



Е. Н. ФИЛАТОВ

# ФИЗИКА

# 10

---

Экспериментальный учебник

Часть 1

*Молекулярная физика. Термодинамика*

*Филатов Е.Н. Физика–10. Часть 1. Молекулярная физика. Термодинамика: Экспериментальный учебник для профильных физико-математических классов. М.: ВШМФ «Авангард», 2005. – 288 с.*

Учебник предназначен для учащихся 10-х профильных физико-математических классов. Главная цель учебника – научить учащихся самостоятельно решать задачи, поэтому большое количество задач предлагается для самостоятельного решения.

Все задачи условно разбиты на четыре категории сложности: легкие, средней трудности, трудные, очень трудные. Легкие задачи – это стандартные задачи из традиционных школьных учебников, а очень трудные соответствуют уровню вступительных экзаменов в наиболее престижные вузы Москвы: МФТИ, МГУ, МИФИ.

К большинству задач приведены ответы.

© *Филатов Е.Н., 2005*

© *Всероссийская школа математики и физики «Авангард», 2005*

## СОДЕРЖАНИЕ

От автора .....	4
§ 1. Тепловое расширение твердых тел и жидкостей.....	5
§ 2. Закон Бойля–Мариотта .....	21
§ 3. Законы Гей-Люссака и Шарля. Шкала Кельвина .....	44
§ 4. Уравнение Клайперона .....	54
§ 5. Моль. Закон Авогадро. Уравнение Менделеева–Клайперона .....	65
§ 6. Задачи повышенной трудности на применение газовых законов .....	78
§ 7. Давление смеси газов. Закон Дальтона .....	94
§ 8. Графические методы решения задач на газовые законы .....	103
§ 9. Работа, совершаемая газом .....	112
§ 10. Первое начало термодинамики .....	124
§ 11. Сколько у газа теплостоемостей? .....	136
§ 12. Коэффициент полезного действия тепловой машины .....	146
§ 13. Насыщенный пар и его свойства. Кипение. Критическая температура .....	160
§ 14. Абсолютная и относительная влажность .....	176
§ 15. Задачи на влажность повышенной трудности.....	191
§ 16. Масса и размеры молекул .....	202
§ 17. Сколько молекул в газе? .....	211
§ 18. Скорости молекул газа .....	218
§ 19. Внутренняя энергия газа .....	224
§ 20. Идеальный газ. Теоретический вывод уравнения состояния газа .....	232
§ 21. Силы поверхностного натяжения .....	246
§ 22. Эффект смачивания. Капиллярные явления .....	260
Приложения .....	273
Ответы .....	276

## § 11. СКОЛЬКО У ГАЗА ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ?

**Теплоемкостью** газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить газу, чтобы повысить его температуру на 1 К:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (11.1)$$

Единица измерения:  $[C] = \text{Дж/К}$ .

**Удельной теплоемкостью** газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг данного газа, чтобы повысить его температуру на 1 К:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}. \quad (11.2)$$

Единица измерения:  $[c] = \text{Дж/(К}\cdot\text{кг)}$ .

**Молярной теплоемкостью** газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить 1 молю данного газа, чтобы повысить его температуру на 1 К:

$$C_\mu = \frac{\Delta Q}{\Delta T\nu}. \quad (11.3)$$

Единица измерения:  $[C_\mu] = \text{Дж/(К}\cdot\text{моль)}$ .

*Читатель:* Зависит ли теплоемкость газа от того, в ходе какого процесса (изотермического, изохорического, адиабатического или какого-либо еще) изменялась температура?

*Автор:* Давайте рассуждать:  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$ .

$\Delta U = cv\Delta T$ , где  $c = \frac{3}{2}R$  для одноатомного газа и  $c = \frac{5}{2}R$  для двухатомного. Значит,  $\Delta U$  не зависит от процесса, в ходе которого изменяется температура.

$\Delta A = \int_V^{V+\Delta V} p(V)dV$  (площадь под графиком  $p(V)$ ) зависит от того, как именно повышена

температура. В частности, если  $V = \text{const}$ ,  $A = 0$ , если  $p = \text{const}$ ,  $A = p\Delta V$  и т.д.

Итак, *теплоемкость газа зависит от процесса, в ходе которого изменялась его температура.*

*Читатель:* Почему же, говоря о теплоемкости жидких и твердых тел, мы не делали оговорки о том, как повышалась их температура: при постоянном давлении, при постоянном и объеме или еще как-то?

*Автор:* Поскольку тепловое расширение твердых и жидких тел очень мало, *работа*, совершаемая ими при расширении  $A = p\Delta V$  много меньше изменения внутренней энергии  $p\Delta V \ll \Delta U$ . Поэтому можно считать, что для твердых и жидких тел всё подводимое тепло идет только на увеличение их внутренней энергии:

$$Q = \Delta U.$$

### Теплоемкость газа при постоянном объеме

**Одноатомный газ.** Пусть  $\nu$  молей одноатомного газа находятся при температуре  $T$ , тогда его внутренняя энергия равна  $U(T) = \frac{3}{2}\nu RT$ . Повысим температуру  $T$  на  $\Delta T$  при постоянном объеме,

тогда его внутренняя энергия будет  $U(T + \Delta T) = \frac{3}{2}\nu R(T + \Delta T)$ . Изменение внутренней энергии составит

$$\Delta U = U(T + \Delta T) - U(T) = \frac{3}{2}\nu R(T + \Delta T) - \frac{3}{2}\nu RT = \frac{3}{2}\nu R\Delta T.$$

Работа газа при этом равна  $\Delta A = p\Delta V = 0$ , так как  $V = \text{const}$ ;  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \frac{3}{2}\nu R\Delta T$ .

Тогда теплоемкость газа при постоянном объеме  $C_V = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\frac{3}{2} \nu R \Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2} \nu R$ . Итак:

$$C_V = \frac{3}{2} \nu R. \quad (11.4)$$

Заметим, что  $C_V$  не зависит от того, какой это газ.

*Молярная теплоемкость*  $C_V^\mu$  (теплоемкость одного моля) газа согласно формуле (11.3)

$C_V^\mu = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T} = \frac{C_V}{\nu} = \frac{3}{2} R$  – одинаковая величина для всех одноатомных газов. Итак:

$$C_V^\mu = \frac{3}{2} R. \quad (11.5)$$

Вычислим значение молярной теплоемкости:

$$C_V^\mu = \frac{3}{2} R = \frac{3}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \approx 12,5 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

*Удельная теплоемкость*  $C_V^{\text{уд}}$  (теплоемкость 1 кг) газа находится делением молярной теплоемкости на массу одного моля:

$$C_V^{\text{уд}} = \frac{C_V^\mu}{\mu}.$$

Проверим размерность:

$$[C_V^{\text{уд}}] = \frac{[C_V^\mu]}{[\mu]} = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} : \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}.$$

Для одноатомного газа

$$C_V^{\text{уд}} = \frac{\frac{3}{2} R}{\mu}. \quad (11.6)$$

Вычислим удельную теплоемкость некоторых одноатомных газов.

$$\text{He: } \mu^{\text{He}} = 0,004 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{He}}^{\text{уд}} = \frac{12,5}{0,004} = 3130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\text{Ne: } \mu^{\text{Ne}} = 0,020 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{Ne}}^{\text{уд}} = \frac{12,5}{0,020} = 635 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\text{Ar: } \mu^{\text{Ar}} = 0,040 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{Ar}}^{\text{уд}} = \frac{12,5}{0,040} = 313 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\text{Kr: } \mu^{\text{Kr}} = 0,084 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{Kr}}^{\text{уд}} = \frac{12,5}{0,084} = 149 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

**Замечание.** Полученные значения теоретические, их еще надо проверить экспериментально.

**Двухатомный газ.** Если считать внутреннюю энергию  $\nu$  молей двухатомного газа равной

$$U \cong \frac{5}{2} \nu RT, \text{ то проводя аналогичные рассуждения, получим: } C_V \cong \frac{5}{2} \nu R; \quad C_V^\mu \cong \frac{5}{2} R;$$

$$C_V^{\text{уд}} \cong \frac{\frac{5}{2} R}{\mu}.$$

Итак, молярная теплоемкость для всех двухатомных газов при условиях, близких к нормальным, равна

$$C_V^\mu = \frac{5}{2} R = \frac{5}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \approx 20,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Вычислим удельные (теоретические) теплоемкости для некоторых двухатомных газов:

$$\text{H}_2: \quad \mu^{\text{H}_2} = 0,002 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{H}_2}^{\text{уд}} = \frac{20,8}{0,002} = 10400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\text{O}_2: \quad \mu^{\text{O}_2} = 0,032 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{O}_2}^{\text{уд}} = \frac{20,8}{0,032} = 650 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\text{N}_2: \quad \mu^{\text{N}_2} = 0,028 \text{ кг/моль}; \quad C_{V\text{N}_2}^{\text{уд}} = \frac{20,8}{0,028} = 743 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

**Задача 11.1.** В закрытом сосуде находилось 20 г азота  $N_2$  и 32 г кислорода  $O_2$ . Найти изменение внутренней энергии смеси этих газов при ее охлаждении на 28 К.

$$\begin{aligned} m_1 &= 0,020 \text{ кг} \\ \mu_1 &= 0,028 \text{ кг/моль} \\ m_2 &= 0,032 \text{ кг} \\ \mu_2 &= 0,032 \text{ кг/моль} \\ C_V^\mu &= 5/2 R, \\ \Delta T &= -28 \text{ К} \\ \Delta U &= ? \end{aligned}$$

**Решение.**

$$\Delta U = \nu_1 C_V^\mu \Delta T + \nu_2 C_V^\mu \Delta T = \frac{5}{2} R \left[ \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right] \Delta T.$$

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{5}{2} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \times \\ &\times \left[ \frac{0,020 \text{ кг}}{0,028 \text{ кг/моль}} + \frac{0,032 \text{ кг}}{0,032 \text{ кг/моль}} \right] \cdot [-28 \text{ К}] = \\ &= -997 \text{ Дж} \approx -1,0 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } \Delta U = \frac{5}{2} R \left[ \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right] \Delta T \approx -1,0 \text{ кДж}.$$

СТОП! Решите самостоятельно: А1, А2, В8.

### Теплоемкость при постоянном давлении

Возьмем  $\nu$  молей газа (неважно, одно- или двухатомного) при температуре  $T$ . Будем нагревать его на  $\Delta T$ , одновременно давая расширяться так, чтобы его давление оставалось постоянным. Тогда  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$ .

Внутренняя энергия газа изменится так, как при изохорическом процессе, так как ее изменение не зависит от вида процесса, а определяется начальной и конечной температурой газа:

$$\Delta U = C_V \Delta T;$$

$$\Delta A = p \Delta V = \nu R \Delta T;$$

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A = C_V \Delta T + \nu R \Delta T;$$

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{C_V \Delta T + \nu R \Delta T}{\Delta T} = C_V + \nu R.$$

Итак:

$$C_p = C_V + \nu R. \quad (11.7)$$

Тогда для молярной теплоемкости ( $\nu = 1$ ) получим

$$C_p^\mu = C_V^\mu + R. \quad (11.8)$$

Для удельной теплоемкости

$$C_p^{\text{уд}} = \frac{C_p^\mu}{\mu} = \frac{C_V^\mu}{\mu} + \frac{R}{\mu} = C_V^{\text{уд}} + \frac{R}{\mu}.$$

Итак:

$$C_p^{\text{уд}} = C_V^{\text{уд}} + \frac{R}{\mu}. \quad (11.9)$$

Приведем экспериментальные значения теплоемкостей некоторых газов.

Теплоемкости газов при 20 °С

Газ	$\mu$ , кг/моль	$C_V^\mu$ , Дж/(моль·К)	$C_p^\mu$ , Дж/(моль·К)	$C_V^{уд}$ , Дж/(кг·К)	$C_p^{уд}$ , Дж/(кг·К)
He	0,004	12,5	20,8	3130	5200
Ar	0,040	12,5	20,8	313	520
Kr	0,084	12,5	20,8	149	248
Ne	0,020	12,7	21,1	635	1060
H <sub>2</sub>	0,002	20,6	28,9	10300	14500
O <sub>2</sub>	0,032	21,0	29,3	656	916
N <sub>2</sub>	0,028	20,8	29,1	743	1040
Воздух	0,029	20,7	29,0	713	1000
CO <sub>2</sub>	0,044	28,8	37,1	654,5	843

Сравнивая табличные данные с теоретическими значениями молярной теплоемкости  $C_V = 12,5$  Дж/(моль·К) для одноатомных газов и  $C_V = 20,8$  Дж/(моль·К) для двухатомных, видим, что наличие неполюное соответствие теории и практики.

**Задача 11.2.** В вертикальном сосуде с подвижным тяжелым поршнем находится  $\nu = 10$  моль одноатомного газа. Какое количество теплоты необходимо подвести к газу, находящемуся под давлением  $p = 1,0$  МПа, чтобы повысить его температуру на 10 К?

$p = 1,0$  МПа  
 $p = \text{const}$   
 $\nu = 10$  моль  
 $\Delta T = 10$  К  
 $C_V^\mu = 3/2 R$   
 $Q = ?$

**Решение.**

$$Q = \nu C_p^\mu \Delta T = \nu (C_V^\mu + R) \Delta T = \nu \left( \frac{3}{2} R + R \right) \Delta T =$$

$$= \nu \frac{5}{2} R \Delta T = 10 \text{ моль} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль·К)} \cdot 10 \text{ К} \approx$$

$$\approx 2,0 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Ответ:  $Q = \nu \frac{5}{2} R \Delta T \approx 2,0 \cdot 10^3$  Дж.

*Читатель:* А причем в задаче  $p = 1,0$  МПа?

*Автор:* А не причем! Это лишнее данное. Чтобы Вы обратили внимание на то, что  $Q$  от давления не зависит.

СТОП! Решите самостоятельно: А3, А4, В1, В7.

**Задача 11.3.** При адиабатическом расширении  $m = 1$  кг азота совершена работа  $A = 300$  Дж. На сколько уменьшились внутренняя энергия газа и его температура? Удельная теплоемкость азота при неизменном объеме  $C_V^{уд} = 743$  Дж/(кг·К).

$m = 1$  кг  
 $A = 300$  Дж  
 $C_V^{уд} = 743$  Дж/(кг·К)  
 $\mu = 0,028$  кг/моль  
 $Q = 0$   
 $(U_1 - U_2) = ?$   
 $(T_1 - T_2) = ?$

**Решение.**  $Q = 0 = A + (U_2 - U_1)$ , отсюда  $U_1 - U_2 = A = 300$  Дж.

Изменение внутренней энергии  $\Delta U = U_2 - U_1 = m C_V^{уд} \Delta T$ , так как внутренняя энергия данного газа определяется только изменением его температуры и не зависит от процесса. А значит, оно точно такое же, как при изохорическом процессе.

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{U_2 - U_1}{m C_V^{уд}}.$$

Тогда  $T_1 - T_2 = \frac{U_1 - U_2}{m C_V^{уд}} = \frac{300 \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot 743 \text{ Дж/(кг·К)}} \approx 0,4 \text{ К.}$

Ответ:  $U_1 - U_2 = A = 300$  Дж;  $T_1 - T_2 = \frac{U_1 - U_2}{m C_V^{уд}} \approx 0,4 \text{ К.}$

*Читатель:* Если одноатомный газ изотермически расширяется, то чему равна его теплоемкость?

*Автор:*  $C_T = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ , так как  $\frac{\Delta Q = \Delta A > 0}{\Delta T = 0}$ , то  $C_T \rightarrow \infty$ !

*Читатель:* А если одноатомный газ адиабатически расширяется, то в этом случае чему равна его теплоемкость?

*Автор:*  $C_{ад} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ . При адиабатическом процессе температура понижается  $\Delta T < 0$ , а  $\Delta Q = 0$ , поэтому  $\frac{\Delta Q = 0}{\Delta T < 0}$ ,  $C_{ад} = 0$ !

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### Задачи легкие

- A1.** Одинаковое ли количество теплоты необходимо для нагревания газа до одной и той же температуры в сосуде, прикрытом поршнем, если: 1) поршень не перемещается; 2) поршень легко подвижный?
- A2.** В цилиндре под поршнем находится кислород массы  $m = 2,0$  кг. Поршень закреплен. Какое количество теплоты  $Q$  надо сообщить кислороду, чтобы его температура повысилась на  $\Delta T = 5,0$  К? Найти увеличение внутренней энергии  $\Delta U$  и удельную теплоемкость кислорода в этом случае.
- A3.** Какое количество тепла необходимо для нагревания  $m = 7,0$  г азота от 10 до 25 °С? Газ находится в цилиндре под поршнем, на котором лежит постоянный груз. Молярная теплоемкость азота при нагревании его при постоянном объеме равна  $c_V = 21$  Дж/(моль·К).
- A4.** Азот  $N_2$  массой 200 г нагревают на 100 К сначала изобарно, а затем изохорно. Какое количество теплоты потребуется для этого в том и другом случаях?
- A5.** Азот нагревали при постоянном давлении. Зная, что масса азота равна 280 г, количество затраченного тепла равно 600 Дж и  $c_V = 745$  Дж/(кг·К), найти повышение температуры азота.
- A6.** При нагревании в постоянном объеме кислород имеет удельную теплоемкость  $c_V = 657$  Дж/(кг·К). Какова удельная теплоемкость кислорода при постоянном давлении?

### Задачи средней трудности

- B1.** Углекислый газ массой 10 г нагрет от 20 до 30 °С при постоянном давлении. Найти работу расширения газа и изменение его внутренней энергии.
- B2.** Кислород  $O_2$  массой 6,0 г при температуре 30 °С расширяется при постоянном давлении, увеличивая свой объем в 2 раза вследствие притока теплоты извне. Найти работу расширения, изменение внутренней энергии газа и количество теплоты, сообщенное кислороду.
- B3.** В вертикальном цилиндре под тяжелым поршнем находится кислород массы  $m = 2,0$  кг. Для повышения температуры кислорода на  $\Delta T = 5,0$  К ему было сообщено количество теплоты  $Q = 9160$  Дж. Найти удельную теплоемкость кислорода  $c_p$ , работу  $A$ , совершаемую им при расширении, и увеличение его внутренней энергии  $\Delta U$ . Молярная масса кислорода  $\mu = 0,032$  кг/моль.
- B4.** В теплоизолированном сосуде объема  $V = 5,6$  л находится кислород при температуре  $t_1 = 66$  °С и давлении  $p_1 = 0,25$  МПа. Для нагрева газа до температуры  $t_2 = 68$  °С ему требуется сообщить

количество теплоты  $Q = 21$  Дж. Какова удельная теплоемкость с кислорода при этих условиях? Молярная масса кислорода  $\mu = 0,032$  кг/моль. Тепловым расширением сосуда пренебречь.

- B5.** Температуру газа, имеющего массу  $m$  и молярную массу  $\mu$ , повышают на величину  $\Delta T$  один раз при постоянном давлении  $p$ , а другой раз при постоянном объеме  $V$ . Насколько отличаются сообщенные газу количества теплоты  $Q_p$ ,  $Q_V$  и удельные теплоемкости  $c_p$ ,  $c_V$  при постоянном давлении и постоянном объеме?
- B6.** В теплоизолированном цилиндре с поршнем находится азот массы  $m = 0,20$  кг при температуре  $t = 20$  °С. Азот, расширяясь, совершает работу  $A = 4,47$  кДж. Найти изменение внутренней энергии азота  $\Delta U$  и его температуру  $t_2$  после расширения. Удельная теплоемкость азота при постоянном объеме  $c_V = 745$  Дж/(кг·К).
- B7.** Для повышения температуры газа, имеющего массу  $m = 20$  кг и молярную массу  $\mu = 0,028$  кг/моль, на  $\Delta T = 50$  К при постоянном давлении необходимо затратить количество теплоты  $Q_p = 0,5$  МДж. Какое количество теплоты  $Q_V$  следует отнять от этого газа при постоянном объеме, чтобы его температура понизилась на  $\Delta T = 50$  К?
- B8.** Один моль кислорода нагревается при постоянном объеме от температуры  $t_0 = 0$  °С. Какое количество теплоты  $Q$  необходимо сообщить кислороду, чтобы его давление увеличилось в три раза? Удельная теплоемкость кислорода при постоянном объеме  $c_V = 657$  Дж/(кг·К). Молярная масса кислорода  $\mu = 0,032$  кг/моль.
- B9.** Воздух массой  $m = 50$  г нагревается при постоянном давлении от температуры  $T_0 = 290$  К. Какое количество теплоты  $Q$  необходимо сообщить воздуху, чтобы его объем увеличился в два раза? Считать, что удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_p = 1,018$  кДж/(кг·К).
- B10.** Давление азота в сосуде объема  $V = 3,0$  л после нагревания возросло на  $\Delta p = 2,2$  МПа. Найти количество теплоты  $Q$ , сообщенное газу. Удельная теплоемкость азота при постоянном объеме  $c_V = 745$  Дж/(кг·К), его молярная масса  $\mu = 0,028$  кг/моль.
- B11.** Газ, у которого  $m = 1$  кг,  $p = 2 \cdot 10^5$  Па и  $c_V = 700$  Дж/(кг·К), нагревали, давая ему расширяться. Какова удельная теплоемкость газа в этом процессе, если его температура повысилась на 2 К, а объем увеличился на  $0,001$  м<sup>3</sup>? (Предполагается, что газ имел достаточно большой объем и достаточно высокую температуру, поэтому его давление можно считать постоянным.)
- B12.** Решить задачу B11, считая, что газ нагревали в процессе сжатия и что его объем не увеличился на  $0,001$  м<sup>3</sup>, а уменьшился на эту величину.
- B13.** В цилиндре под поршнем находится некоторая масса воздуха. На его нагревание при постоянном давлении затрачено  $Q = 5,0$  кДж. Найти работу, произведенную при этом газом. Теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_p = 1,0 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), молекулярный вес воздуха принять равным 29.
- B14.** Какую работу совершил воздух массой 290 г при его изобарном нагревании на 20 К и какое количество теплоты ему при этом сообщили?
- B15.** Во сколько раз количество теплоты, которое идет на нагревание газа при постоянном давлении больше работы совершаемой газом при расширении? Удельная теплоемкость газа при постоянном давлении  $c_p$ , молярная масса  $\mu$ .

- В16.** Найдя по таблицам значения удельной теплоемкости воздуха  $c_p$  и зная молярную массу  $\mu$ , вычислите, во сколько раз большее количество теплоты потребуется для изобарного нагревания, чем для изохорного. Масса воздуха и разность температур в обоих случаях одинаковы.
- В17.** Какая часть количества теплоты, сообщенной одноатомному газу в изобарном процессе, идет на увеличение внутренней энергии и какая часть – на совершение работы?

### Задачи трудные

- С1.** При адиабатическом расширении азота его объем увеличился на 1 %. На сколько процентов изменилась его абсолютная температура и на сколько – давление? При нагревании в постоянном объеме азот имеет удельную теплоемкость  $c_V = 745$  Дж/(кг·К). (Учесть, что при увеличении объема на 1% давление изменяется очень мало.)
- С2.** Температура воды массы  $m = 1$  кг повышается на  $\Delta T = 1$  К. Найти увеличение внутренней энергии  $\Delta U_1$ , приходящееся на одну молекулу. Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2$  кДж/(кг·К), ее молярная масса  $\mu = 0,018$  кг/моль. Коэффициент объемного расширения воды  $\alpha = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ . Атмосферное давление  $p_0 = 0,10$  МПа.
- С3.** В процессе расширения азота его объем увеличился на 2%, а давление уменьшилось на 1%. Какая часть теплоты, полученной азотом, была превращена в работу? (При нагревании в постоянном объеме азот имеет удельную теплоемкость  $c_V = 745$  Дж/(кг·К).)
- С4.** Решить задачу С3, считая, что давление уменьшилось на: 1) 2%; 2) 2,5%.

### Задача очень трудная

- D1.** В гладкой горизонтально закрепленной трубе, профиль которой показан на рис. 11.1, находятся в равновесии два поршня, герметично прилегающие к стенкам трубы и соединенные между собой невесомым стержнем длины  $l = 0,40$  м. В объеме между поршнями, площади сечения которых  $S_1 = 0,10$  м<sup>2</sup> и  $S_2 = 0,30$  м<sup>2</sup>, находится газ, который начинают очень медленно нагревать, при этом поршни перемещаются из начального положения (рис. 11.1,а) в конечное (рис. 11.1,б). Найти приращение  $\Delta U = U_б - U_а$  внутренней энергии газа. Теплоемкость всей массы газа между поршнями  $C = 40$  Дж/К, атмосферное давление  $p_0 = 0,10$  МПа, начальная температура  $T_1 = 250$  К.

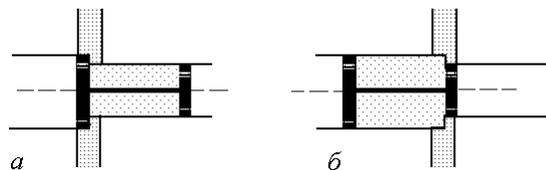


Рис. 11.1

## § 12. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

*Тепловой машиной называется периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет получаемого извне количества теплоты.*

### Условия, необходимые для работы тепловой машины

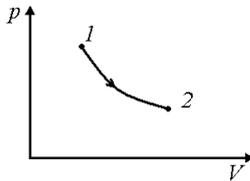


Рис. 12.1

1. Необходимо рабочее тело (газ), которое будет совершать механическую работу (рис. 12.1) (например, толкать поршень в цилиндре).

2. Рабочее тело должно периодически возвращаться в исходное состояние (рис. 12.2), т.е. процесс должен быть круговым (циклом).

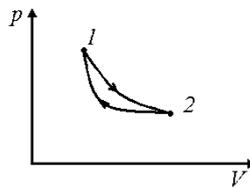


Рис. 12.2

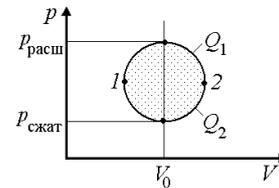


Рис. 12.3

3. Полная работа, совершенная рабочим телом за цикл, должна быть *положительной*, а для этого давление (а значит, и температура) при данном значении объема рабочего тела при расширении должно быть больше, чем при сжатии, т.е. процесс должен идти «по часовой стрелке» (рис. 12.3).

Пусть  $A_{12}$  – работа газа при расширении,  $A_{12} > 0$ , а  $A_{21}$  – работа газа при сжатии,  $A_{21} < 0$ , тогда полная работа за цикл

$$A = A_{12} + A_{21} > 0.$$

Пусть  $Q_1$  – количество теплоты, полученное газом за цикл, а  $Q_2$  – количество теплоты, отданное газом за цикл, тогда общее количество теплоты, полученное газом за цикл

$$Q = Q_1 - Q_2.$$

Пусть газ совершил цикл  $1-2-1$  (см. рис. 12.3). Согласно I началу термодинамики

$$Q = Q_1 - Q_2 = \underbrace{(A_{12} + A_{21})}_{=A} + \underbrace{(U_1 - U_1)}_{=0} \Rightarrow \boxed{Q_1 - Q_2 = A.} \quad (12.1)$$

Работа газа  $A$  равна разности между теплом, полученным и отданным рабочим телом.

4. Для того чтобы рабочее тело в рабочем цикле могло получать и отдавать тепло, необходимо наличие *нагревателя* и *холодильника*. Нагреватель с  $T_n > T_{\text{раб.тела}}$  отдает тепло рабочему телу, а холодильник с  $T_x < T_{\text{раб.тела}}$  получает тепло от рабочего тела.

Эффективность тепловой машины принято характеризовать коэффициентом полезного действия (КПД), который определяется как отношение совершаемой за цикл работы  $A$  к получаемому от нагревателя за цикл количества теплоты  $Q_1$ :

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (12.2)$$

КПД  $\eta < 1$  в любом случае, так как  $Q_2 > 0$ !

### Максимально возможный КПД тепловой машины

*Состояние термодинамической системы называется **равновесным**, если все параметры состояния ( $T, V, p$ ) имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени.*

*Если термодинамический процесс (т.е. переход системы из одного состояния в другое) протекает очень медленно, так, что все состояния, через которые проходит система, можно*

считать равновесными, такой процесс называется **равновесным**, или **квазистатическим**.

При изменении направления равновесного процесса (например, при замене сжатия газа расширением) система будет проходить через те же равновесные состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Поэтому равновесные процессы называют также **обратимыми**.

Теоретически доказано, что максимальный КПД имеет тепловая машина, цикл которой состоит из обратимых процессов.

Сади Карно доказал, что при фиксированных температурах нагревателя и холодильника ( $T_2$  и  $T_1$ ) возможен только один обратимый цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Этот цикл называют **циклом Карно** (рис. 12.4).

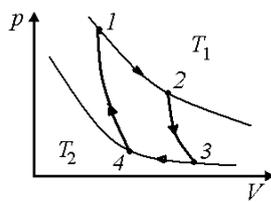


Рис. 12.4

КПД такого цикла не зависит от конструкции теплового двигателя и определяется по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (12.3)$$

где  $T_1$  – температура нагревателя;  $T_2$  – температура холодильника.

КПД любой тепловой машины, цикл которой состоит из необратимых процессов,

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

СТОП! Решите самостоятельно: А1–А3, В1–В3.

### Практическая конструкция тепловой машины

Возьмем вертикальный цилиндр с плотно подогнанным поршнем, который может фиксироваться в двух положениях: верхнем и нижнем. Под поршнем находится газ. Заставим его совершать полезную работу – поднимать гирию с нижнего уровня на верхний в циклическом режиме (рис. 12.5).

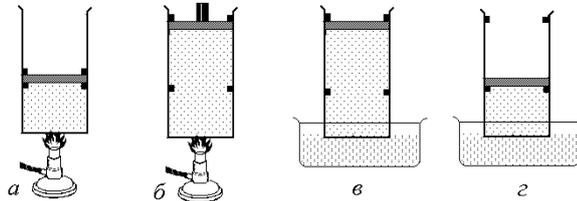


Рис. 12.5

1. Пусть в начальный момент газ имеет давление  $p_0$  и объем  $V_0$ . Зафиксируем поршень в нижнем положении (рис. 12.5,а) и будем нагревать его пламенем спиртовки изохорически, пока давление не повысится до значения  $2p_0$  (1–2 на рис. 12.6).

2. Поставим на поршень гирию (ее вес должен быть таков, что  $mg/S + p_{\text{атм}} \leq 2p_0$ ), освободим поршень и будем продолжать нагревать его уже изотермически (т.е. поддерживая давление постоянным) так, чтобы газ расширился до объема  $2V_0$  (рис. 12.5,б, 2–3 на рис. 12.6).

3. После того как поршень дойдет до верхнего положения, зафиксируем его и снимем гирию (газ уже совершил полезную работу). Теперь надо вернуть его в исходное положение. Для этого поставим цилиндр в холодную воду (рис. 12.5,в) и будем охлаждать рабочее тело изохорически, пока его давление не уменьшится до  $p_0$  (3–4 на рис. 12.6).

4. После того как давление газа понизится до  $p_0$ , освободим поршень и будем продолжать охлаждать газ так, чтобы он изобарически сжался до исходного объема  $V_0$  (рис. 12.5,г, 4–1 на рис. 12.6).

Цикл завершен, рабочее тело вернулось в исходное положение.

**Задача 12.1.** Под поршнем в рассмотренном нами цикле находится одноатомный газ. Значения  $p_0$  и  $V_0$  заданы. Рассчитать КПД цикла.

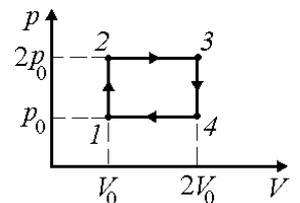


Рис. 12.6

$$\frac{p_0}{V_0} \quad \eta = ?$$

**Решение.**

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

Работу газа вычислим как площадь внутри цикла

$$A = (2p_0 - p_0)(2V_0 - V_0) = p_0V_0;$$

 $Q_1$  – полученное тепло.Заметим, что газ получает тепло на участках 1–2 и 2–3:  $Q_1 = Q_{12} + Q_{23}$ .

Учитывая, что согласно закону Менделеева–Клайперона

$$\nu R(T_2 - T_1) = p_2V_2 - p_1V_1,$$

находим:

$$\begin{aligned} Q_{12} &= A_{12} + (U_2 - U_1) = 0 + \frac{3}{2}\nu R(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1) = \\ &= \frac{3}{2}(2p_0V_0 - p_0V_0) = \frac{3}{2}p_0V_0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{23} &= A_{23} + (U_3 - U_2) = \underbrace{2p_0(2V_0 - V_0)}_{=A} + \frac{3}{2}(p_3V_3 - p_2V_2) = \\ &= 2p_0V_0 + \frac{3}{2}(2p_0 \cdot 2V_0 - 2p_0V_0) = 2p_0V_0 + 3p_0V_0 = 5p_0V_0 \end{aligned}$$

$$Q_1 = Q_{12} + Q_{23} = \frac{3}{2}p_0V_0 + 5p_0V_0 = \frac{13}{2}p_0V_0.$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{p_0V_0}{\frac{13}{2}p_0V_0} = \frac{2}{13}.$$

$$\text{Ответ: } \eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{2}{13}.$$

**Читатель:** А каким бы был КПД нашей тепловой машины, если бы при тех же температурах холодильника (воды) и нагревателя (пламени спиртовки) она была идеальной, т.е. работала по циклу Карно?

**Автор:** Во-первых, температура холодильника должна быть не выше, чем в точке 1, иначе мы не охладим газ до точки 1. Во-вторых, температура нагревателя должна быть не ниже, чем в точке 3, иначе мы не нагреем газ до точки 3. Запишем уравнение Менделеева–Клайперона для точек 1 и 3:

$$\begin{aligned} 1: p_0V_0 &= \nu RT_{\text{хол}}, \\ 3: 2p_0 \cdot 2V_0 &= \nu RT_{\text{нагр}}, \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = \frac{p_0V_0}{4p_0V_0} = \frac{1}{4}.$$

Вычислим КПД по формуле (12.3)

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4} > \frac{2}{13}!$$

СТОП! Решите самостоятельно: С5.

**Задача 12.2.** Найти КПД тепловой машины, рабочий цикл которой изображен на рис. 12.8. Газ одноатомный,  $p_0, V_0$  заданы.

$$\frac{p_0}{V_0} \quad \eta = ?$$

**Решение.**  $\eta = \frac{A}{Q_1}$ ,  $Q_1$  – то же(!) что и в задаче

12.1, так как газ получает тепло только на участках 1–2 и 2–3. Работа газа за цикл равна площади цикла:

$$A = S_{\Delta} = \frac{1}{2}p_0V_0.$$

Отсюда

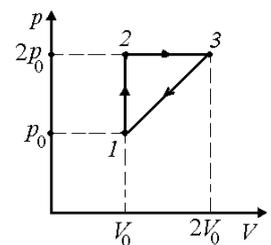


Рис. 12.8

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{\frac{1}{2} p_0 V_0}{\frac{13}{2} p_0 V_0} = \frac{1}{13}.$$

Ответ:  $\eta = \frac{1}{13}$ .

**Задача 12.3.** Найти КПД тепловой машины, рабочий цикл которой изображен на рис. 12.8. Газ одноатомный,  $p_0, V_0$  заданы.

$p_0$	<b>Решение.</b> Газ получает тепло только на участке 1–2: $Q_1 = Q_{12} = A_{12} + (U_2 - U_1)$ . $A_{12}$ – это площадь под графиком на участке 1–2, ее можно вычислить как сумму площади прямоугольника
$V_0$	
$\eta = ?$	

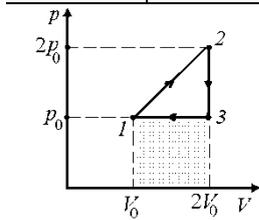


Рис. 12.9

$p_0 V_0$  и треугольника  $\frac{1}{2} p_0 V_0$ :

$$A_{12} = \frac{3}{2} p_0 V_0;$$

$$U_2 - U_1 = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) = \frac{3}{2} (2p_0 \cdot 2V_0 - p_0 V_0) = \frac{9}{2} p_0 V_0;$$

$$Q_{12} = A_{12} + (U_2 - U_1) = \frac{3}{2} p_0 V_0 + \frac{9}{2} p_0 V_0 = \frac{12}{2} p_0 V_0 = 6 p_0 V_0.$$

Работа газа за цикл – площадь треугольника:  $A = S_{\Delta} = \frac{1}{2} p_0 V_0$ , тогда  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{\frac{1}{2} p_0 V_0}{6 p_0 V_0} = \frac{1}{12}$ .

Ответ:  $\eta = \frac{1}{12}$ .

СТОП! Решите самостоятельно: С6.

**Задача 12.4.** В паровой турбине расходуется 0,35 кг дизельного топлива на 1 кВт·ч. Температура поступающего в турбину пара 250 °С, температура холодильника 30 °С. Вычислить фактический КПД турбины и сравнить его с КПД идеальной тепловой машины, работающей при тех же температурных условиях. Удельная теплота сгорания дизельного топлива  $q = 42$  МДж/кг.

$m = 0,35$ кг
$q = 42 \cdot 10^6$ Дж/кг
$T_1 = 250$ °С = 523 К
$T_2 = 30$ °С = 303 К
$A = 1$ кВт·ч =
= 1000 Вт·3600 с =
= $3,6 \cdot 10^6$ Дж
$\eta_{\text{факт}}/\eta_{\text{ид}} = ?$

**Решение.**

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{A}{mq} = \frac{3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{0,35 \text{ кг} \cdot 42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}} \approx 0,24,$$

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{523 \text{ К} - 303 \text{ К}}{523 \text{ К}} \approx 0,42,$$

$$\eta_{\text{факт}}/\eta_{\text{ид}} = 0,24 : 0,42 \approx 0,57.$$

Ответ:  $\eta_{\text{факт}}/\eta_{\text{ид}} \approx 0,57$ .

СТОП! Решите самостоятельно: А4, В5.

### Реальные тепловые машины

С XVIII века тепловые машины полностью преобразили промышленность. Сначала это были поршневые машины, в которых рабочим телом был только пар (*паровоз, пароход*), потом появились *паросиловые станции* (электростанции). Затем пар стал заменяться газами, образующимися от сгорания топлива, появились *бензиновый двигатель внутреннего сгорания*

(ДВС), *двигатель Дизеля* (дизель), *реактивные двигатели*.

Во всех этих машинах рабочее тело либо испытывало фазовый переход (пар превращался в воду, вода – в пар), либо после завершения цикла рабочее тело (газ) удалялось из двигателя и заменялось на новое.

Схема паросиловой станции показана на рис. 12.10.

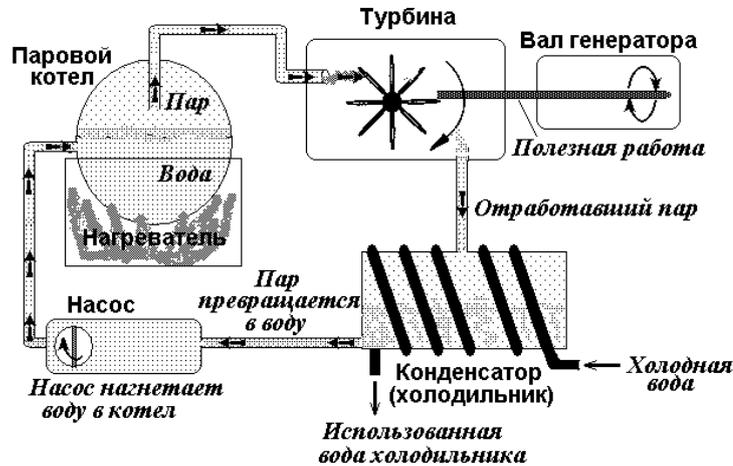


Рис. 12.10

## Холодильная установка

*Читатель:* Можно ли передать тепло от более холодного тела к более горячему?

*Автор:* Теплообменом – нет. А вообще – да. Предположим, что у нас есть два одинаковых цилиндра. В одном цилиндре холодный газ, в другом – горячий. Как сделать холодный газ еще холоднее, а горячий – еще горячее?

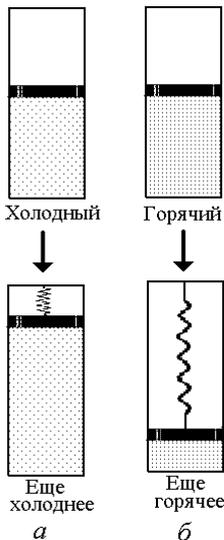


Рис. 12.11

**Идея.**

1. Дадим возможность холодному газу, расширяясь, сжать пружину. Газ, совершив работу, еще сильнее охладится (рис. 12.11,а).

2. Дадим возможность пружине, разжимаясь, сжать горячий газ, при этом он станет еще горячее (рис. 12.11,б).

*Идея холодильника: тепловая машина обращается вспять!*

Пусть имеется тепловая машина с циклом 1–2–1 (рис. 12.12,а), получающая за цикл тепло  $Q_1$  у нагревателя, отдающая тепло  $Q_2$  холодильнику и совершающая положительную работу  $A > 0$  (в координатах  $p, V$  процесс идет по часовой стрелке).

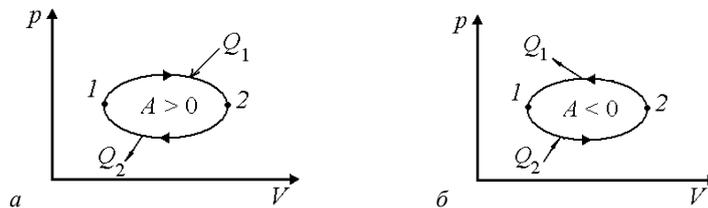


Рис. 12.12

Пусть машину в обратную сторону: сами совершим над рабочим телом работу  $A > 0$  (соответственно, рабочее тело совершит работу  $(-A) < 0$ ). Заставим рабочее тело забрать теплоту  $Q_2$  у холодильника и отдать теплоту  $Q_1$  нагревателю (рис. 12.12,б)! Вот вам и периодически работающий холодильник.

*Читатель:* Как это сделать чисто практически?

*Автор:* Рассмотрим следующую схему холодильника (рис. 12.13). Заставим рабочее тело отбирать тепло у воды при  $0^\circ\text{C}$  (и тем самым замораживать её) и отдавать это тепло воде при  $100^\circ\text{C}$  (тем самым превращать ее в пар).

Возьмем вертикальный цилиндр с поршнем, который можно перемещать вверх–вниз и у которого стенки теплоизолированы, а дно хорошо проводит тепло (рис. 12.14,а).

1. Пусть в начальный момент газ под поршнем находится в объеме  $V_1$  при температуре  $T_1 = -100^\circ\text{C}$ . Поставим цилиндр в воду со льдом при  $0^\circ\text{C}$ . Вода будет охлаждаться (и замерзает), а газ нагреется до  $T_2 = 0^\circ\text{C}$  (рис. 12.14,б) при  $V_1 = \text{const}$  (изохора 1–2 на рис. 12.13).

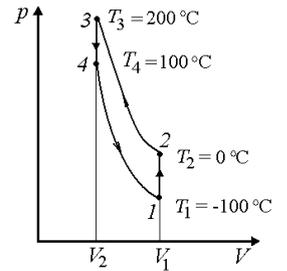


Рис. 12.13

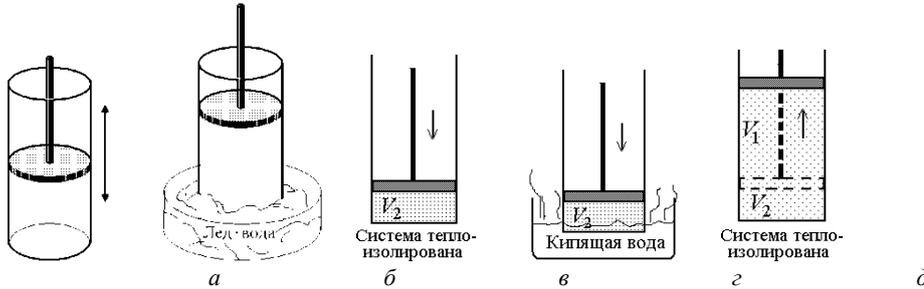


Рис. 12.14

2. Резко сожмем газ (совершив работу) так, чтобы он нагрелся до  $T_3 = 200^\circ\text{C}$  (без подвода тепла, адиабатически) (рис. 12.14,в). При этом объем газа уменьшится до  $V_2 < V_1$  (адиабата 2–3 на рис. 12.13).

3. Поставим цилиндр в кипящую воду при  $100^\circ\text{C}$  (рис. 12.14,г). Вода будет кипеть и испаряться, а газ – охлаждаться изохорически ( $V_2 = \text{const}$ ) до  $T_4 = 100^\circ\text{C}$  (изохора 3–4 на рис. 12.13).

4. Дадим газу адиабатически расшириться до объема  $V_1$  так, чтобы температура понизилась до  $T_1 = -100^\circ\text{C}$ . Газ вернулся в исходное состояние (адиабата 4–1 на рис. 12.13).

Эффективность холодильной установки определяется холодильным коэффициентом:

$$\mu = \frac{\text{Количество теплоты, взятой у холодильника}}{\text{Работа, совершенная над рабочим телом}}$$

или

$$\mu = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (12.4)$$

где  $Q_1$  – теплота, отданная нагревателю;  $Q_2$  – теплота, полученная от холодильника;  $A = Q_1 - Q_2$  – работа, совершенная над рабочим телом.

**Задача 12.5.** В комнате работает холодильник. За время  $t$  он потребляет от электросети энергию  $W$  и забирает от охлаждаемых продуктов (и всего остального, что находится внутри него) теплоту  $Q_2$ . Какую теплоту при этом холодильник передает окружающему воздуху?

$\frac{W}{Q_2}$ $Q_1 = ?$	<b>Решение.</b> Пусть $Q$ – общая теплота, полученная рабочим телом холодильника за время $t$ , ( $U_2 - U_1$ ) – изменение внутренней энергии рабочего тела. Тогда согласно I началу термодинамики
------------------------------	---

$$Q = A + (U_2 - U_1). \quad (1)$$

$$Q = Q_2 - Q_1,$$

где  $Q_2$  – тепло, полученное рабочим телом от охлаждаемых предметов;  $Q_1$  – тепло, переданное рабочим телом нагревателю (в конечном счете – воздуху в комнате).

$A = -|A|$  – работа, совершенная рабочим телом, отрицательна:  $A < 0$ . Так как работа над рабочим телом совершается за счет электроэнергии, то  $|A| = W$  или  $A = -W$ .

Так как рабочее тело совершает периодический процесс, постоянно возвращаясь в исходное состояние, то

$$U_2 - U_1 = 0.$$

Тогда из (1) следует

$$Q_2 - Q_1 = -W + 0 = -W \Rightarrow Q_1 = Q_2 + W.$$

Таким образом, нагреватель (воздух в комнате) получит не только тепло, которое рабочее тело

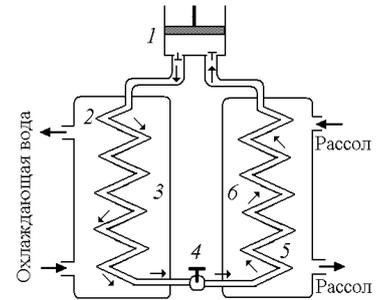
отобрало у охлаждаемых продуктов, но и всю электроэнергию, которая тратится на работу холодильника.

*Ответ:*  $Q_1 = Q_2 + W$ .

СТОП! Решите самостоятельно: А5–А7, В6, С3.

### Как устроен реальный холодильник

Рассмотрим схему холодильника на рис. 12.15. Компрессор 1 нагнетает пары аммиака под давлением 12 атм в змеевик 2. При сжатии пары аммиака нагреваются, поэтому в баке 3 они охлаждаются проточной водой и превращаются в жидкость. Из змеевика 2 аммиак через вентиль 4 поступает в змеевик 5 (испаритель), где поддерживается давление в 3 атм. При прохождении через вентиль часть аммиака испаряется, и температура понижается до  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ . Из испарителя 5 аммиак отсасывается компрессором. Испаряясь, аммиак заимствует теплоту, необходимую для испарения, от окружающего испаритель в баке 6 соляного раствора (рассола). Вследствие этого рассол охлаждается до  $-8\text{ }^\circ\text{C}$  и играет роль холодного тела, отдающего тепло горячей проточной воде в баке 3. Струя охлажденного рассола направляется по трубам в охлаждаемое помещение.



### ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

#### Задачи легкие

- А1.** Может ли быть равен единице КПД идеальной тепловой машины?
- А2.** Станет ли КПД тепловой машины равным 100 %, если трение в частях машины свести к нулю?
- А3.** За один цикл тепловой двигатель потребляет теплоту  $Q_1$  и совершает работу  $A$ . Каков КПД этого двигателя?
- А4.** Во сколько раз максимально возможный КПД двигателя внутреннего сгорания больше максимально возможного КПД паровой машины, работающей на перегретом паре при температуре  $t_1 = 300\text{ }^\circ\text{C}$ , если температура газов в цилиндре двигателя достигает  $t_2 = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ? Отработанные газ и пар имеют одинаковые температуры  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ .
- А5.** Можно ли увеличить внутреннюю энергию горячего тела за счет уменьшения внутренней энергии холодного тела?
- А6** Как изменится температура воздуха в комнате, если оставить холодильник открытым?
- А7.** На что расходуется электроэнергия, потребляемая домашним холодильником?

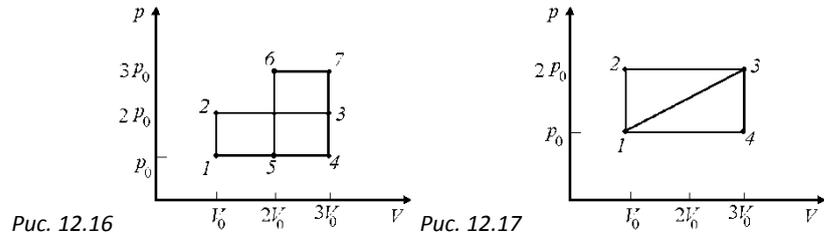
#### Задачи средней трудности

- В1.** Температура нагревателя идеальной тепловой машины  $117\text{ }^\circ\text{C}$ , а холодильника  $27\text{ }^\circ\text{C}$ . Количество теплоты, получаемой машиной от нагревателя за 1 с, равно 60 кДж. Вычислить КПД машины, количество теплоты, отдаваемой холодильнику в 1 с, и мощность машины.

- В2.** В идеальной тепловой машине за счет каждого килоджоуля энергии, получаемой от нагревателя, совершается работа 300 Дж. Определить КПД машины и температуру нагревателя, если температура холодильника 280 К.
- В3.** В идеальной тепловой машине количество теплоты, полученное от нагревателя, равно 6,3 кДж. 80 % этой теплоты передается холодильнику. Найти КПД машины и работу за один цикл.
- В4.** Идеальная тепловая машина получает от нагревателя, температура которого 500 К, за один цикл 3360 Дж теплоты. Найти количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику, температура которого 400 К. Найти работу машины за один цикл.
- В5.** В цилиндре двигателя внутреннего сгорания при работе образуются газы, температура которых  $t_1 = 727$  °С. Температура отработанного газа  $t_2 = 100$  °С. Двигатель расходует в единицу времени массу  $m_\tau = 36$  кг/ч топлива. Какую максимальную полезную мощность может развивать этот двигатель? Удельная теплота сгорания топлива  $q = 43$  МДж/кг.
- В6.** Холодильник имеет мощность 160 Вт и производительность 2,0 ккал «холода» в 1 мин. (Холодильник используется для приготовления льда.) Сколько тепла сообщает он за 1,0 мин комнате, в которой установлен?

### **Задачи трудные**

- С1.** Идеальная тепловая машина Карно, цикл которой совершается в обратном направлении (холодильная машина), использует воду при 0 °С в качестве холодильника и воду при 100 °С в качестве нагревателя. Сколько воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар 500 г воды в кипяильнике?
- С2.** Можно ли всю теплоту, взятую от теплового резервуара превратить в работу?
- С3.** За время  $\tau = 1$  ч в холодильнике превращается в лед при температуре  $t_0 = 0$  °С масса воды  $m = 3,6$  кг, имевшая начальную температуру  $t = 20$  °С. Какая мощность  $N$  потребляется холодильником от электросети, если он отдает в окружающее пространство в единицу времени энергию  $Q_\tau = 840$  Дж/с? Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2$  кДж/(кг·К). Удельная теплота плавления льда  $\lambda = 0,33$  МДж/кг.
- С4.** Сколько тепла выделится в комнате за 4 ч работы холодильника, потребляющего мощность  $W = 90$  Вт, если его производительность – 2,0 кг льда при температуре  $T_1 = 271$  К в сутки, а охлаждение начинается с температуры  $T = 293$  К. Удельная теплота плавления льда  $\lambda = 3,34 \cdot 10^5$  Дж/кг, теплоемкость воды  $c_v = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К); теплоемкость льда  $c_l = 2,1 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К).
- С5.** Определите отношение  $\eta_1/\eta_2$  коэффициентов полезного действия двух циклических процессов, проведенных с идеальным газом (рис. 12.16), первый процесс 1—2—3—4—1, второй процесс 5—6—7—4—5.



- С6. На диаграмме (рис. 12.17) изображены два цикла, которые проводят с одноатомным идеальным газом:  $1-2-3-1$  и  $1-3-4-1$ . У какого из циклов КПД больше и во сколько раз?

**Задача очень трудная**

- D1. Тепловой двигатель представляет собой наполненный газом цилиндр с поршнем, движение которого ограничено упорами  $AA$  и  $BB$  (рис. 12.18). Газ медленно нагревают, пока поршень не коснется упоров  $BB$ , после чего основание пружины смещают из положения  $CC$  в положение  $DD$ . Затем сосуд медленно охлаждают до тех пор, пока поршень не коснется упоров  $AA$ . Тогда основание пружины смещают назад до  $CC$ , цилиндр нагревают снова и т.д.

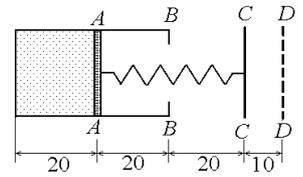


Рис. 12.18