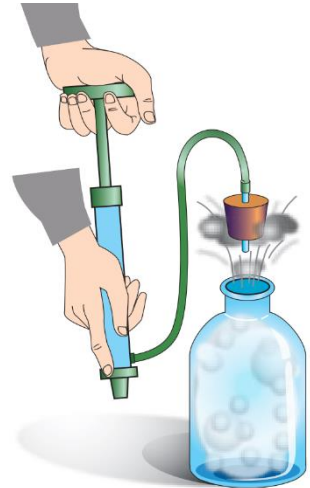


Робота в термодинаміці

У товстостінну посудину накачують повітря. Через деякий час корок вилітає з посудини. Спостерігається утворення туману.

Під дією яких сил корок вилетів із посудини? Про що свідчить утворення туману? Який висновок можна зробити щодо зміни внутрішньої енергії газу, який міститься в посудині?

Якщо роботу виконує саме тіло, то його внутрішня енергія зменшується. У момент вильоту корка в балоні утворився туман. Це свідчить про те, що температура повітря знизилась. Таким чином, внутрішня енергія повітря зменшилась у результаті того, що воно виконало роботу, виштовхнувши корок.

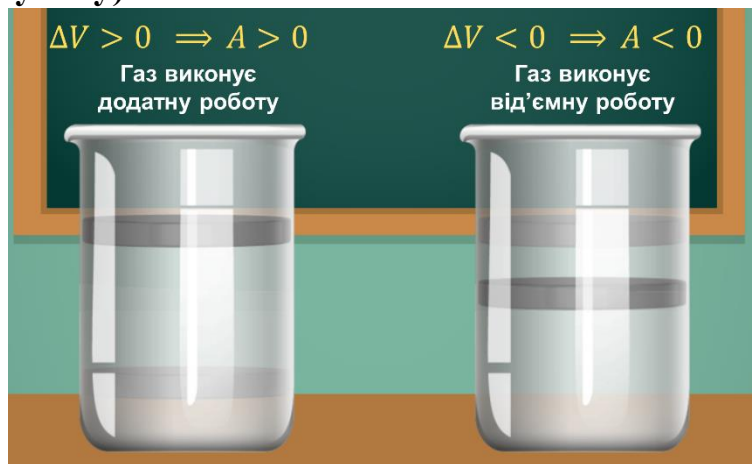


Внутрішня енергія (зміна об'єму газу)

Внутрішня енергія газу може змінюватися, якщо зовнішні сили, що діють на нього, виконують роботу (додатну або від'ємну).

Якщо газ розширюється (тобто виконує додатну роботу), то швидкість руху молекул, температура і внутрішня енергія газу зменшуються.

Якщо газ стискають (газ виконує від'ємну роботу) і він при цьому не віддає енергію навколишньому середовищу, то швидкість руху молекул газу, а відповідно, і внутрішня енергія, і температура газу збільшуються.



Робота газу

Газ розширюється ізобарно:

За означенням роботи:

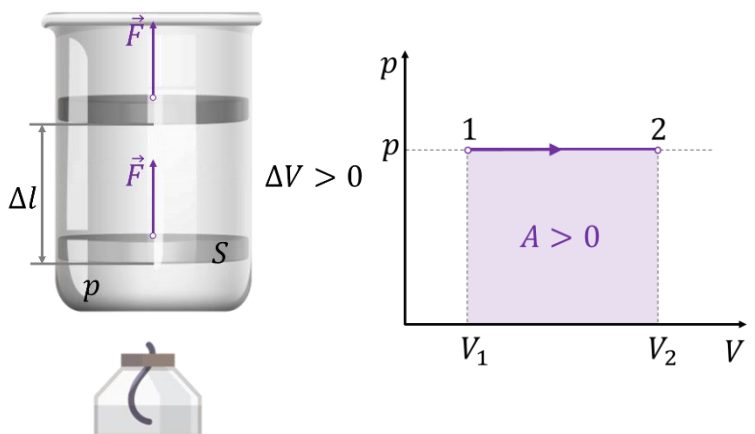
$$A = F s \cos \alpha$$

Якщо газ розширюється ізобарно, то сила, яка діє з боку газу на поршень, є незмінною:

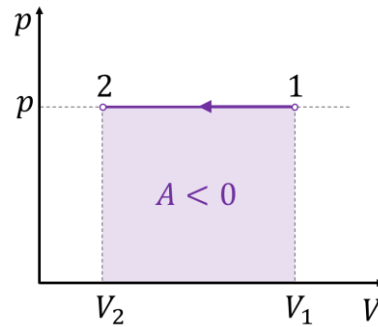
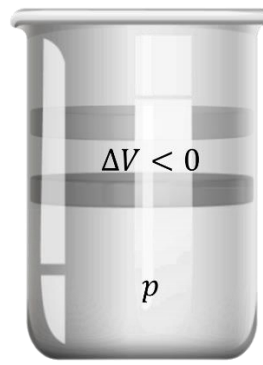
$F = pS$ (p – тиск газу; S – площа поршня); модуль переміщення поршня $s = \Delta l$; $\alpha = 0$.

$$A = F s \cos \alpha = p S \Delta l = p \Delta V$$

$$A = p \Delta V \quad \text{або} \quad A = p(V_2 - V_1)$$



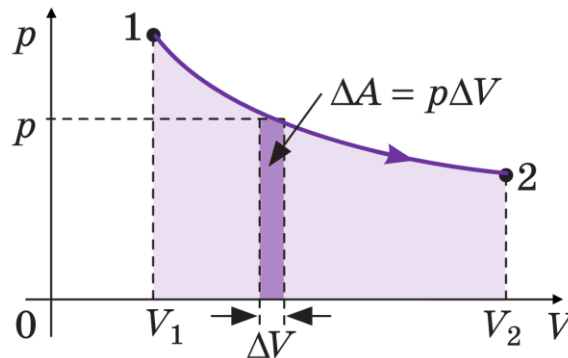
Газ стискається ізобарно: $A = p\Delta V$



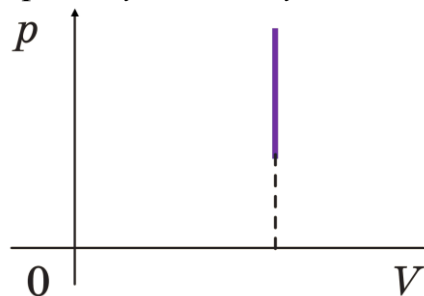
Робота газу в разі ізобарного розширення (або стиснення) чисельно дорівнює площі прямокутника під графіком залежності $p(V)$.

Геометричний зміст роботи

Робота газу при ізотермічному розширенні (стисненні) чисельно дорівнює площі криволінійної трапеції під графіком залежності $p(V)$.



При ізохорному процесі газ роботу не виконує.



Робота газу залежить від того, яким шляхом відбувався перехід газу з початкового стану в кінцевий.

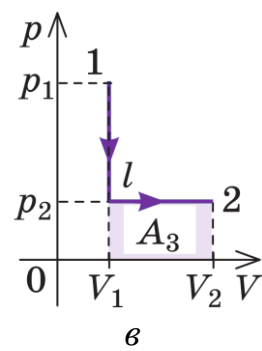
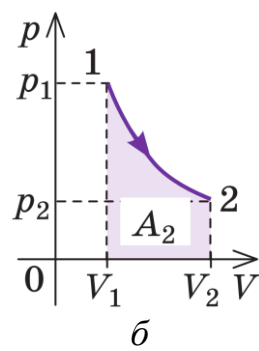
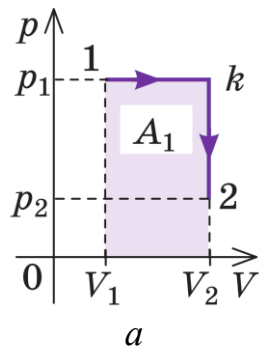
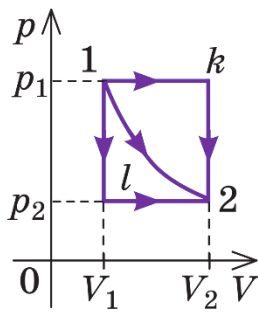
Три шляхи переходу газу зі стану 1 у стан 2:

a – газ ізобарно розширюється (ділянка 1*k*), потім ізохорно охолоджується (ділянка *k2*);

б – газ ізотермічно розширюється;

в – газ ізохорно охолоджується (ділянка 1*l*), потім ізобарно розширюється (ділянка *l2*).

Площі фігур під графіками показують: $A_1 > A_2 > A_3$



1. Газ, який займав об'єм $0,1 \text{ м}^3$ під тиском 200 кПа , нагріли ізобарно від 290 К до 355 К . Визначити роботу розширення газу.

Дано:

$$\begin{aligned} V_1 &= 0,1 \text{ м}^3 \\ p &= 200 \text{ кПа} \\ &= 2 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ T_1 &= 290 \text{ К} \\ T_2 &= 355 \text{ К} \\ A &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

Робота газу: $A = p(V_2 - V_1)$

Процес ізобарний ($p = \text{const}$), закон Гей-Люссака:

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \\ A &= p \left(V_1 \frac{T_2}{T_1} - V_1 \right) = pV_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \frac{\text{К}}{\text{К}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$

$$A = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot \left(\frac{355}{290} - 1 \right) \approx 4,5 \cdot 10^3 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $A \approx 4,5 \text{ кДж}$.

2. Молекулярний водень, маса якого $6,5 \text{ г}$ і температура 27°C , нагрівають за сталого тиску так, що його об'єм збільшився вдвічі. Знайдіть роботу, виконану газом під час розширення. Молярна маса водню $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 6,5 \text{ г} \\ &= 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ T_1 &= (27 + 273) \text{ К} \\ &= 300 \text{ К} \\ V_2 &= 2V_1 \\ M &= 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \\ A &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

Робота газу при ізобарному розширенні:

$$A = pV_2 - pV_1 = \frac{m}{M} RT_2 - \frac{m}{M} RT_1 = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

Процес ізобарний ($p = \text{const}$), закон Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = T_1 \frac{2V_1}{V_1} = 2T_1$$

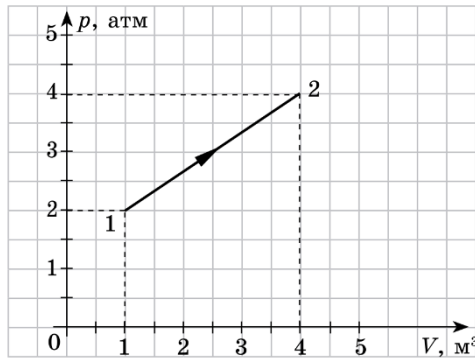
$$A = \frac{m}{M} R(2T_1 - T_1) = \frac{m}{M} RT_1$$

$$[A] = \frac{\text{кг}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} = \text{Дж}$$

$$A = \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 300 \approx 8102 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $A \approx 8,1 \text{ кДж}$.

3. Газ переходить зі стану 1 у стан 2 (див. рисунок). Знайдіть роботу, яку виконує газ в ході процесу.



Робота газу в ході процесу 1–2 чисельно дорівнює площі прямокутної трапеції під графіком залежності $p(V)$:

$$A = \frac{(p_1 + p_2)(V_2 - V_1)}{2}$$

Необхідні значення величин знайдемо з графіка:

$$p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}; p_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_1 = 1 \text{ м}^3; V_2 = 4 \text{ м}^3$$

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$

$$A = \frac{(2 \cdot 10^5 + 4 \cdot 10^5) \cdot (4 - 1)}{2} = 9 \cdot 10^5 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $A = 900 \text{ кДж}$.

4. Деяка маса газу, що займає об'єм 11 л, перебуває під тиском 10^5 Па за температури 300 К. Газ нагрівають за постійного об'єму до температури 330 К, а потім за постійного тиску до температури 360 К. Побудуйте графік процесу в координатах p, V . Знайдіть роботу, яку виконав газ в ході процесу.

Дано:

$$V_1 = 11 \text{ л}$$

$$= 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$p_1 = 10^5 \text{ Па}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 330 \text{ К}$$

$$T_3 = 360 \text{ К}$$

$A = ?$

Розв'язання

Процес 1-2 ізохорний ($V = \text{const}, V_1 = V_2$). Щоб визначити тиск у стані 2, скористаємося законом Шарля:

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

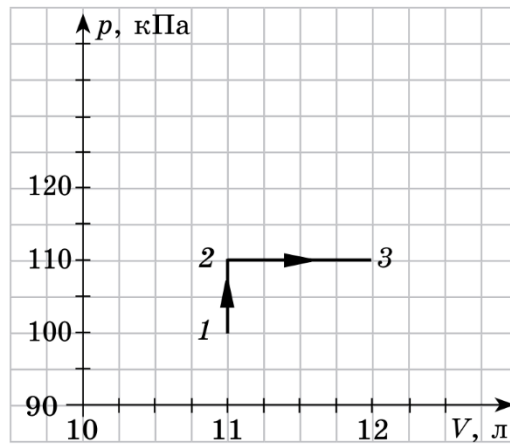
$$[p_2] = \text{Па} \cdot \frac{\text{К}}{\text{К}} = \text{Па} \quad p_2 = 10^5 \cdot \frac{330}{300} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ (Па)}$$

Процес 2-3 ізобарний ($p = \text{const}, p_2 = p_3$). За законом Гей-Люсака визначимо об'єм:

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \Rightarrow V_3 = V_2 \frac{T_3}{T_2}$$

$$[V_3] = \text{м}^3 \cdot \frac{\text{К}}{\text{К}} = \text{м}^3 \quad V_3 = 11 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{360}{330} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^3\text{)}$$

Далі будуємо графік.



Робота газу: $A = A_{12} + A_{23}$

Робота газу в ході процесу 1–2 чисельно дорівнює нулю, оскільки цей процес ізохорний:

$$A_{12} = 0$$

Робота газу в ході процесу 2–3 чисельно дорівнює площі прямокутника зі

сторонами p_2 і $(V_3 - V_2)$; об'єм газу збільшується, тому ця робота додатна:

$$A_{23} = p_2(V_3 - V_2)$$

$$A = p_2(V_3 - V_2)$$

$$[A] = \text{Па} \cdot (\text{м}^3 - \text{м}^3) = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$

$$A = 1,1 \cdot 10^5 \cdot (12 \cdot 10^{-3} - 11 \cdot 10^{-3}) = 110 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $A = 110 \text{ Дж}$.