

Решение задач на законы термодинамики

10класс

повторяем!

Первый закон термодинамики

$$\Delta U = A_{\text{внешн}} + Q$$

по-другому:

$$Q = \Delta U + A$$

$$A_{\text{внешн}} = -A$$

повторяем!

внутренняя энергия
идеального газа

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

одноатомного газа

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

двухатомного газа

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

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \Delta(PV) = \frac{i}{2} P \Delta V = \frac{i}{2} \Delta PV = \frac{i}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

повторяем!

Работа газа

$$A = \bar{p} \Delta V$$

расширение газа ($\Delta V > 0$; $A > 0$)

сжатие газа ($\Delta V < 0$; $A < 0$)

При изохорном процессе $\Delta V = 0$ $A = 0$
 $V = \text{const}$

изобарное расширение газа $A = p(V_2 - V_1)$ $p = \text{const}$

При изотермическом расширении газа

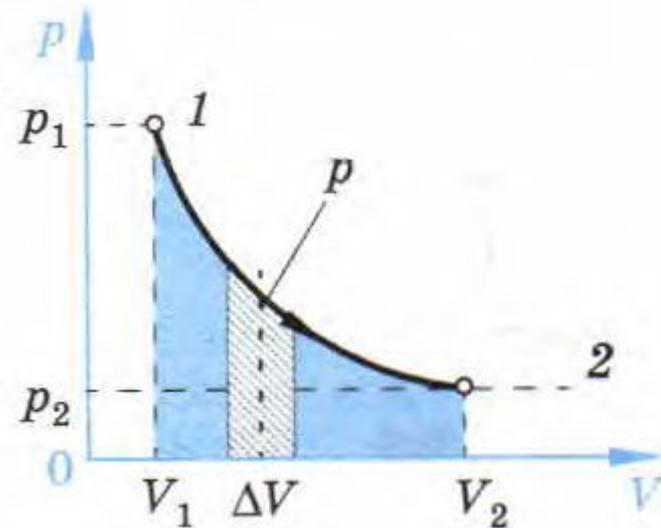
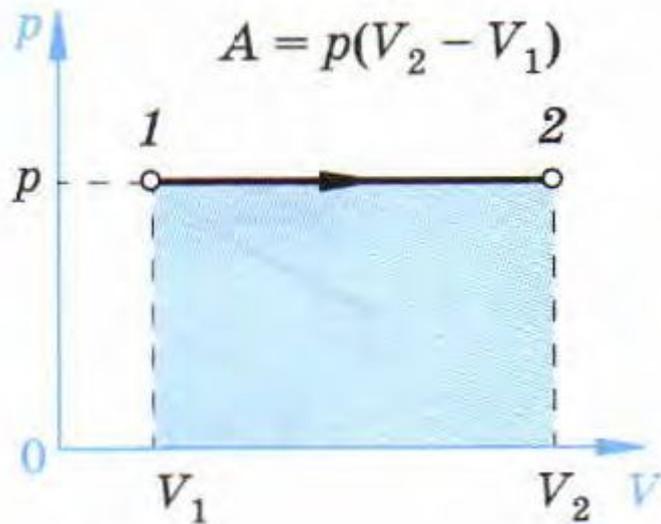
$$T = \text{const} \quad A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

повторяем!

$$A = p\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T$$

Работа, совершаемая газом при изобарном расширении ($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)

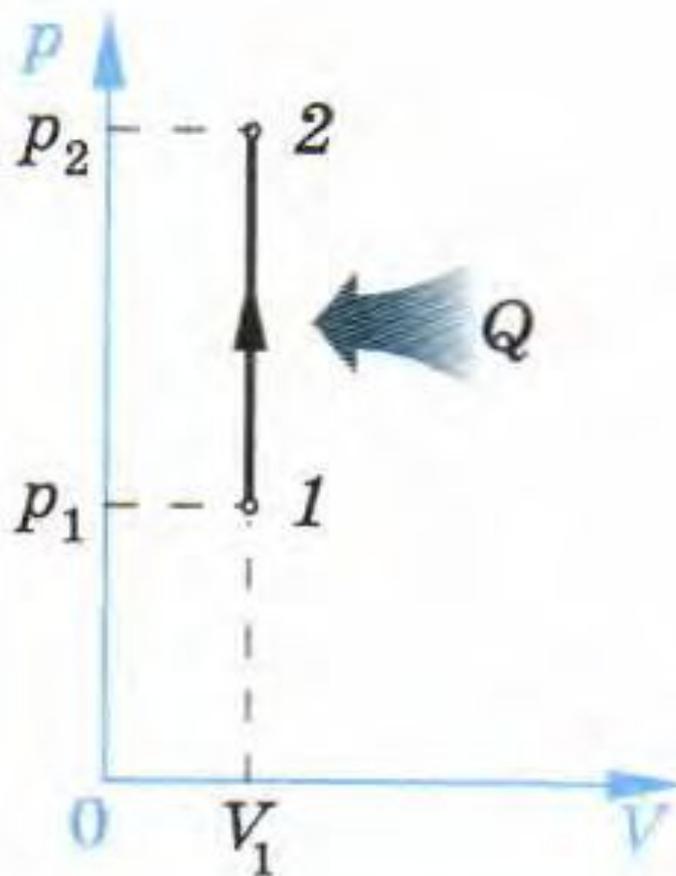
Работа, совершаемая газом при изотермическом расширении ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$)



Работа, совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой, изображающей изменение состояния газа на диаграмме p, V .

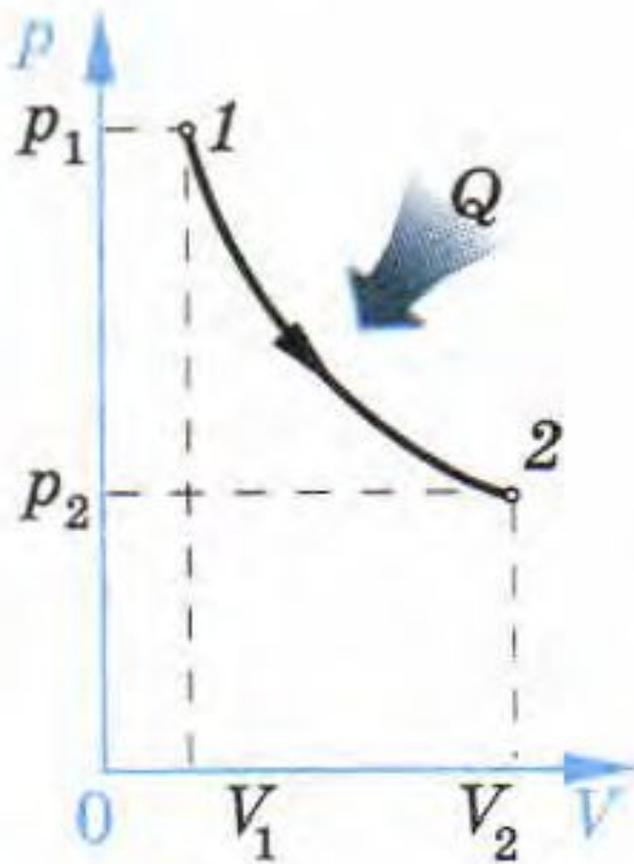
Изохорный процесс
($V = \text{const}$, $m = \text{const}$)

$$Q = \Delta U$$



Изотермический процесс
($T = \text{const}$, $m = \text{const}$): $\Delta U = 0$

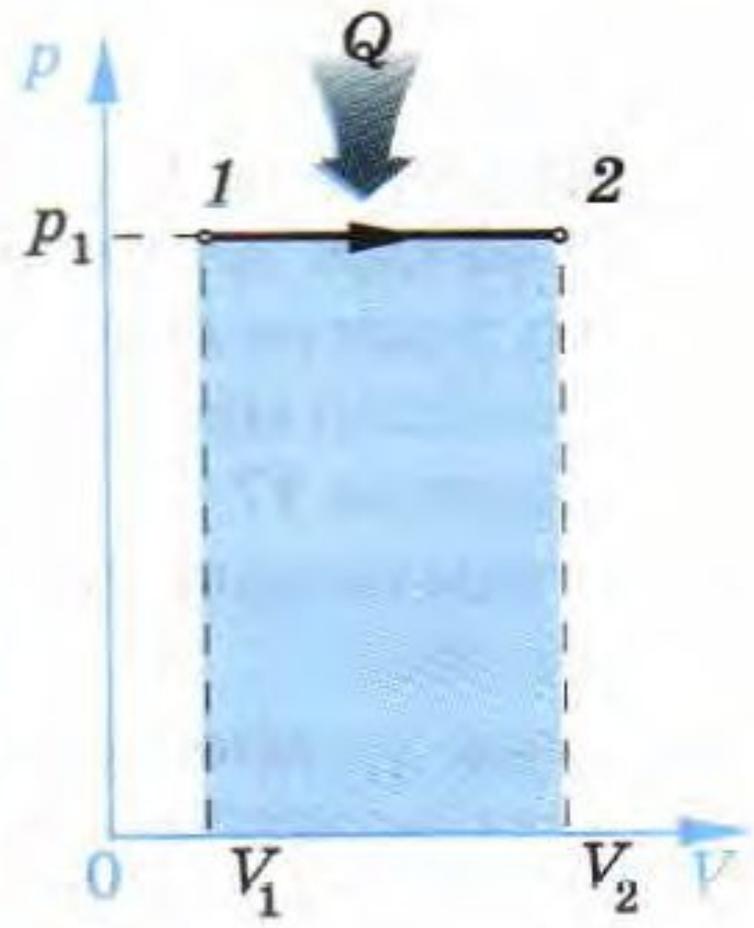
$$Q = A$$



Изобарный процесс

($p = \text{const}$, $m = \text{const}$): $\Delta U > 0$

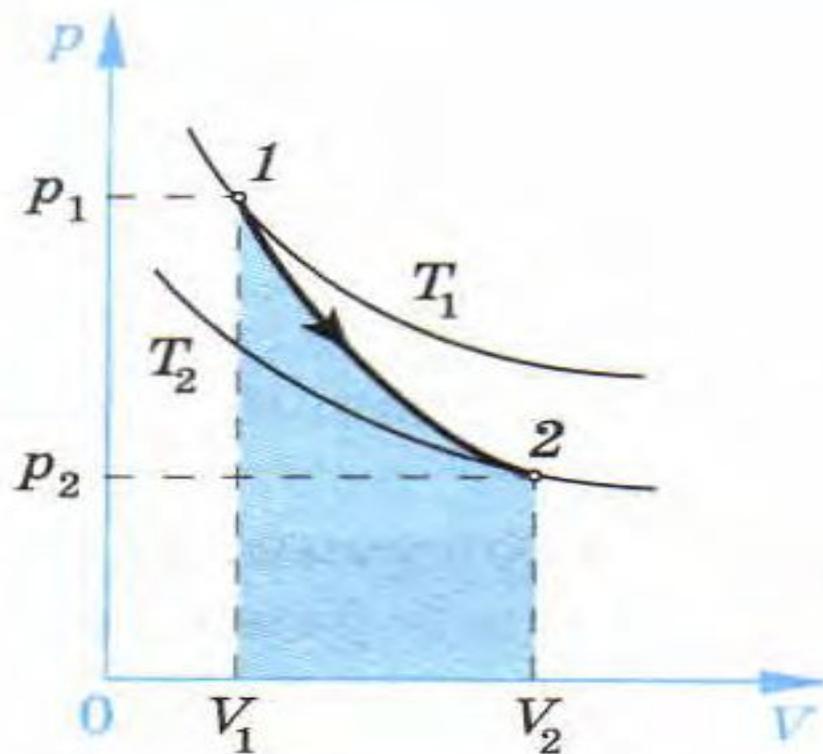
$$Q = \Delta U + A$$



Адиабатный процесс

$$(Q = 0)$$

$$A = -\Delta U$$



Понижение температуры газа при адиабатном расширении

КПД теплового двигателя

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

$$A = Q_1 - |Q_2|$$

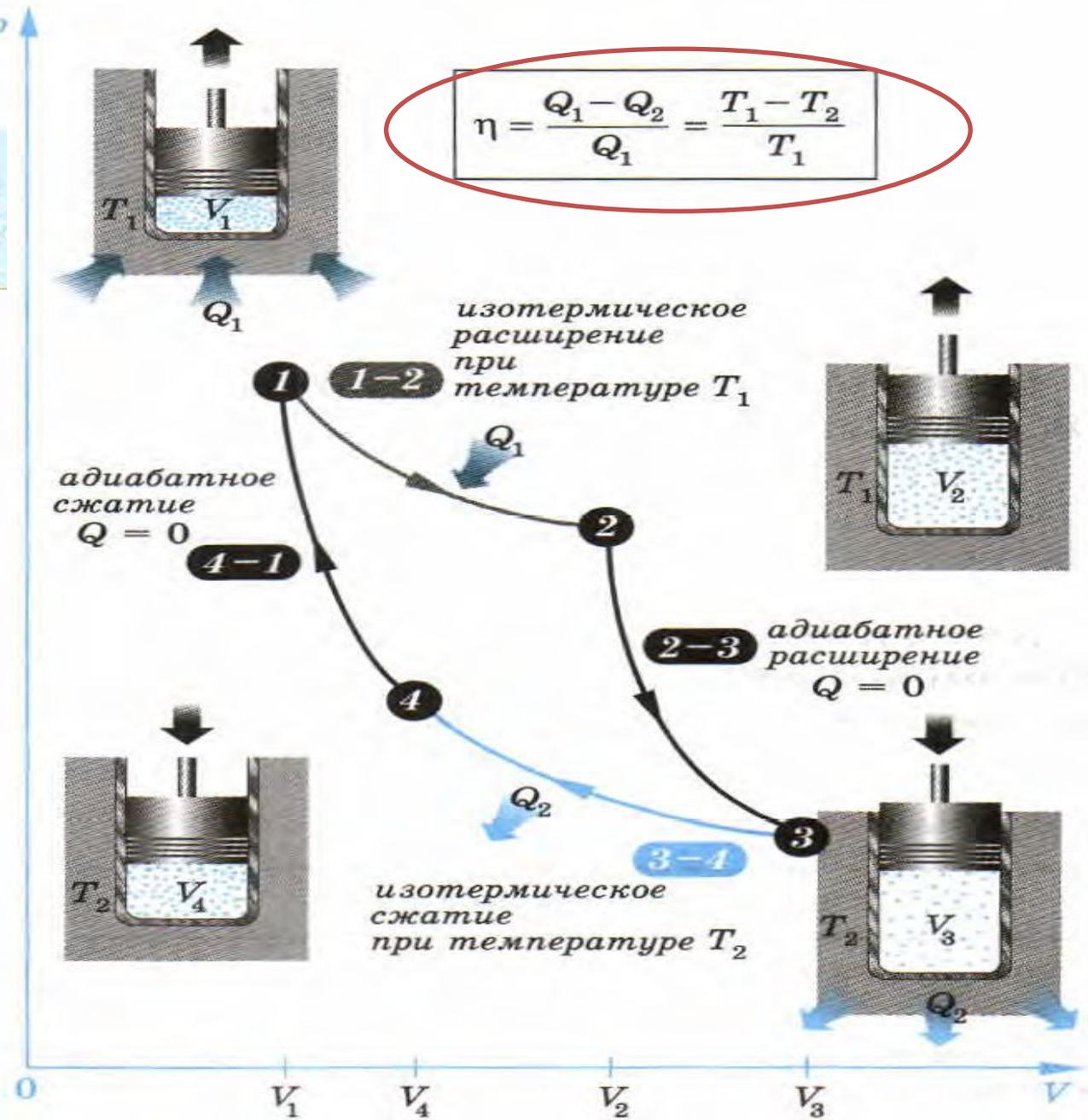
$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Q_1 — подводимое количество теплоты,
 Q_2 — отводимое количество теплоты

Цикл Карно

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

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



На рисунке изображено изменение состояния 1 моль неона. Начальная температура газа 0°C . Какое количество теплоты сообщено газу в этом процессе?

изобарный процесс

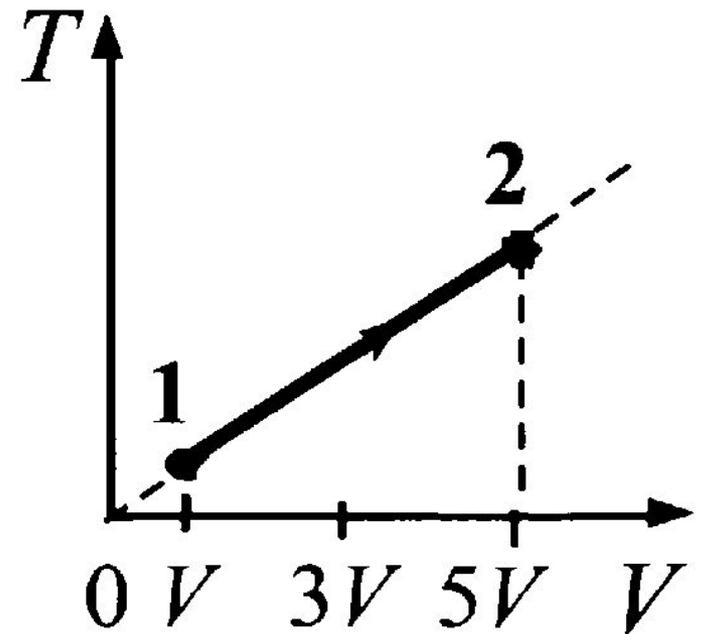
$$Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$$

$$pV = RT_1$$

$$p \cdot 5V = RT_2$$

$$\text{Значит } T_2 = 5T_1.$$

$$Q_{12} = \frac{3}{2}R\Delta T + p\Delta V = \frac{5}{2}R(T_2 - T_1) \approx 22,7 \text{ (кДж)}$$



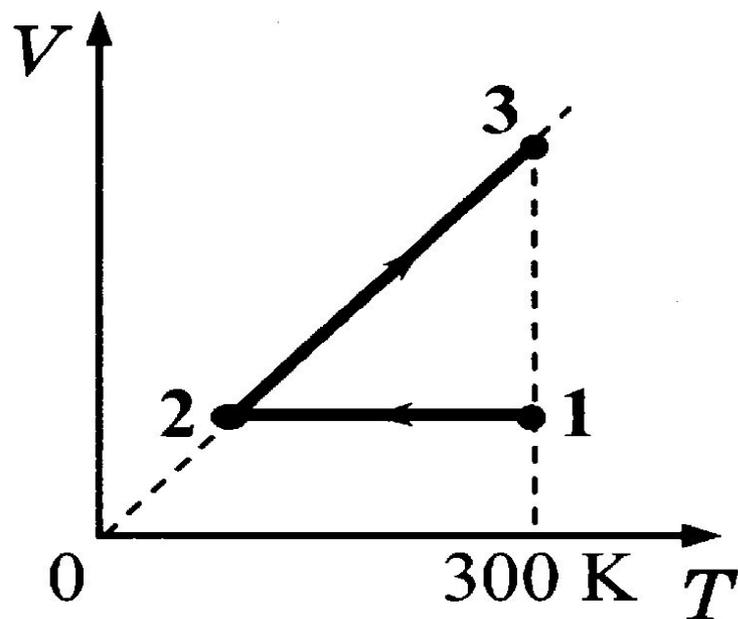
10 моль одноатомного идеального газа сначала охладили, уменьшив давление в 3 раза, а затем нагрели до первоначальной температуры 300 К (см. рисунок). Какое количество теплоты получил газ на участке 2 – 3?

2-3 – изобарный

Первый закон

термодинамики для него

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}$$



$$Q_{23} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{23} + \nu R \Delta T_{23} = \frac{5}{2} \nu R \Delta T_{23}$$

$$= \frac{5}{2} \nu R (T_3 - T_2) = \frac{5}{2} \nu R (T_1 - T_2)$$

в процессе 1-2 по условию давление снизилось в 3 раза согласно уравнения Менделеева – Клапейрона

$$pV = \nu RT \Rightarrow T = \frac{pV}{\nu R}$$

тоже снизилась в 3 раза т.е. $T_2 = \frac{T_1}{3}$.

$$Q_{23} = \frac{5}{2} \nu R (T_1 - T_2) = \frac{5}{2} \nu R (T_1 - \frac{T_1}{3}) = \frac{5}{3} \nu R T_1 \approx 41,6 \text{ кДж}$$

Тепловые машины — устройства, в которых за счёт внутренней энергии топлива совершается механическая работа. Чтобы тепловая машина работала циклически, необходимо, чтобы часть энергии, полученной от нагревателя, она отдавала холодильнику.

Второе начало термодинамики: *в циклически действующем тепловом двигателе невозможно преобразовать всё количество теплоты, полученное от нагревателя, в механическую работу.*

Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 2,94$ кДж и отдает за один цикл холодильнику количество теплоты $Q_2 = 13,4$ кДж. Найдите КПД цикла.

КПД цикла

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

где Q_1 – количество теплоты, подведенное к рабочему телу

по условию

машина является идеальной

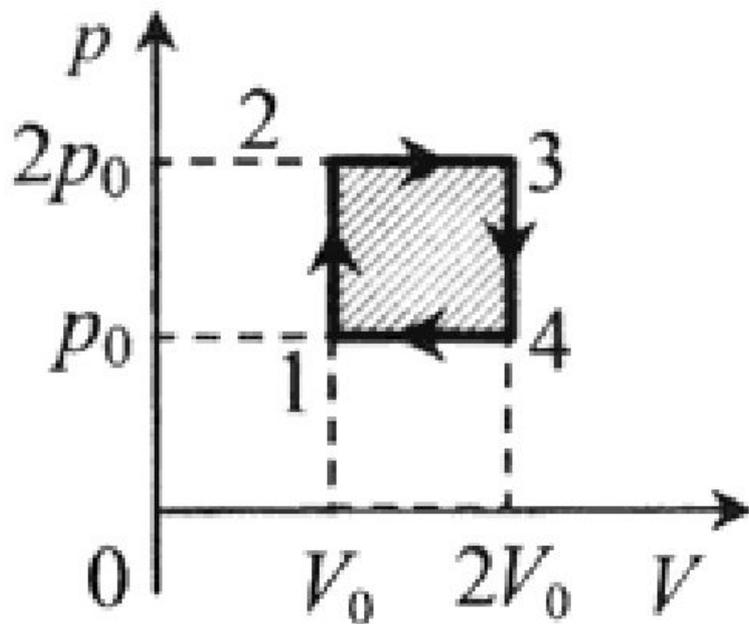
$$A = Q_1 - Q_2 \Rightarrow Q_1 = A + Q_2$$

$$\eta = \frac{A}{A + Q_2} \Rightarrow \eta = 18\%$$

Ответ: $\eta = 18\%$

Алгоритм решения задач на определение КПД теплового процесса

Задача. На p - V диаграмме изображён цикл, проводимый с одноатомным идеальным газом. Определите КПД этого цикла.



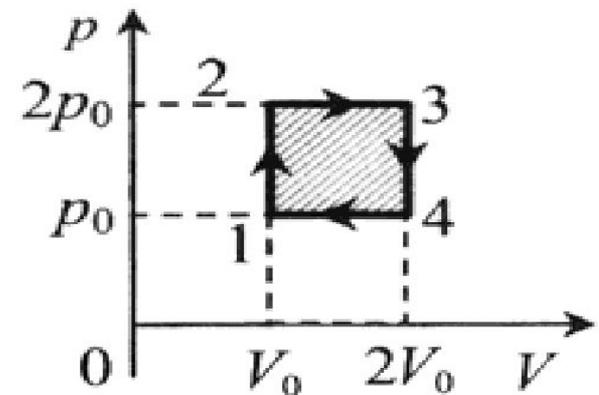
1. Определить работу газа.

Если тепловой процесс представлен в осях (p, V)

Работа равна площади фигуры,

ограниченной замкнутым циклом

$$A' = p_0 V_0$$



если тепловой процесс представлен в других осях координат, то следует сначала перестроить его в осях (p, V) и только потом определять работу.

2. Выяснить, на каких этапах повышается температура газа.

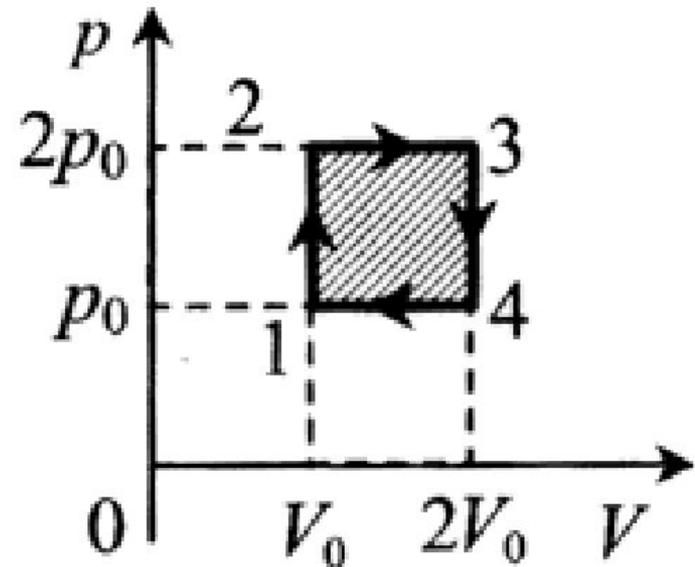
Именно здесь газ получает энергию:

$$1-2: V = \text{const}, p \uparrow, T \uparrow$$

$$2-3: p = \text{const}, V \uparrow, T \uparrow$$

$$3-4: V = \text{const}, p \downarrow, T \downarrow$$

$$4-1: p = \text{const}, V \downarrow, T \downarrow$$



Вывод: газ получает энергию только на первом и втором этапах.

3. Определить с помощью первого начала термодинамики количество теплоты, полученное газом:

$$1-2: V = \text{const}, A'_{12} = 0,$$

$$Q_{12} = \Delta U_{12} = \frac{3}{2} \Delta p V = \frac{3}{2} p_0 V_0 = 1,5 p_0 V_0$$

$$2-3: p = \text{const},$$

$$\Delta U_{23} = Q_{23} - A'_{23}; \Delta U_{23} = \frac{3}{2} p \Delta V = \frac{3}{2} 2 p_0 V_0 = 3 p_0 V_0$$

$$A'_{23} = p \Delta V = 2 p_0 V_0; Q_{23} = 3 p_0 V_0 + 2 p_0 V_0 = 5 p_0 V_0$$

Общее полученное количество теплоты

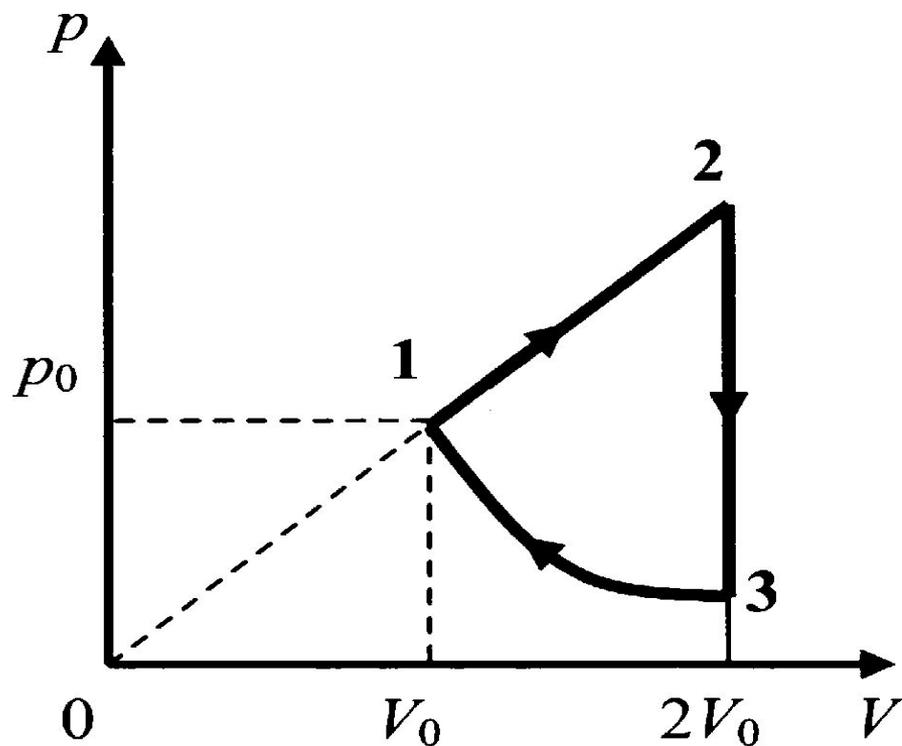
$$Q_{\text{получ.}} = Q_{12} + Q_{23} = 6,5 p_0 V_0$$

4. Вычислить КПД, используя основную формулу:

$$\eta = \frac{A'}{Q_{\text{получ.}}} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{6,5 p_0 V_0} 100\% = 15,4\% .$$

Над одноатомным идеальным газом проводится циклический процесс, показанный на рисунке. На участке 1–2 газ совершает работу $A_{12} = 1000$ Дж. На адиабате 3–1 внешние силы сжимают газ, совершая работу $|A_{31}| = 370$ Дж. Количество вещества газа в ходе процесса не меняется. Найдите количество теплоты $|Q_{\text{хол}}|$, отданное газом за цикл холодильнику.



В данном цикле рабочее тело на участке 1–2 получает от нагревателя количество теплоты:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{12} = (U_2 - U_1) + A_{12}.$$

Процесс 2–3 изохорный Давление падает
очевидно ($P = nkT$) из – за понижения температуры
 \Rightarrow рабочее тело отдает холодильнику

$$|Q_{\text{хол}}| = U_2 - U_3$$

на адиабатном участке 3–1 внешние силы сжимают газ

$$|A_{31}| = U_1 - U_3$$

$$\Rightarrow |Q_{\text{хол}}| = (U_2 - U_1) + (U_1 - U_3) = (U_2 - U_1) + |A_{31}|$$

Для одноатомного идеального газа:

$$\begin{cases} pV = \nu RT; \\ U = \frac{3}{2} \nu RT. \end{cases}$$

участок 1-2 прямо пропорциональная зависимость $p(V)$

$$\Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_2}{V_1}, \Rightarrow p_2 = p_1 \frac{V_2}{V_1} = 2p_0$$

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

$$\left. \begin{aligned}
 U_2 - U_1 &= \frac{3}{2} p_2 V_2 - \frac{3}{2} p_1 V_1 = \frac{3}{2} (2p_0 \cdot 2V_0 - p_0 V_0) = \frac{9}{2} p_0 V_0 \\
 A_{12} &= \frac{1}{2} (p_2 + p_1)(V_2 - V_1) = \frac{1}{2} (3p_0 \cdot V_0) = \frac{3}{2} p_0 V_0
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

(площадь трапции на диаграмме)

$$\Rightarrow U_2 - U_1 = 3A_{12} \Rightarrow$$

$$|Q_{\text{хол}}| = (U_2 - U_1) + |A_{31}| = 3A_{12} + |A_{31}| = 3370 \text{ Дж}$$