10,162
0,012	$\nu$ $i$ $s$	18,96 2918 8,894	19,73 2957 8,972	20,50 2996 9,047	21,27 3036 9,119	22,04 3077 9,190	23,96 3177 9,359	25,89 3280 9,517	27,82 3384 9,667	29,74 3490 9,810	33,60 3707 10,078

1.2	v	0,1788	0,1879	0,1967	0,2054	0,2139	0,2343	0,2547	0,2747	0,2944	0,3339
	i	2865	2911	2955	2999	3042	3151	3260	3368	3477	3696
	s	6,688	6,780	6,866	6,947	7,025	7,026	7,373	7,529	7,674	7,942
1.4	v	0,1515	0,1596	0,1673	0,1748	0,1823	0,2001	0,2176	0,2349	0,2520	0,2858
	i	2855	2902	2948	2992	3036	3147	3256	3365	3474	3695
	s	6,602	6,697	6,784	6,867	6,945	7,130	7,299	7,455	7,601	7,870
1.6	v	0,1309	0,1382	0,1452	0,1519	0,1585	0,1743	0,1899	0,2051	0,2201	0,2499
	i	2844	2893	2940	2986	3030	3142	3253	3363	3472	3693
	s	6,524	6,622	6,711	6,796	6,877	7,063	7,233	7,390	7,537	7,806
1.8	v	0,1149	0,1216	0,1280	0,1341	0,1401	0,1545	0,1683	0,1819	0,1953	0,2219
	i	2833	2884	2932	2979	3025	3138	3249	3360	3470	3691
	s	6,452	6,554	6,646	6,732	6,814	7,003	7,175	7,333	7,480	7,750
2.0	v	0,1021	0,1084	0,1143	0,1200	0,1255	0,1384	0,1511	0,1634	0,1755	0,1995
	i	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	s	6,385	6,491	6,585	6,674	6,757	6,049	7,122	7,282	7,429	7,701
3	v	0,0011891	0,06826	0,07294	0,07720	0,08119	0,09051	0,09929	0,1078	0,1161	0,1325
	i	943.5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	s	2,514	6,225	6,337	6,438	6,530	6,735	6,916	7,080	7,231	7,506
8	v	0,0011833	0,0012221	0,0012689	0,0013275	0,02429	0,03003	0,03438	0,03821	0,04177	0,04844
	i	945.1	1037.9	1134.4	1235.4	2784	2985	3135	3270	3397	3640
	s	2,504	2,688	2,873	3,059	5,788	6,126	6,358	6,552	6,722	7,019
9	v	0,0011822	0,0012207	0,0012669	0,0013246	0,0014016	0,02586	0,03001	0,03354	0,03680	0,04285
	i	945.2	1038.1	1134.2	1234.9	1344.3	2954	3114	3254	3386	3631
	s	2,502	2,686	2,870	3,056	3,249	6,033	6,280	6,481	6,656	6,957
10	v	0,0011805	0,0012185	0,0012650	0,0013217	0,0013970	0,02247	0,02646	0,02979	0,03281	0,03837
	i	945.8	1038.3	1134.1	1234.5	1342.2	2920	3093	3239	3372	3621
	s	2,500	2,684	2,868	3,053	3,244	5,940	6,207	6,416	6,596	6,901
12	v	0,0011788	0,0012164	0,0012612	0,0013164	0,0013886	0,01726	0,02113	0,2414	0,02681	0,03163
	i	946.6	1038.7	1133.9	1233.7	1340.0	2844	3049	3206	3347	3603
	s	2,497	2,680	2,863	3,046	3,235	5,755	6,071	6,298	6,487	6,803
13	v	0,0011777	0,0012150	0,0012593	0,0013137	0,0013847	0,01514	0,01905	0,02197	0,02450	0,02903
	i	946.9	1038.9	1133.8	1233.3	1339.0	2799	3026	3189	3334	3594
	s	2,495	2,678	2,860	3,043	3,230	5,657	6,006	6,243	6,438	6,758

$p$ МПа	$t$ °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
		$\rho$ $i$ $s$	0,0011766 947,3 2,493	0,0012136 1039,1 2,676	0,0012575 1133,8 2,858	0,0013111 1232,9 3,040	0,0013808 1338,0 3,226	0,01325 2750 5,55	0,01726 3000 5,942	0,02010 3172 6,190	0,02252 3321 6,390
$\rho$ $i$ $s$	0,0011744 948,0 2,489	0,0012109 1039,5 2,672	0,0012539 1133,7 2,853	0,0013061 1232,2 3,035	0,0013735 1336,2 3,218	0,00978 2612 5,302	0,01429 2945 5,816	0,01704 3137 6,090	0,01930 3294 6,303	0,02322 3567 6,640	
$\rho$ $i$ $s$	0,0011658 950,9 2,477	0,0012004 1041,3 2,657	0,0012404 1134,0 2,835	0,0012883 1230,3 3,011	0,0013475 1331,2 3,190	0,001612 1625 3,684	0,00676 2638 5,236	0,00977 2971 5,723	0,01174 3174 5,999	0,01478 3493 6,394	
$\rho$ $i$ $s$	0,0011597 953,3 2,468	0,0011931 1042,9 2,647	0,0012313 1134,7 2,822	0,0012764 1229,0 2,996	0,0013311 1329,0 3,171	0,001556 1608 3,640	0,00283 2155 4,476	0,00672 2816 5,446	0,00869 3073 5,799	0,01144 3434 6,242	

## XVI. НАСЫЩЕННЫЙ РТУТНЫЙ ПАР

Давле- ние $p$ в МПа	Температура насыщения $t$ в °C	Энтальпия в кДж/кг		Теплота парообразо- вания $r$ в кДж/кг	Энтропия в кДж/(кг·К)		Удельный объем в м³/кг	
		жидкости $i'$	пара $i''$		жидкости $s'$	пара $s''$	жидкости $v'$	пара $v''$
0,00010	119,5	16,56	318,72	302,16	0,0498	0,8192	0,0000752	165,9
0,0002	134,6	18,60	320,35	301,74	0,0552	0,7953	754	86,16
0,0004	151,2	20,82	322,11	301,28	0,0606	0,7707	756	44,84

### XVII. НАСЫЩЕННЫЙ ПАР АММИАКА (NH<sub>3</sub>)

$$c_p = 2,0599 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad k = 1,32$$

$t$ в °С	$p$ в МПа	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)	$l'$ в кДж/кг	$l''$ в кДж/кг	$l$ в кДж/кг
— 50	0,0409	0,001425	2,623	3,3000	9,6204	193,4	1608,1	1414,7
— 45	0,0546	0,001437	2,007	3,3767	9,5199	215,6	1616,5	1400,9
— 40	0,0718	0,001449	1,550	3,4730	9,4245	237,8	1624,9	1387,1
— 35	0,0932	0,001462	1,215	3,5672	9,3341	260,0	1632,8	1372,8
— 30	0,1195	0,001476	0,963	3,6601	9,2486	282,2	1640,8	1358,6
— 25	0,1516	0,001490	0,771	3,7514	9,1674	304,4	1648,3	1344,0
— 20	0,1902	0,001504	0,624	3,8410	9,0895	327,4	1655,9	1328,5
— 15	0,2363	0,001519	0,509	3,9293	9,0150	350,0	1662,6	1312,6
— 10	0,2909	0,001534	0,418	4,0164	8,9438	372,6	1669,3	1296,6
— 5	0,3549	0,001550	0,347	4,1022	8,8756	395,6	1675,1	1279,5
0	0,4294	0,001566	0,290	4,1868	8,8094	418,7	1681,0	1262,3
5	0,5517	0,001583	0,244	4,2705	8,7458	441,7	1686,4	1244,7
10	0,6150	0,001601	0,206	4,3530	8,6838	465,2	1691,0	1225,9
15	0,7283	0,001619	0,175	4,4346	8,6240	488,6	1695,6	1207,1
20	0,8572	0,001639	0,149	4,5155	8,5658	512,5	1699,4	1186,9
25	1,0027	0,001659	0,128	4,5954	8,5092	536,3	1703,2	1166,9
30	1,1665	0,001680	0,111	4,6746	8,4563	581,1	1705,7	1145,5
35	1,3499	0,001702	0,096	4,7528	8,3991	584,9	1708,2	1123,3
40	1,5544	0,001726	0,083	4,8307	8,3455	609,2	1709,9	1100,7
45	1,7814	0,001750	0,073	4,9078	8,2928	633,9	1710,7	1076,8
50	2,0326	0,001777	0,064	4,9840	8,2400	659,0	1711,1	1052,1

### XVIII. НАСЫЩЕННЫЙ ПАР УГЛЕКИСЛОТЫ (CO<sub>2</sub>)

$$c_p = 0,825 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad k = 1,31$$

$t$ в °С	$p$ в МПа	$v'$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)	$l'$ в кДж/кг	$l''$ в кДж/кг	$l$ в кДж/кг
— 56,6	0,518	0,000849	0,0722	3,7200	5,3273	301,5	649,4	347,9
— 55	0,555	0,000853	0,0676	3,7334	5,3172	304,4	649,8	345,4
— 50	0,684	0,000867	0,0554	3,7765	5,2883	314,0	651,5	337,4
— 45	0,832	0,000881	0,0458	3,8184	5,2607	323,6	652,7	329,1
— 40	1,005	0,000897	0,0382	3,8594	5,2348	333,3	654,0	320,7
— 35	1,202	0,000913	0,0320	3,8996	5,2096	342,9	654,8	311,9
— 30	1,427	0,000931	0,0270	3,9389	5,1854	352,5	655,6	303,0
— 25	1,681	0,000950	0,0229	3,9779	5,1615	362,2	656,1	293,9
— 20	1,967	0,000971	0,0195	4,0168	5,1380	372,2	656,1	283,9
— 15	2,289	0,000994	0,0166	4,0570	5,1154	382,7	656,1	273,4
— 10	2,647	0,001019	0,0142	4,0976	5,0924	394,0	656,6	261,7
— 5	3,045	0,001048	0,0121	4,1407	5,0698	405,7	654,8	249,1

$t$ в °С	$\rho$ в МПа	$v$ в м <sup>3</sup> /кг	$v''$ в м <sup>3</sup> /кг	$s'$ в кДж/(кг·К)	$s''$ в кДж/(кг·К)	$i'$ в кДж/кг	$i''$ в кДж/кг	$g$ в кДж/кг
0	3,485	0,001081	0,0104	4,1868	5,0472	418,7	653,6	234,9
5	3,972	0,001120	0,00885	4,2299	5,0179	431,6	651,0	219,4
10	4,506	0,001166	0,00752	4,2781	4,9894	445,9	647,3	201,4
15	5,092	0,001223	0,00632	4,3292	4,9551	470,0	641,4	180,4
20	5,733	0,001298	0,00526	4,3827	4,9128	477,3	632,6	155,3
25	6,432	0,001417	0,00417	4,4497	4,8504	497,4	616,7	119,3
30	7,192	0,001677	0,00299	4,5444	4,7524	527,1	590,3	63,2
31	7,351	0,002156	0,00216	4,6465	4,6465	567,3	567,3	0

ХІХ. АДИАБАТНОЕ И ПОЛИТРОПНОЕ РАСШИРЕНИЕ ГАЗОВ

$\frac{\rho_1}{\rho_2}$	$m$							
	1,4 (ади- бата)	1,3	1,2	1,1	1,4 (ади- бата)	1,3	1,2	1,1
	Значения $\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{m}} = \frac{v_2}{v_1}$				Значения $\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{m-1}{m}} = \frac{T_1}{T_2}$			
1,1	1,070	1,076	1,083	1,090	1,028	1,022	1,016	1,099
1,2	1,139	1,151	1,164	1,180	1,053	1,043	1,031	1,017
1,3	1,206	1,224	1,244	1,269	1,078	1,062	1,045	1,024
1,4	1,271	1,295	1,323	1,358	1,101	1,081	1,058	1,031
1,5	1,336	1,366	1,401	1,445	1,123	1,098	1,070	1,038
1,6	1,399	1,436	1,479	1,533	1,144	1,115	1,081	1,044
1,7	1,461	1,504	1,557	1,620	1,164	1,130	1,092	1,050
1,8	1,522	1,571	1,633	1,706	1,183	1,145	1,103	1,055
1,9	1,581	1,638	1,706	1,791	1,201	1,160	1,113	1,060
2,0	1,641	1,705	1,782	1,879	1,219	1,174	1,123	1,065
2,5	1,924	2,023	2,145	2,300	1,299	1,235	1,165	1,087
3,0	2,193	2,330	2,498	2,715	1,369	1,289	1,201	1,105
3,5	2,449	2,624	2,842	3,126	1,431	1,336	1,232	1,121
4,0	2,692	2,907	3,177	3,505	1,487	1,378	1,260	1,134
4,5	2,926	3,178	3,500	3,925	1,537	1,415	1,285	1,147
5,0	3,156	3,449	3,824	4,320	1,583	1,449	1,307	1,157
5,5	3,378	3,712	4,142	4,710	1,627	1,482	1,328	1,167
6,0	3,598	3,970	4,447	5,100	1,668	1,512	1,348	1,177

$\frac{p_1}{p_2}$	$m$							
	1,4 (ади- абата)	1,4	1,2	1,1	1,4 (ади- абата)	1,3	1,2	1,1
	Значения $\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{m}} = \frac{v_2}{v_1}$				Значения $\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{m-1}{m}} = \frac{T_1}{T_2}$			
6,5	3,809	4,218	4,760	5,483	1,707	1,540	1,366	1,186
7,0	4,012	4,467	5,058	5,861	1,742	1,566	1,383	1,194
7,5	4,217	4,710	5,360	6,250	1,778	1,591	1,399	1,201
8,0	4,415	4,950	5,650	6,620	1,811	1,616	1,414	1,208
8,5	5,612	5,187	5,950	6,997	1,843	1,639	1,429	1,215
9,0	4,800	5,420	6,240	7,370	1,873	1,660	1,442	1,221
9,5	4,993	5,651	6,528	7,742	1,903	1,681	1,455	1,227
10,0	5,188	5,885	6,820	8,120	1,931	1,701	1,468	1,233
11	5,544	6,325	7,376	8,845	1,984	1,739	1,491	1,244
12	5,900	6,763	7,931	9,744	2,034	1,774	1,513	1,253
13	6,247	7,193	8,478	10,30	2,081	1,807	1,533	1,263
14	6,587	7,614	9,018	11,01	2,126	1,839	1,549	1,271
15	6,919	8,030	9,551	11,73	2,168	1,868	1,570	1,279
16	7,246	8,438	10,08	12,44	2,208	1,896	1,587	1,287
17	7,566	8,841	10,60	13,14	2,247	1,923	1,604	1,294
18	7,882	9,238	11,12	13,84	2,284	1,948	1,619	1,301
19	8,192	9,631	11,63	14,54	2,319	1,973	1,633	1,307
20	8,498	10,02	12,14	15,23	2,354	1,996	1,648	1,313
21	8,803	10,40	12,64	15,93	2,387	2,019	1,661	1,319
22	9,097	10,78	13,14	16,61	2,418	2,041	1,674	1,324
23	9,390	11,15	13,64	17,30	2,449	2,062	1,688	1,330
24	9,680	11,53	14,13	17,97	2,479	2,082	1,698	1,335
25	9,967	11,89	14,62	18,65	2,508	2,102	1,710	1,340
26	10,25	12,26	15,10	19,34	2,537	2,121	1,721	1,345
27	10,53	12,62	15,58	20,01	2,564	2,140	1,732	1,349
28	10,81	12,98	16,07	20,68	2,591	2,158	1,743	1,354
29	11,08	13,33	16,54	21,36	2,617	2,175	1,753	1,358
30	11,35	13,68	17,02	22,02	2,643	2,192	1,763	1,362
31	11,62	14,03	17,49	22,69	2,667	2,209	1,773	1,366
32	11,89	14,38	17,96	23,35	2,692	2,225	1,782	1,370
33	12,15	14,69	18,43	24,01	2,715	2,241	1,792	1,374
34	12,42	15,06	18,89	24,68	2,739	2,256	1,800	1,378
35	12,67	15,41	19,35	24,34	2,761	2,272	1,809	1,382
36	12,93	15,74	19,81	25,99	2,784	2,287	1,817	1,385
37	13,19	16,07	20,26	26,65	2,806	2,301	1,826	1,389
38	13,44	16,41	20,72	27,30	2,827	2,315	1,834	1,392
39	13,69	16,74	21,18	27,95	2,848	2,329	1,842	1,395
40	13,94	17,07	21,63	28,60	2,869	2,343	1,850	1,398

## XX. 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	4654	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	8	10	11	12
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	1	3	4	5	7	8	9	11	12
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	1	3	4	5	6	8	9	10	12
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	1	3	4	5	6	8	9	10	11
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	8	10	11
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	1	2	4	5	6	7	8	9	10
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

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Пропорциональные части								
											1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	6021	6031	6042	6053	6064	6074	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
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	6766	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	6	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

Число	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Пропорциональные части								
											1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	5	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
82	9138	9143	9148	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1	1	2	2	3	3	4	4	5
83	9191	9196	9202	9206	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	9325	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	1	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

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Параметры состояния тела . . . . .	3
Задачи . . . . .	8
Глава II. Идеальные газы и основные газовые законы . . . . .	15
Задачи . . . . .	19
Глава III. Газовые смеси . . . . .	28
Задачи . . . . .	30
Глава IV. Теплоемкость газов . . . . .	36
Задачи . . . . .	41
Глава V. Первый закон термодинамики . . . . .	51
Энтальпия газов . . . . .	54
Смещение газов . . . . .	55
Задачи . . . . .	57
Глава VI. Основные газовые процессы . . . . .	67
Изохорный процесс . . . . .	67
Задачи . . . . .	68
Изобарный процесс . . . . .	72
Задачи . . . . .	73
Изотермический процесс . . . . .	80
Задачи . . . . .	81
Адиабатный процесс . . . . .	84
Задачи . . . . .	86
Политропный процесс . . . . .	94
Задачи . . . . .	98
Глава VII. Второй закон термодинамики . . . . .	109
Энтропия идеального газа . . . . .	109
Максимальная работа . . . . .	112
Задачи . . . . .	113
Глава VIII. Круговые процессы . . . . .	126
Цикл Карно . . . . .	127
Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания . . . . .	128
Циклы газотурбинных установок . . . . .	130
Поршневые компрессоры . . . . .	133
Задачи . . . . .	139
Глава IX. Водяной пар . . . . .	170
Общие положения . . . . .	170
Сухой насыщенный пар . . . . .	170
Влажный насыщенный пар . . . . .	171
Перегретый пар . . . . .	172
Энтропия пара . . . . .	174
Задачи . . . . .	175
Энтропийные диаграммы для водяного пара . . . . .	185
Процессы изменения состояния водяного пара . . . . .	187
Задачи . . . . .	191
Глава X. Истечение газов и паров . . . . .	209
Истечение с учетом сопротивлений . . . . .	213
Дросселирование (мятие) газов и паров . . . . .	215
Задачи . . . . .	216
Глава XI. Циклы паросиловых установок . . . . .	230
Цикл с вторичным перегревом пара . . . . .	235
Теплофикационный цикл . . . . .	237
Регенеративный цикл . . . . .	237
Бинарный цикл . . . . .	241
Задачи . . . . .	243
Глава XII. Циклы холодильных установок . . . . .	261
Цикл воздушной холодильной установки . . . . .	262
Цикл паровой компрессорной холодильной установки . . . . .	264
Задачи . . . . .	268
Глава XIII. Влажный воздух . . . . .	280
Задачи . . . . .	287
Глава XIV. Термодинамика химических процессов . . . . .	296
Задачи . . . . .	303
Приложения . . . . .	316