

## Основные формулы

1. Уравнение состояния идеального газа (Менделеева – Клапейрона)

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

2. Внутренняя энергия

↗ одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV$$

↘ двухатомного газа

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{5}{2} pV$$

3. Работа газа

$$A' = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T$$

4. Работа внешних сил

$$A = -A' = p(V_1 - V_2)$$

## Основные формулы

### 5. Количество теплоты

при нагревании и  
охлаждении

$$Q = cm\Delta T$$

при горении

$$Q = qm$$

при плавлении и  
кристаллизации

$$Q = \lambda m$$

при  
парообразовании  
и конденсации

$$Q = rm$$

## Основные формулы

6. Первый закон термодинамики

$$\Delta U = A + Q$$

$$Q = \Delta U + A'$$

7. КПД тепловых двигателей

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

$$A' = Q_1 - |Q_2|$$

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

**Задача 1.** В стальном баллоне находится гелий массой 0,5 кг при температуре 10 °С. Как изменится внутренняя энергия гелия, если его температура повысится до 30 °С?

Дано:

$$m = 0,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 30^\circ\text{C}$$

$$M = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$$

$\Delta U = ?$

$$T = t + 273$$

$$\Delta t = \Delta T$$

“СИ”

$$T_1 = 283^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 303^\circ\text{K}$$

Решение.

$$U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1.$$

$$U_2 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2.$$

Найдём изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

$$\Delta U = \frac{3 \cdot 0,5 \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж/моль К} \cdot 20^\circ\text{K}}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \approx 31,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 31,2 \text{ кДж}$$

**Ответ:  $\Delta U = 31,2 \text{ Дж}$ .**

**Задача 2.** Какова внутренняя энергия 5 моль кислорода при 10 °С?

Дано:

$\nu = 5$  моль

$t = 10$  °С

$R = 8,31$  Дж/моль К

$U = ?$

“СИ”

283 °К

Решение.

Кислород  $O_2$  – двухатомный газ.

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT ,$$

$$\nu = \frac{m}{M} \text{ - количество вещества.}$$

$$U = \frac{5}{2} \nu RT .$$

$$U = \frac{5}{2} \cdot 5 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}} \cdot 10^\circ \text{К} =$$
$$= 1038,75 \text{ Дж} \approx 1,04 \text{ кДж} .$$

**Ответ:  $U = 1,04$  кДж**

**Задача 3.** Какова внутренняя энергия гелия, заполняющего аэростат объёмом  $50 \text{ м}^3$  при давлении  $60 \text{ кПа}$ ?

Дано:

$$V = 50 \text{ м}^3$$

$$p = 60 \text{ кПа}$$

$U = ?$

“СИ”

$$8 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Решение.

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

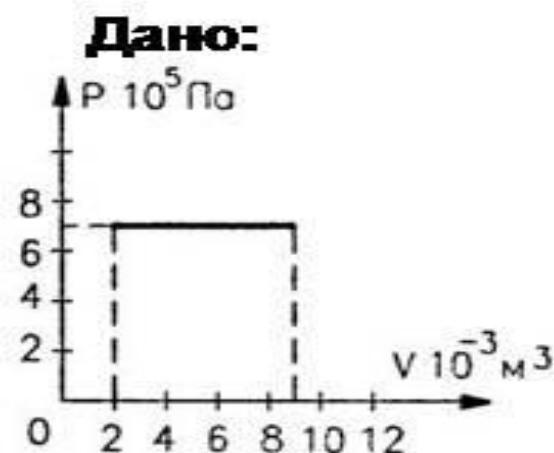
$$pV = \frac{m}{M} RT \quad \text{-уравнение Менделеева-Клапейрона}$$

$$U = \frac{3}{2} pV .$$

$$U = \frac{3 \cdot 60 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot 50 \text{ м}^3}{2} = 6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 6 \text{ МДж} .$$

**Ответ:  $U = 6 \text{ МДж}$**

**Задача 4.** На рисунке приведён график зависимости давления газа от объёма. Найдите работу газа при расширении.



**Найти:  $A'$  -?**

**Решение.**

Газ расширяется изобарно, поэтому работа газа:

$$A' = p\Delta V = p(V_2 - V_1).$$

Значения  $p$ ,  $V_1$  и  $V_2$  найдём из графика:

$$p = 7 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

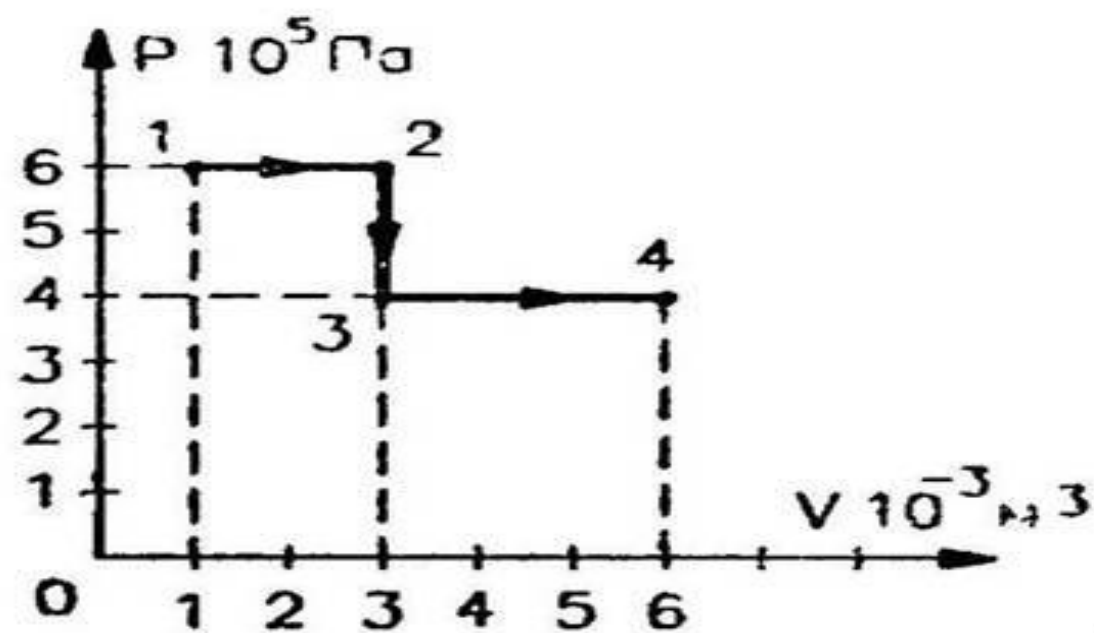
Тогда:

$$\begin{aligned} A' &= 7 \cdot 10^5 \text{ Па} (9 - 2) 10^{-3} \text{ м}^3 = \\ &= 49 \cdot 10^2 \text{ Дж} = 4,9 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

**Ответ:  $A' = 4,9 \text{ кДж}$**

**Задача 5.** Идеальный газ переходит из состояния 1 в состояние 4 так, как показано на рисунке. Вычислите работу, совершаемую газом.

**Дано:**



**Найти:**  $A'$  - ?

$$A' = 6 \cdot 10^5 (3 - 1) \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^5 (6 - 3) \cdot 10^{-3} = 24 \cdot 10^2 = 2,4 \text{ кДж.}$$

**Ответ:**  $A' = 2,4$  кДж.

**Решение.**

$$A' = A_{12} + A_{23} + A_{34}$$

$$A_{12} = p_1 (V_2 - V_1)$$

$$A_{23} = 0, \text{ т.к. } \Delta V = 0$$

$$A_{34} = p_3 (V_4 - V_3)$$

$$A' = A_{12} + A_{34}$$



**Задача 6.** Какую работу совершает идеальный газ в количестве 2 моль при его изобарном нагревании на 5 °С?

Дано:

$\nu = 2$  моль

$p = \text{const}$

$\Delta t = 5$  °С

$R = 8,31$  Дж/мольК

$A' = ?$

“СИ”

$\Delta T = 5$  °К

Решение.

$$A' = p \Delta V$$

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1; pV_2 = \frac{m}{M} RT_2$$

$$pV_2 - pV_1 = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

$$p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T \Rightarrow A' = \frac{m}{M} R \Delta T$$

$$\nu = \frac{m}{M}$$

$$A' = \nu R \Delta T$$

$$A' = 2 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}} \cdot 5^\circ \text{К} = 83,1 \text{ Дж}$$

**Ответ:**  $A' = 83,1$  Дж

**Задача 7.** Для приготовления ванны вместимостью 200 л смешали холодную воду при температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  с горячей водой при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какие объёмы той и другой воды надо взять, чтобы температура установилась  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

**Дано:**

$$V = 200 \text{ л}$$

$$t_{1\text{хол}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{2\text{гор}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$c = 4200 \text{ Дж/кг}^{\circ}\text{K}$$

$$V_1 - ?$$

$$V_2 - ?$$

**“СИ”**

$$0,2 \text{ м}^3$$

$$T_{1\text{хол}} = 283\text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{2\text{гор}} = 333\text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T = 313\text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta t^{\circ}\text{C} = \Delta T^{\circ}\text{K}$$

**Примечание:** холодную и горячую воду можно рассматривать как замкнутую систему тел, так как при данных условиях нет теплообмена с окружающей средой.

**Решение.**

Количество теплоты, полученное холодной водой:  $Q_1 = cm_1(t - t_1)$

Количество теплоты, отданное горячей водой:

$$Q_2 = cm_2(t - t_2) \quad \text{или} \quad -Q_2 = cm_2(t_2 - t)$$

Уравнение теплового баланса:  $Q_1 - Q_2 = 0 \Rightarrow Q_1 = Q_2$

$$m = m_1 + m_2 \Rightarrow m_1 = m - m_2$$

$$(m - m_2)(t - t_1) = m_2(t_2 - t)$$

$$(m - m_2)(40 - 10) = m_2(60 - 40)$$

$$30(m - m_2) = 20m_2$$

$$30m - 30m_2 = 20m_2$$

$$50m_2 = 30m = 30\rho V \Rightarrow m_2 = \frac{30\rho V}{50} = 120 \text{ кг}$$

$$m_1 = 200 - 120 = 80 \text{ кг}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V_1 = \frac{80 \text{ кг}}{10^3 \text{ кг/м}^3} = 0,08 \text{ м}^3 = 80 \text{ л}$$

$$V_2 = \frac{120 \text{ кг}}{10^3 \text{ кг/м}^3} = 0,12 \text{ м}^3 = 120 \text{ л}$$

**Ответ:**  $V_1 = 80 \text{ л}$   
 $V_2 = 120 \text{ л}$

**Задача 8.** В сосуд, содержащий воду массой 1,5 кг при температуре 15 °С, впускают водяной пар массой 200 г при температуре 100 °С. Какая общая температура установится после конденсации пара?

Дано:

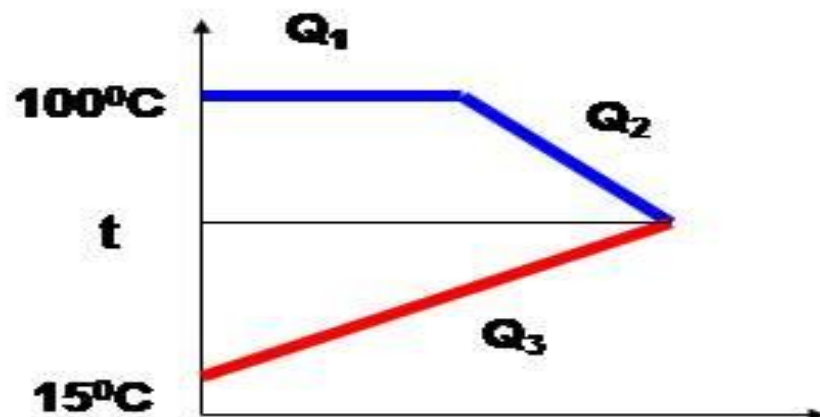
$m_1 = 1,5 \text{ кг}$   
 $m_2 = 200 \text{ г}$   
 $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{С}$   
 $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{С}$   
 $c = 4200 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{К}$   
 $r = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$

$t - ?$

“СИ”

$0,2 \text{ кг}$   
 $288 \text{ }^\circ\text{К}$   
 $373 \text{ }^\circ\text{К}$

Решение.



Количество теплоты, выделившееся при конденсации пара:

$$Q_1 = -rm_2$$

Количество теплоты, выделившееся при охлаждении воды, полученной из пара:

$$Q_2 = -cm_2(t_2 - t)$$

Количество теплоты, полученное холодной водой:

$$Q_3 = cm_1(t - t_1)$$

Запишем уравнение теплового баланса:  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$

или  $-rm_2 - cm_2(t_2 - t) + cm_1(t - t_1) = 0$

Преобразуем выражение и выразим конечную температуру  $t$ .

$$-rm_2 - cm_2t_2 + cm_2t + cm_1t - cm_1t_1 = 0$$

$$ct(m_1 + m_2) = cm_1t_1 + cm_2t_2 + rm_2$$

$$t = \frac{c(m_1t_1 + m_2t_2) + rm_2}{c(m_1 + m_2)}$$

$$t = \frac{4200(1,5 \cdot 15 + 0,2 \cdot 100) + 2,3 \cdot 10^6 \cdot 0,2}{4200(1,5 + 0,2)} = 57^\circ \text{C}$$

**Ответ:  $t = 57^\circ \text{C}$**

**Задача 9.** При изотермическом расширении идеальным газом совершена работа 15 кДж. Какое количество теплоты сообщено газу?

Дано:

“СИ”

$A' = 15$  кДж  
 $T = \text{const}$

$1,5 \cdot 10^4$  Дж

$Q = ?$

Решение.

По I закону термодинамики:  $Q = A' + \Delta U$   
При изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ )  
внутренняя энергия газа не меняется, то есть

$$\Delta U = 0.$$

Тогда газ совершает механическую работу за счёт сообщенного ему количества теплоты:

$$Q = A'$$

Таким образом, газу сообщено количество теплоты, равное

$$Q = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 15 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $Q = 15$  кДж.

**Задача 10.** В закрытом баллоне находится газ. При охлаждении его внутренняя энергия уменьшилась на 500 Дж. Какое количество теплоты отдал газ? Совершил ли он работу?

Дано:

$$\Delta U = -500 \text{ Дж}$$

Q - ?

A' - ?

Решение.

Газ находится в закрытом баллоне, следовательно, объём газа не меняется, то есть  $V = \text{const}$  и  $\Delta V = 0$ .

Газ работу не совершает, так как

$$A' = p\Delta V \Rightarrow A' = 0.$$

По I закону термодинамики  $Q = A' + \Delta U \Rightarrow Q = \Delta U.$

Таким образом, при изменении внутренней энергии газ отдаёт количество теплоты, равное  $Q = -500 \text{ Дж}$  (знак «-» показывает, что газ выделяет количество теплоты).

Ответ: Q = -500 Дж; A' = 0.

**Задача 11.** Для изобарного нагревания газа, количество вещества которого 400 моль, на 300 °К ему сообщили количество теплоты 5,4 МДж. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии.

Дано:

$p = \text{const}$   
 $\nu = 400$  моль  
 $\Delta T = 300$  °К  
 $Q = 5,4$  МДж

$A' - ?$   
 $\Delta U - ?$

“СИ”

$5,4 \cdot 10^6$  Дж

Решение.

Запишем первый закон термодинамики:

$$Q = \Delta U + A'$$

Работа газа при постоянном давлении:

$$A' = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T$$

$$\text{т.к. } \nu = \frac{m}{M}, \text{ то } A' = \nu R\Delta T$$

Изменение внутренней энергии системы:  $\Delta U = Q - A'$

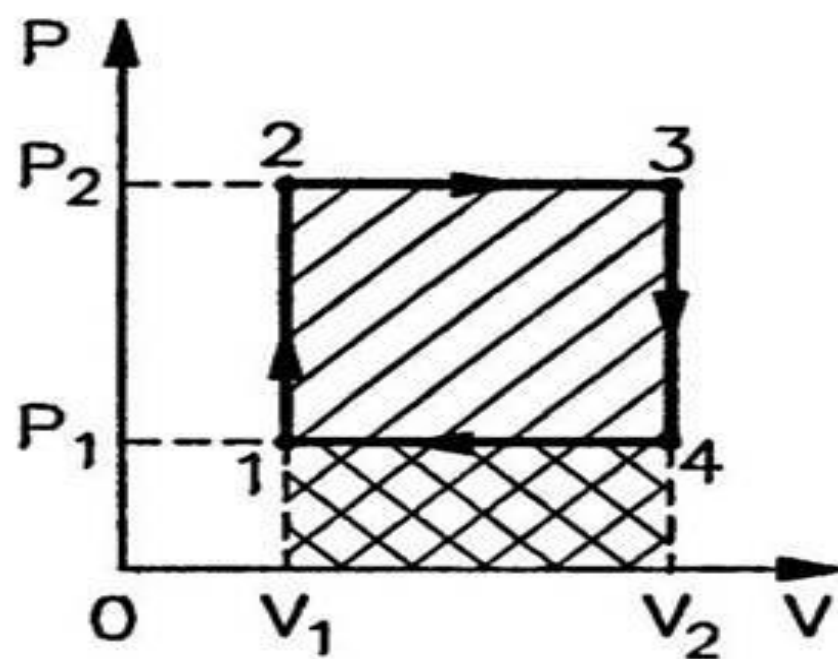
$$A' = 400 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К} = 99,72 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 0,9972 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$\Delta U = 5,4 \cdot 10^6 - 0,9972 \cdot 10^6 \approx 4,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Ответ:  $A' = 1$  МДж;  $\Delta U = 4,4$  МДж.



**Задача 12.** Найти работу тепловой машины за один цикл, изображенный на рисунке.



Решение.

Работа газа численно равна площади прямоугольника 1234:

$$A = S_{1234}$$

$$A = (p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)$$

Ответ:  $A = (p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)$ .

**Задача 13.** Какую работу – положительную или отрицательную – совершает газ за один цикл (см. рисунок)? На каких участках количество теплоты поглощается, отдаётся?

**Решение.**

Перенесём этот график на диаграмму  $p(V)$ .

1→2:  $T = \text{const}$ ,  $p \uparrow \rightarrow V \downarrow$  – изотермическое сжатие.

2→3:  $p = \text{const}$ ,  $T \uparrow \rightarrow V \uparrow$  – изобарное расширение.

3→1:  $p \downarrow$  и  $T \downarrow \rightarrow V = \text{const}$  – изохорное охлаждение.

С помощью диаграммы  $p(V)$  определим работу газа.

$A = p\Delta V$ .

$$A_{31} = 0, \text{ т.к. } \Delta V = 0$$

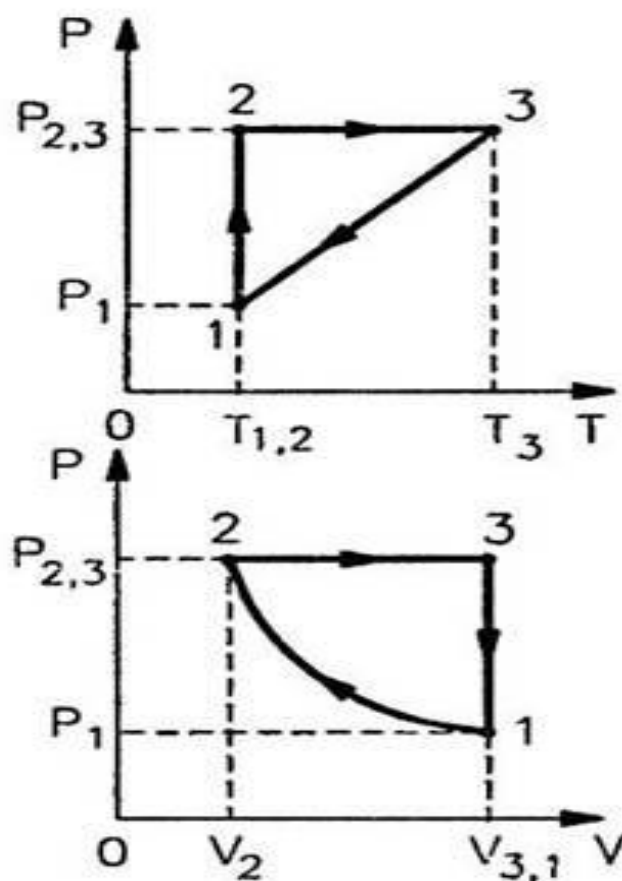
Работа равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса, осью  $OV$  и прямыми  $V=V_1$  и  $V=V_2$

$$S_{12} < S_{23} \Rightarrow A_{12} < A_{23}$$

Таким образом за один цикл газ совершает **положительную работу.**

Газ поглощает количество теплоты на участке 2→3 (при расширении), отдаёт количество теплоты при сжатии – участок 1→2 и при охлаждении – участок 3→1.

**Ответ:**  $A' > 0$ ;  $Q_{23} > 0$ ;  $Q_{12} < 0$ ;  $Q_{31} < 0$ .



**Задача 14.** Тепловой двигатель получает от нагревателя за одну секунду 7200 кДж теплоты и отдаёт холодильнику 5600 кДж. Каков КПД теплового двигателя?

Дано:

$$Q_1 = 7200 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 5600 \text{ кДж}$$

$\eta$  - ?

“СИ”

$$7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$5,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Решение.

По определению КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{7,2 \cdot 10^6 - 5,6 \cdot 10^6}{7,2 \cdot 10^6} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{(7,2 - 5,6) \cdot 10^6}{7,2 \cdot 10^6} \cdot 100\% = \frac{1,6}{7,2} \cdot 100\% \approx 22\%$$

Ответ:  $\eta = 22\%$ .

**Задача 15.** Идеальная тепловая машина получает от нагревателя, температура которого  $500^{\circ}\text{K}$ , за один цикл  $3360$  Дж теплоты. Найти количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику, температура которого  $400^{\circ}\text{K}$ . Найти работу машины за один цикл.

Дано:

$$T_1 = 500^{\circ}\text{K}$$

$$Q_1 = 3360 \text{ Дж}$$

$$T_2 = 400^{\circ}\text{K}$$

---

$$Q_2 = ?$$

$$A' = ?$$

Решение.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow Q_2 = \frac{Q_1 T_2}{T_1}$$

Работа машины за один цикл:  $A' = Q_1 - Q_2$

$$Q_2 = \frac{3360 \text{ Дж} \cdot 400^{\circ}\text{K}}{500^{\circ}\text{K}} = 2688 \text{ Дж} ; A' = 3360 - 2688 = 672 \text{ Дж}$$

Ответ:  $Q_2 = 2688$  Дж,  $A' = 672$  Дж.

**Задача 16.** Какое максимальное теоретически возможное значение КПД может иметь турбина, в которой используют пар с температурой  $600^{\circ}\text{C}$ , а отвод тепла осуществляется с помощью речной воды, обеспечивающей холодильнику температуру  $27^{\circ}\text{C}$ ? Каковы основные пути повышения КПД тепловых машин?

Дано:

“СИ”

$$t_1 = 600^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 27^{\circ}\text{C}$$

$$873^{\circ}\text{K}$$

$$300^{\circ}\text{K}$$

$\eta - ?$

Решение.

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$$

$$\eta_{\max} = \frac{873 - 300}{873} \cdot 100\% \approx 66\%$$

Основной способ увеличения КПД – повышение температуры нагревателя  $T_1$  и понижение температуры холодильника  $T_2$ .

Ответ:  $\eta_{\max} = 66\%$ .

**Задача 17.** В паровой турбине расходуется дизельное топливо массой 0,35 кг на 1 кВт·ч мощности. Температура поступающего в турбину пара 250°C, температура холодильника 30°C. Вычислите фактический КПД турбины и сравните его с КПД идеальной тепловой машины, работающей при тех же температурных условиях.

Дано:

$$A' = 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

$$m = 0,35 \text{ кг}$$

$$q = 42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$t_1 = 250^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 30^\circ\text{C}$$

$\eta$  - ?

$\eta_{\text{max}}$  - ?

“СИ”

$$1 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$T_1 = 523^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 303^\circ\text{K}$$

Решение.

Для реальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{A'}{Q} \cdot 100\%$$

$Q = qm$ , где  $q$  – удельная теплота сгорания топлива.

$$\eta = \frac{A'}{qm} \cdot 100\% = \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot 100\%}{42 \cdot 10^6 \cdot 0,35} \approx 25\%$$

КПД идеальной тепловой машины:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% = \frac{523 - 303}{523} \cdot 100\% \approx 42\%$$

Ответ:  $\eta = 25\%$ ,  $\eta_{\text{max}} = 42\%$ .

**(ЕГЭ 2005 г., ДЕМО) А9.** При нагревании текстолитовой пластинки массой 0,2 кг от  $30^{\circ}\text{C}$  до  $90^{\circ}\text{C}$  потребовалось затратить 18 кДж энергии. Следовательно, удельная теплоемкость текстолита равна

1. 0,75 кДж/(кг·К)
2. 1 кДж/(кг·К)
3. 1,5 кДж/(кг·К)
4. 3 кДж/(кг·К)

**(ЕГЭ 2005 г., ДЕМО) А12** Максимальный КПД тепловой машины с температурой нагревателя  $227^{\circ}\text{C}$  и температурой холодильника  $27^{\circ}\text{C}$  равен

- 1. 100 %
- 2. 88 %
- 3. 60 %
- 4. 40 %

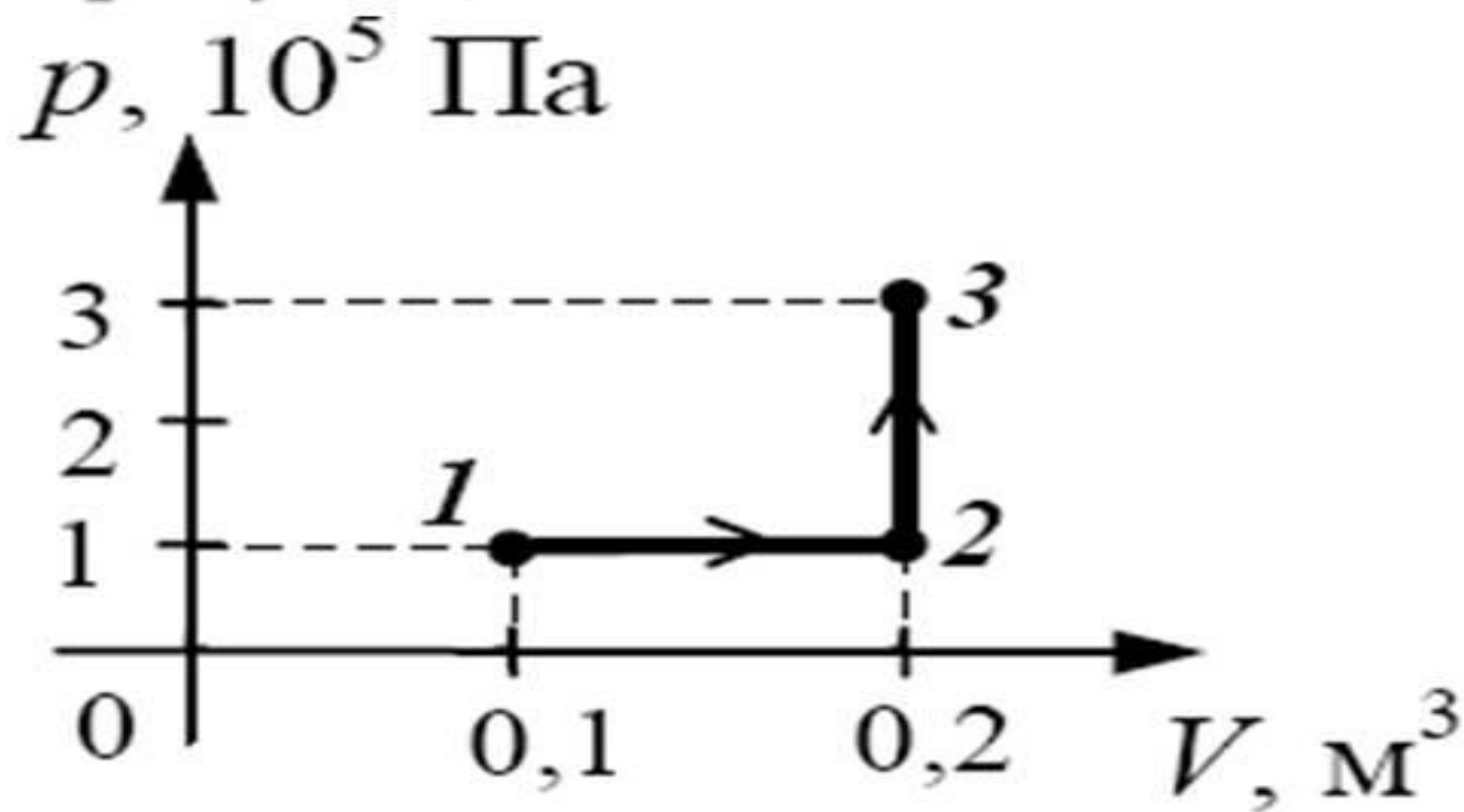


**(ЕГЭ 2008 г., ДЕМО) А15.** Тепловая машина имеет КПД 25%. Средняя мощность передачи теплоты холодильнику в ходе ее работы составляет 3 кВт. Какое количество теплоты получает рабочее тело машины от нагревателя за 10 с?

1. 0,4 Дж
2. 40 Дж
3. 400 Дж
4. 40 кДж

(ЕГЭ 2009 г., ДЕМО) А10. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 3 (см. рисунок)?

1. 10 кДж
2. 20 кДж
3. 30 кДж
4. 40 кДж



**(ЕГЭ 2009 г., ДЕМО) А11.** В тепловой машине температура нагревателя 600 К, температура холодильника на 200 К меньше, чем у нагревателя. Максимально возможный КПД машины равен

1)  $\frac{3}{4}$

2)  $\frac{2}{3}$

3)  $\frac{1}{2}$

4)  $\frac{1}{3}$

**(ЕГЭ 2010 г., ДЕМО) А12.** Температура нагревателя идеального теплового двигателя Карно  $227\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура холодильника  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Рабочее тело двигателя совершает за цикл работу, равную  $10\text{ кДж}$ . Какое количество теплоты получает рабочее тело от нагревателя за один цикл?

1.  $2,5\text{ Дж}$
2.  $11,35\text{ Дж}$
3.  $11,35\text{ кДж}$
4.  $25\text{ кДж}$