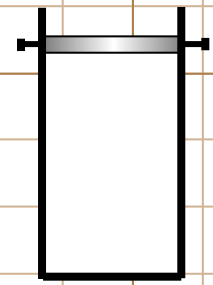


Основы термодинамики

Зверев В.А. школа № 258

Санкт-Петербург 2012 г.

Внутренняя энергия (U)



$$U = E_n + E_k \quad (1)$$

A red arrow points from the E_n term to a red zero below it, indicating that $E_n = 0$ for an ideal gas.

E_n — суммарная потенциальная энергия взаимодействия молекул

E_k — суммарная кинетическая энергия движения молекул

Для идеального газа: $E_n = 0$

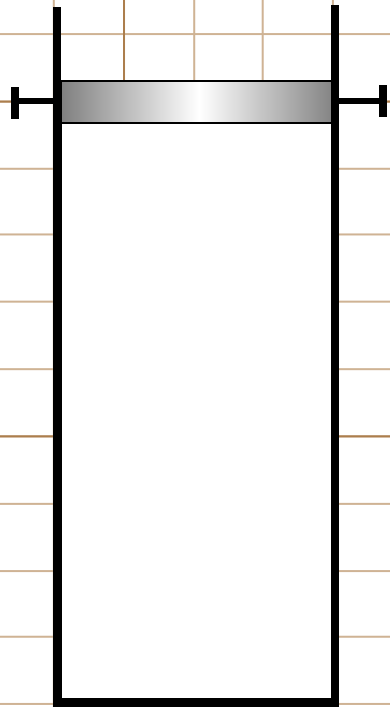
$$\left. \begin{aligned} E_k &= \bar{E}N \\ \bar{E} &= \frac{3}{2}kT \\ N &= \nu \cdot N_A \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U = E_k &= \bar{E}N = \frac{3}{2}kT \cdot \nu \cdot N_A \\ k \cdot N_A &= R \end{aligned}$$

$$U = \frac{3}{2}\nu RT = \frac{3}{2}pV$$

Работа в термодинамике

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos\alpha$$

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



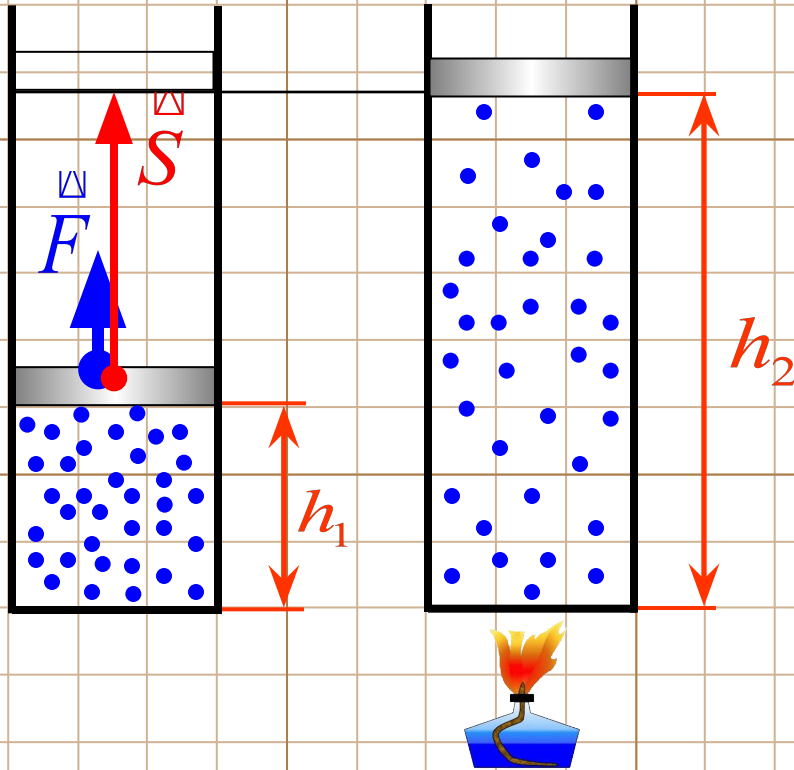
$$A = |\vec{F}| \cdot 0 \cdot \cos\alpha$$

$$A = 0$$

Работа в термодинамике

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos \alpha$$

2) Изобарный процесс ($p = \frac{F}{S_*} = \text{const}$)



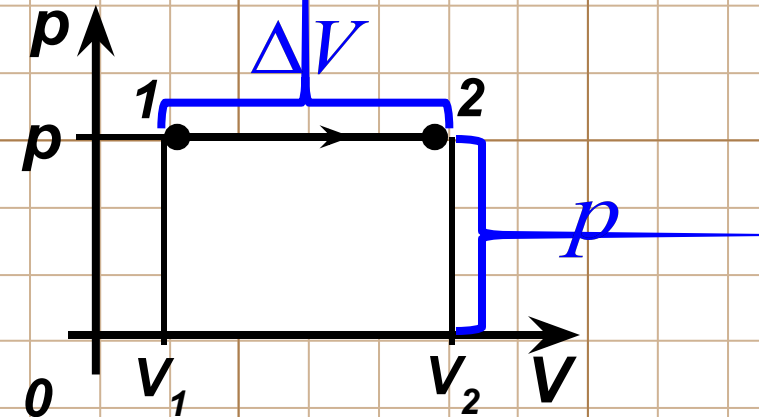
$$F = pS_* \quad S = h_2 - h_1$$

$$A = pS_* \cdot (h_2 - h_1) = p\Delta V$$

$$A = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1$$

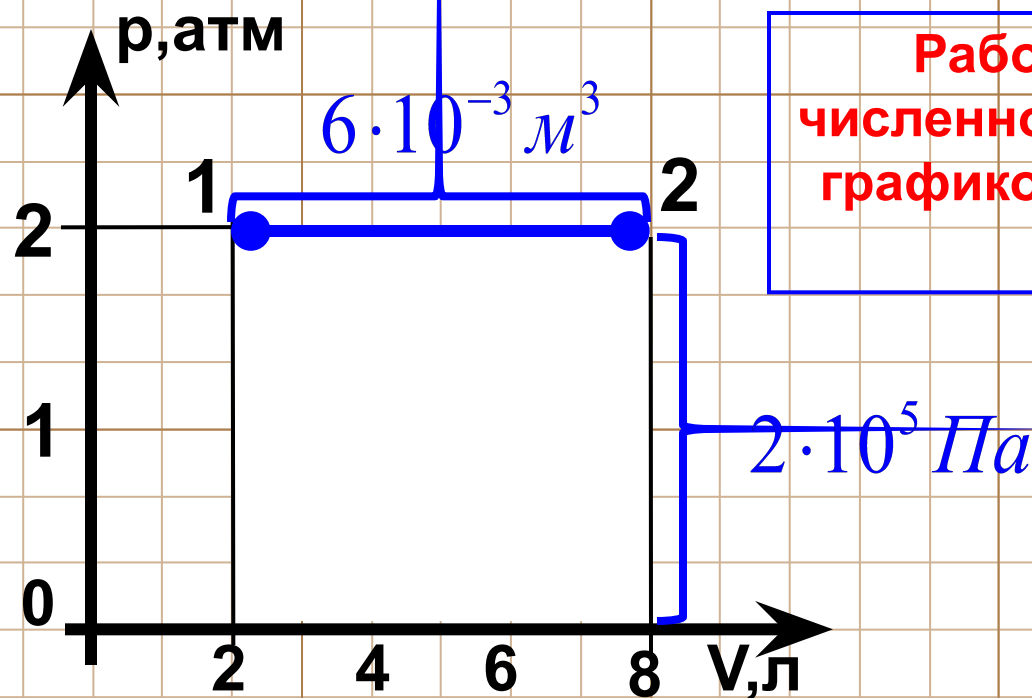
$$A = p\Delta V = \nu R\Delta T$$

Работа в термодинамике численно равна площади фигуры под графиком процесса в координатах p(V)!



Работа в термодинамике

Какую работу совершил газ при переходе из состояния 1 в состояние 2?

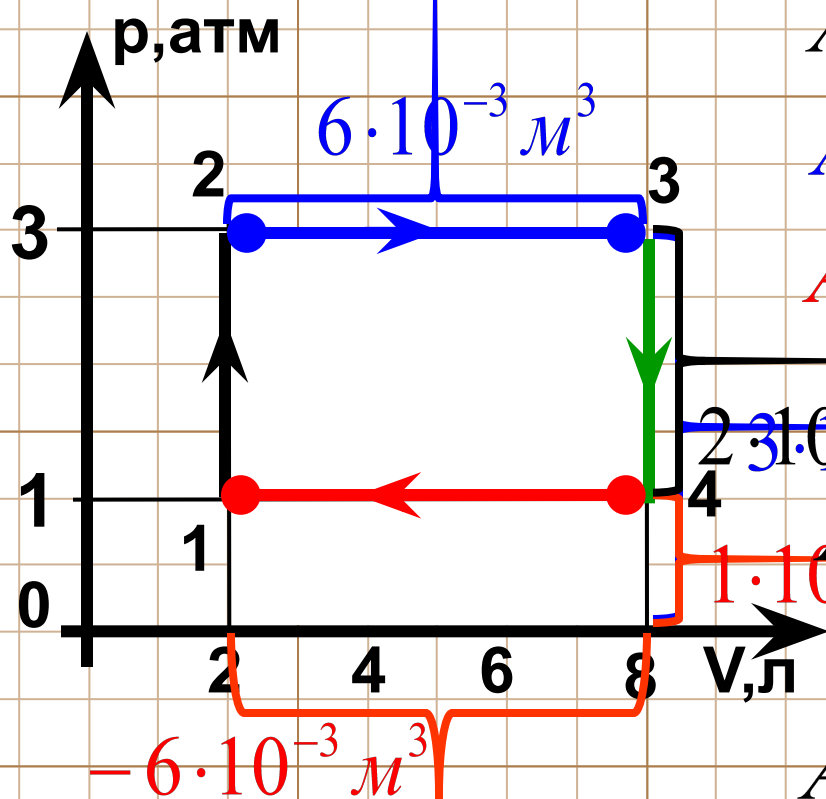


Работа газа в термодинамике численно равна площади фигуры под графиком процесса в координатах p (V)!

$$A = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^5 = 1200 \text{ Дж}$$

Работа в термодинамике

Какую работу совершил газ при переходах: $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 1$.
Найти работу газа за цикл.



$$A_{1 \rightarrow 2} = 0 \quad A_{3 \rightarrow 4} = 0$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^5 = 1800 \text{ Дж}$$

$$A_{4 \rightarrow 1} = -6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^5 = -600 \text{ Дж}$$

$$2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$A = 1800 - 600 = 1200 \text{ Дж}$$

$$1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

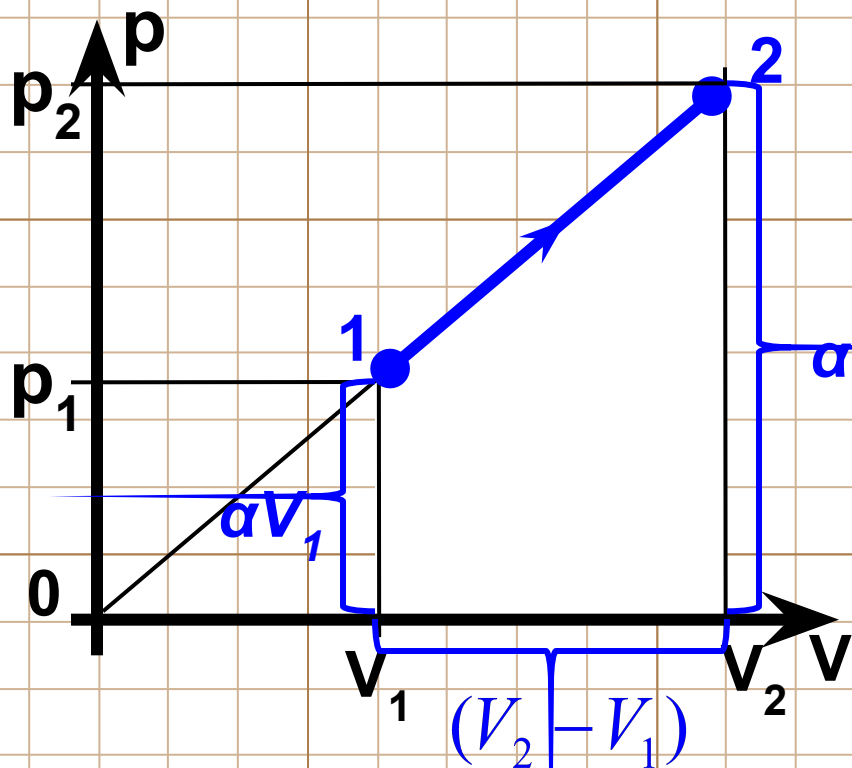
$$A_{\Sigma} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^5 = 1200 \text{ Дж}$$

Работа газа за цикл численно равна площади фигуры внутри цикла процесса в координатах p(V)!

Работа в термодинамике

Идеальный газ расширяется по закону $p = \alpha V$. Найти работу, совершенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 .

Работа газа в термодинамике численно равна площади фигуры под графиком процесса в координатах $p(V)$!



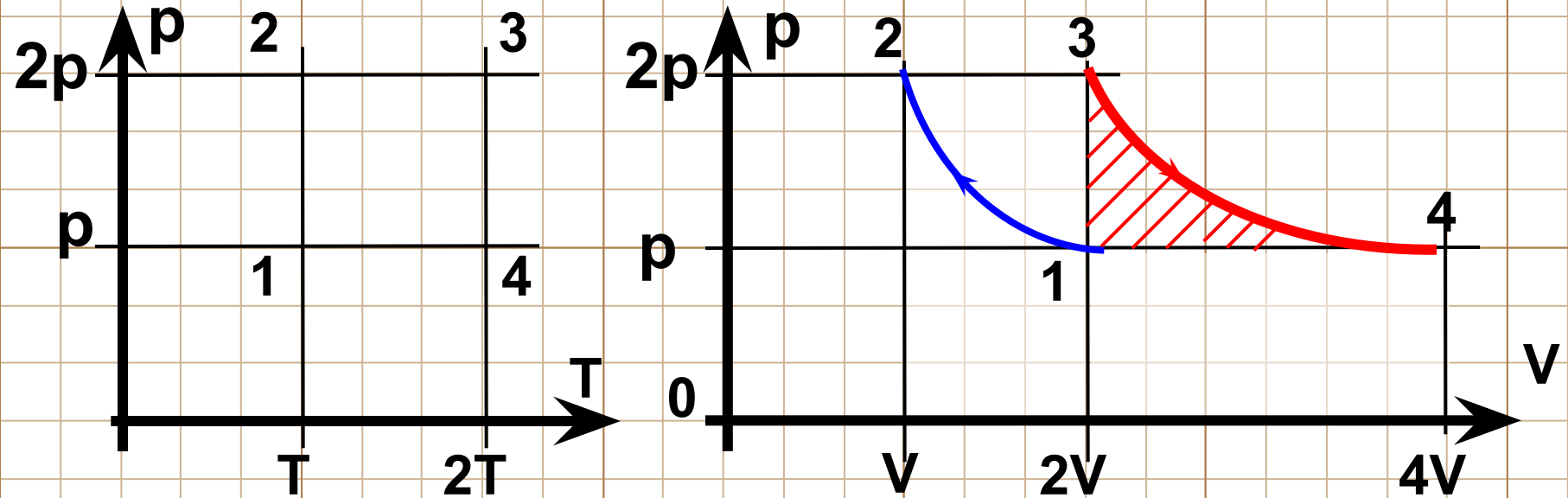
$$A = \frac{\alpha V_2 + \alpha V_1}{2} \cdot (V_2 - V_1)$$

$$A = \frac{\alpha(V_2 + V_1)}{2} \cdot (V_2 - V_1)$$

$$A = \frac{\alpha}{2} \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

Работа в термодинамике

В каком из переходов газ совершил наибольшую работу?
Ответ обосновать.



$$A_{3 \rightarrow 4} > A_{2 \rightarrow 3} = |A_{4 \rightarrow 1}| > |A_{1 \rightarrow 2}|$$

Газ находится в вертикальном цилиндре с площадью основания $0,01 \text{ м}^2$ при температуре 27°С . На расстоянии $0,8 \text{ м}$ от дна цилиндра находится поршень массой 20 кг . Атмосферное давление нормальное. Какую работу совершит газ при его нагревании до 37°С ?

Дано:

$$S = 0,01 \text{ м}^2$$

$$t_1 = 27^\circ\text{С}$$

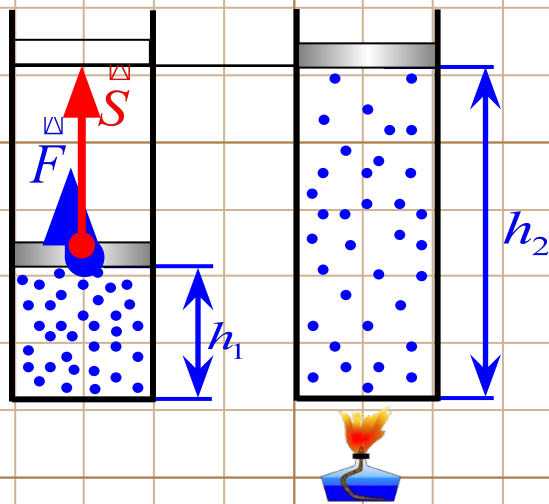
$$t_2 = 37^\circ\text{С}$$

$$h_1 = 0,8 \text{ м}$$

$$m_n = 20 \text{ кг}$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Па}$$

$$A = ?$$



$$p = \text{const}$$

$$A = \nu R \Delta T = \frac{p V_1}{T_1} \Delta T$$

$$pV = \nu RT \quad \nu R = \frac{p V_1}{T_1}$$

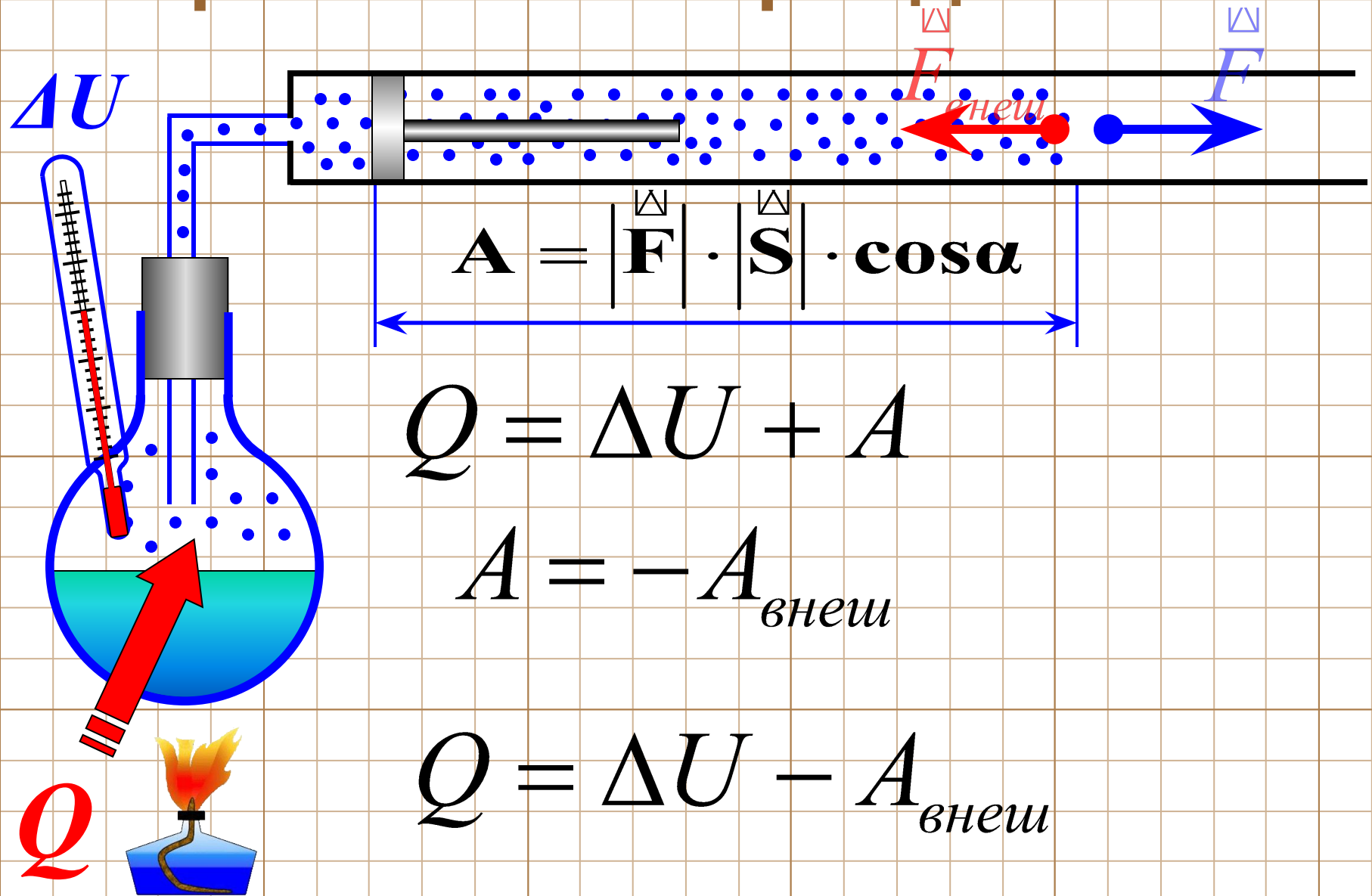
$$p = p_0 + \frac{m_n g}{S} \quad V_1 = S h_1$$

$$A = \frac{\left(p_0 + \frac{m_n g}{S} \right) S h_1}{T_1} \Delta T = \frac{(p_0 S + m_n g) h_1}{T_1} \Delta T$$

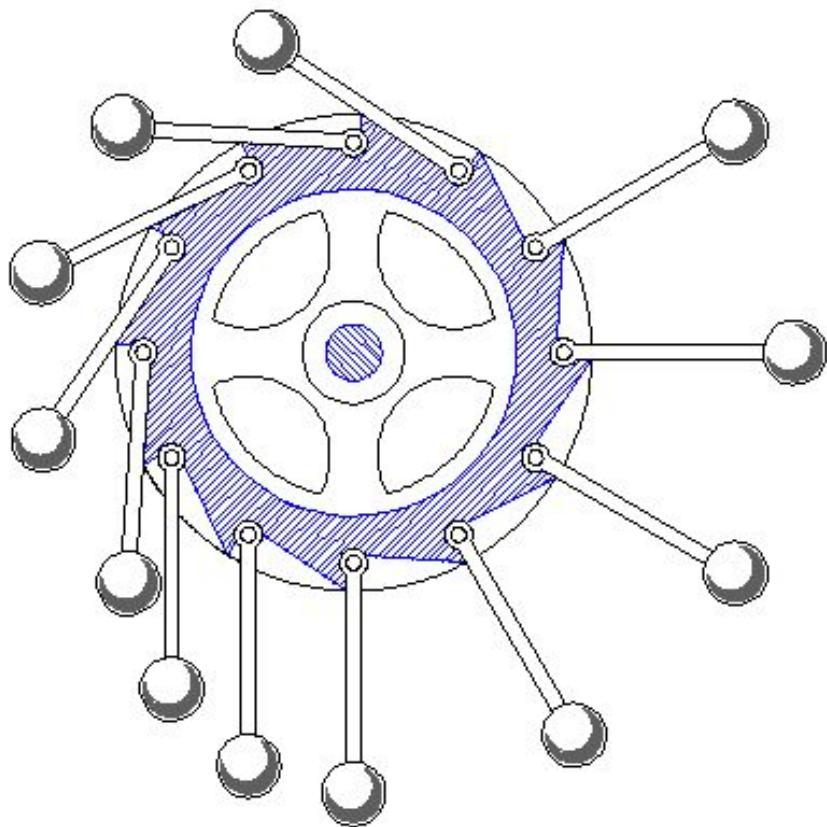
$$A = \frac{(10^5 \cdot 0,01 + 20 \cdot 10) \cdot 0,8}{300} \cdot 10 = 32 \text{ Дж}$$

Ответ: 32 Дж

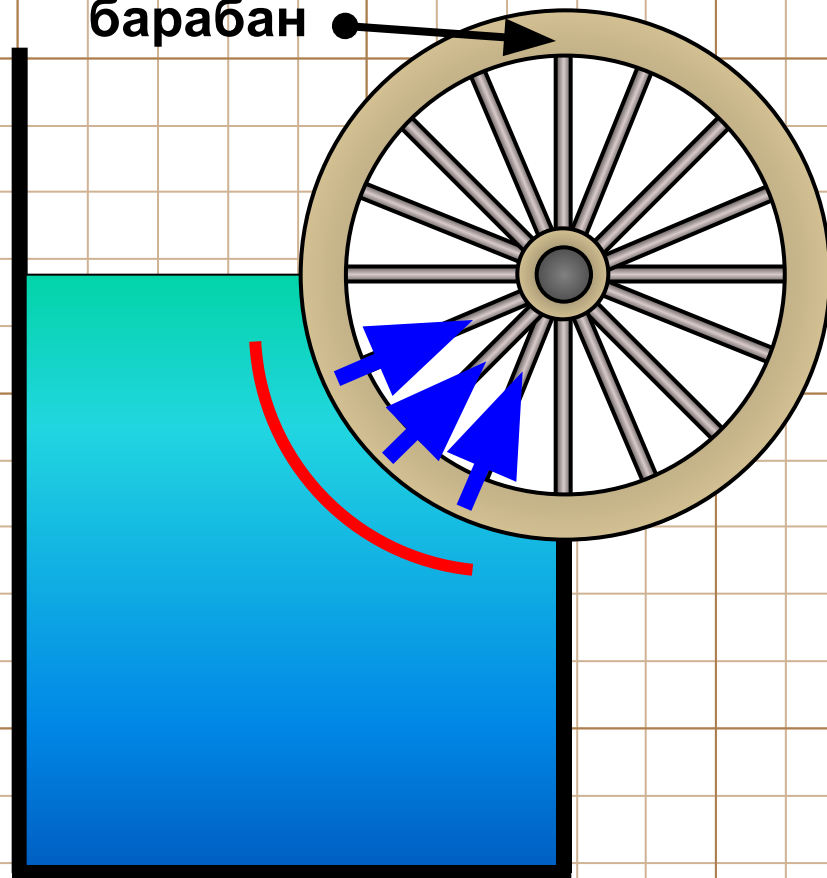
Первый закон термодинамики



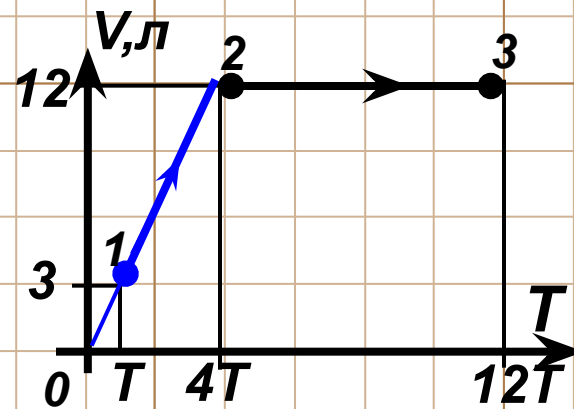
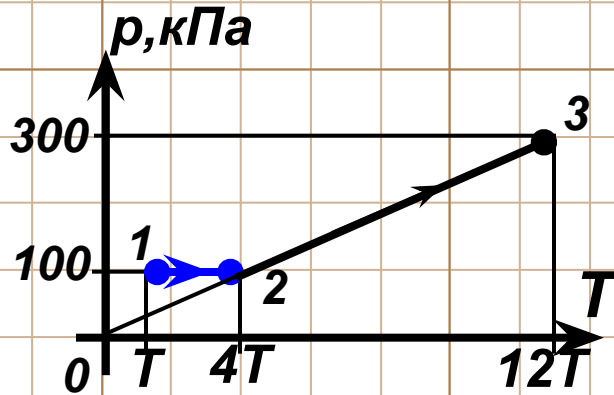
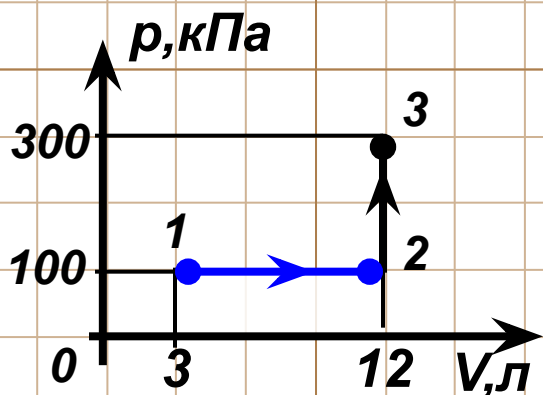
Первый закон термодинамики запрещает вечный двигатель первого рода



Деревянный барабан



Одноатомный газ сначала изобарически расширился в четыре раза, а затем в результате изохорического нагревания его давление возросло в три раза. Начальное давление газа 100 кПа, его конечный объём 12 л. Нарисовать графики процессов, протекающих с газом, в координатах (p, V) , (p, T) и (V, T) . Найти работу, совершённую газом, и изменение его внутренней энергии.



$$A = 100 \text{ кПа} \cdot 9 \text{ л} = 100 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 900 \text{ Дж}$$

$$U = \frac{3}{2} pV \quad \Delta U = \frac{3}{2} (p_3 V_3 - p_1 V_1)$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} (3600 - 300) = 4950 \text{ Дж}$$

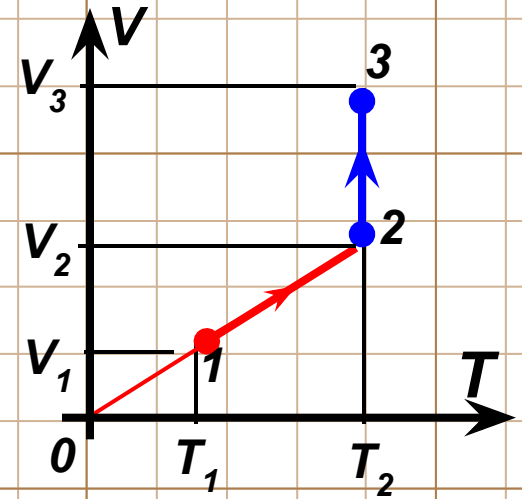
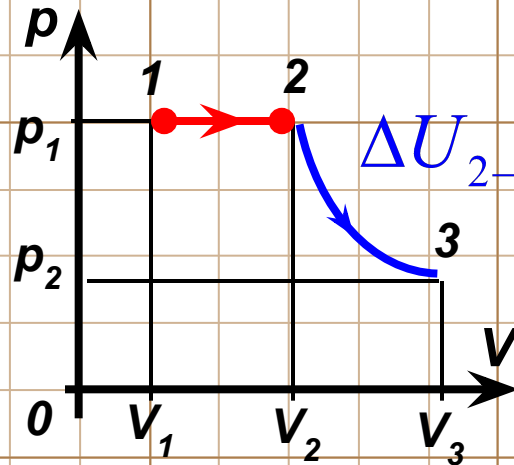
Идеальный газ при изобарном нагревании и изотермическом расширении получил 16 кДж тепла. При этом его внутренняя энергия увеличилась на 6 кДж. Нарисовать графики процессов с газом в координатах (p, V) и (V, T) . Какую работу совершил газ при изотермическом расширении?

Дано:

$$Q = 16 \text{ кДж}$$

$$\Delta U = 6 \text{ кДж}$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = ?$$



1 → 2

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$$

$$A_{1 \rightarrow 2} = \nu R \Delta T = \frac{2}{3} \Delta U$$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_{1 \rightarrow 2} + \Delta U_{1 \rightarrow 2} = \frac{5}{3} \Delta U$$

2 → 3

$$Q_{2 \rightarrow 3} = A_{2 \rightarrow 3} = Q - Q_{1 \rightarrow 2}$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = Q - \frac{5}{3} \Delta U$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = 16 - \frac{5 \cdot 6}{3} = 6 \text{ кДж}$$

Ответ: 6 кДж.

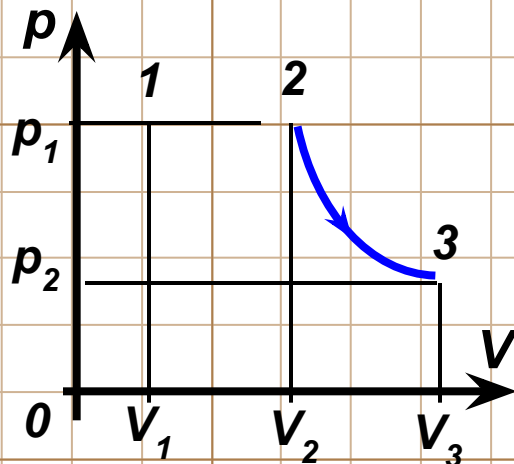
Одноатомный газ расширяется сначала изобарно, а затем изотермически. Работа, совершаемая газом при расширении, равна 800 Дж. В процессе изотермического расширения газ получил 300 Дж тепла. Найти изменение внутренней энергии газа.

Дано:

$$A = 800 \text{ кДж}$$

$$Q_{2 \rightarrow 3} = 300 \text{ Дж}$$

$$\Delta U - ?$$



2 → 3

$$Q_{2 \rightarrow 3} = A_{2 \rightarrow 3} + \Delta U_{2 \rightarrow 3}$$

$$\Delta U_{2 \rightarrow 3} = 0$$

$$Q_{2 \rightarrow 3} = A_{2 \rightarrow 3} \quad \Delta U = \Delta U_{1 \rightarrow 2}$$

1 → 2

$$A_{1 \rightarrow 2} = A - A_{2 \rightarrow 3} = 500 \text{ Дж}$$

$$A_{1 \rightarrow 2} = \nu R \Delta T$$

$$\Delta U = \Delta U_{1 \rightarrow 2} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3}{2} A = 750 \text{ Дж}$$

Ответ: 750 Дж.

Одноатомный газ, занимающий объём 2 л при давлении 100 кПа, нагревают сначала при постоянном давлении, а затем при постоянном объёме. При этом газ совершает работу 100 Дж, а его температура возрастает вдвое. Какое количество тепла сообщили газу при нагревании? Нарисовать графики процесса нагревания газа в координатах (p, V) и (p, T) . Ответ: 400 Дж.

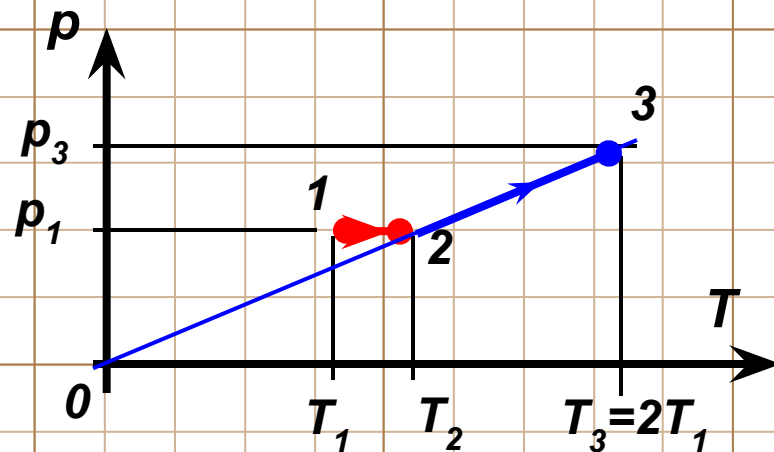
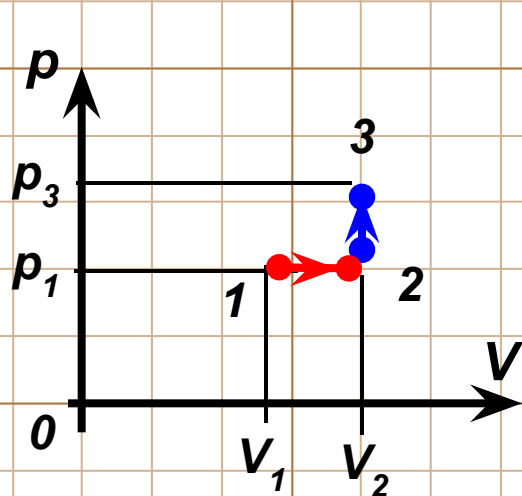
Дано:

$$V = 2 \text{ л}$$

$$A = 100 \text{ Дж}$$

$$T_3 = 2T_1$$

$$Q_{1 \rightarrow 3} = ?$$

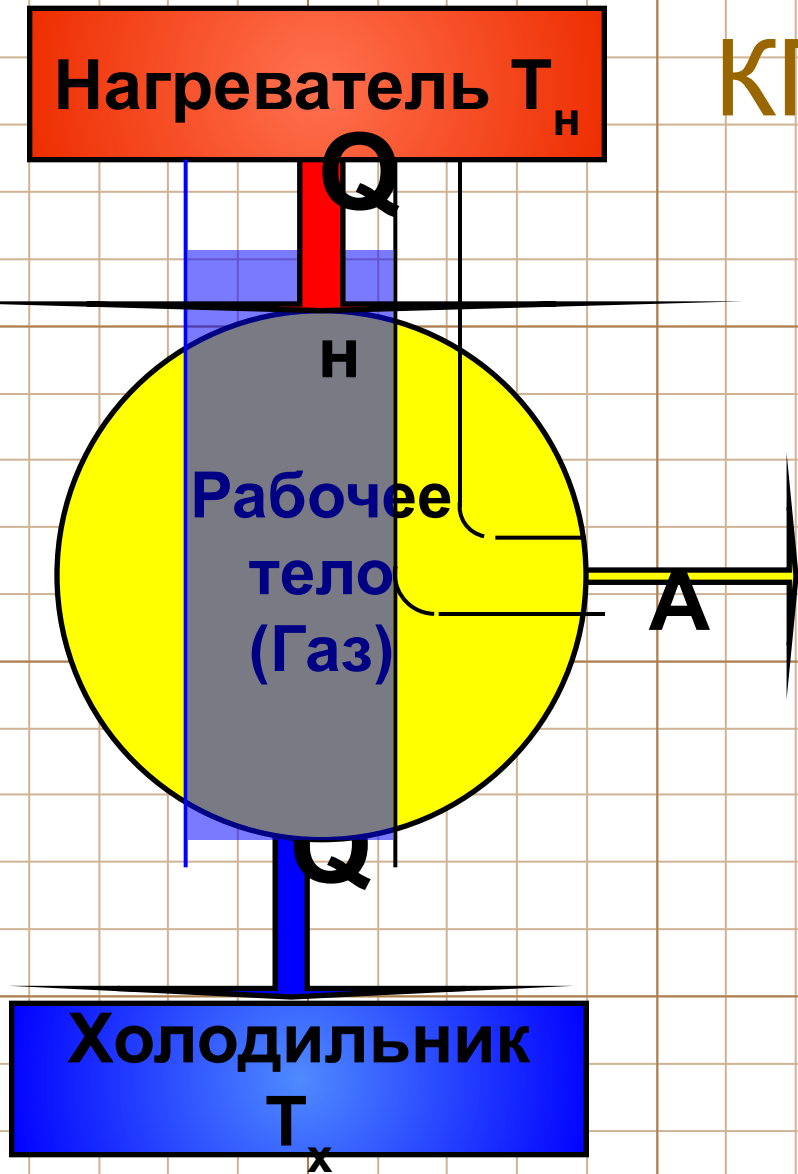


10 г аргона нагревают сначала изохорно, а затем изобарно так, что в результате температура газа возросла на 100°C . При этом газ совершил работу 62,32 Дж. Молярная масса аргона 40 г/моль. Найти изменение внутренней энергии газа в процессе изохорического нагревания. Ответ: 218.14 Дж.

КПД тепловых машин

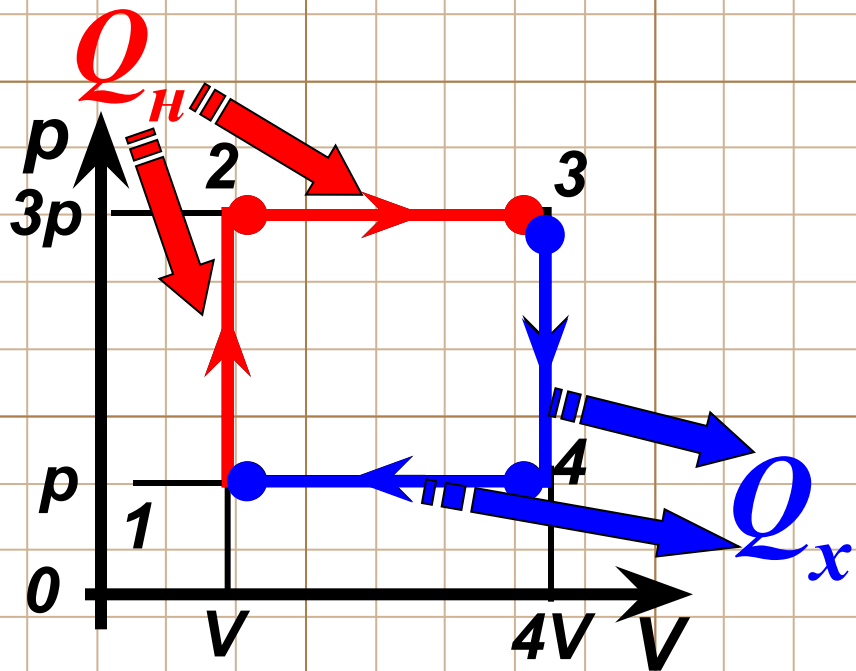


КПД тепловых машин



$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_x}{Q_H}$$



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

$$Q = A + \Delta U$$

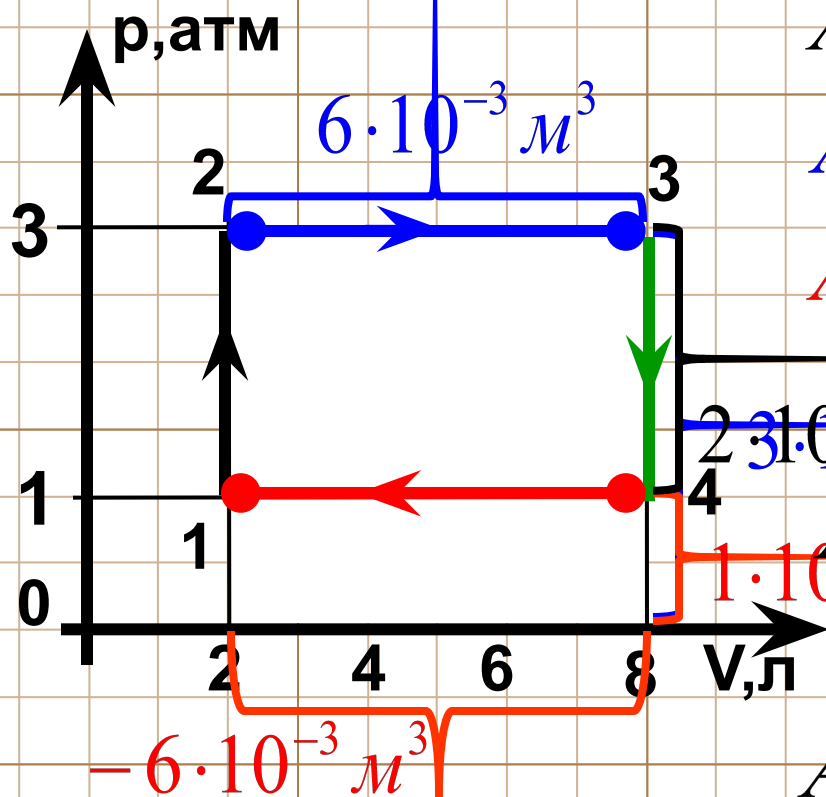
$$Q_H = Q_{1 \rightarrow 3}$$

$$Q_H = A_{1 \rightarrow 3} + \Delta U_{1 \rightarrow 3}$$

	T	p	V	$\frac{pV}{T} = const$	A	ΔU	Q	Контакт
1→2	↑	↑	const	$\frac{p}{T} = const$	0	> 0	> 0	H
2→3	↑	const	↑	$\frac{V}{T} = const$	> 0	> 0	> 0	H
3→4	↓	↓	const	$\frac{p}{T} = const$	0	< 0	< 0	X
4→1	↓	const	↓	$\frac{V}{T} = const$	< 0	< 0	< 0	X

Работа в термодинамике

Какую работу совершил газ при переходах: $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 1$.
Найти работу газа за цикл.



$$A_{1 \rightarrow 2} = 0 \quad A_{3 \rightarrow 4} = 0$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^5 = 1800 \text{ Дж}$$

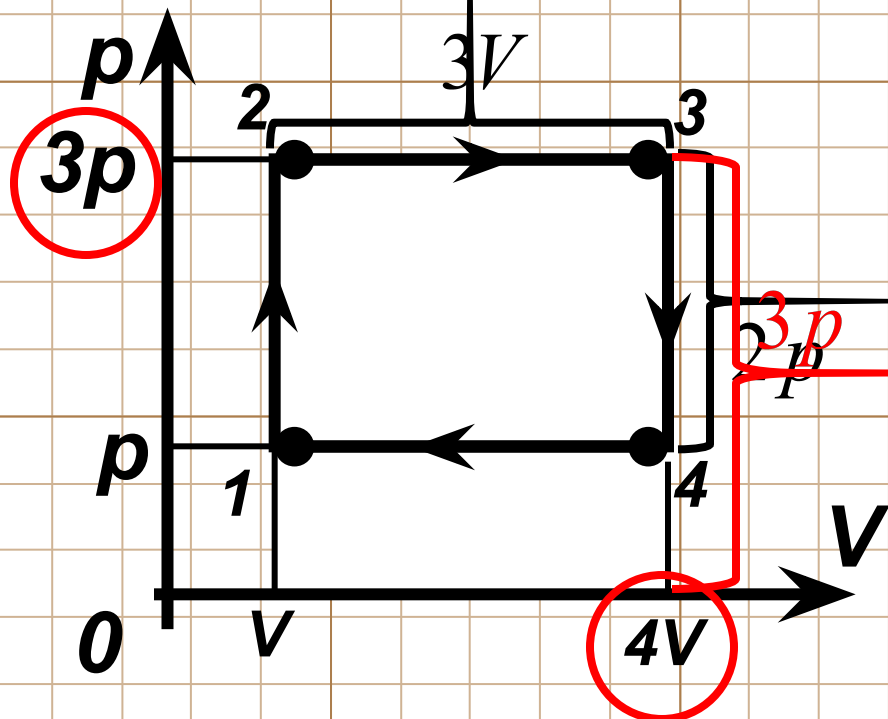
$$A_{4 \rightarrow 1} = -6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^5 = -600 \text{ Дж}$$

$$A = 1800 \text{ Дж}$$

$$A = 1800 - 600 = 1200 \text{ Дж}$$

$$A = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^5 = 1200 \text{ Дж}$$

Работа газа за цикл численно равна площади фигуры внутри цикла процесса в координатах $p(V)$!



$$A_{\text{D}} = 2p \cdot 3V = 6pV$$

$$A_{1 \rightarrow 3} = 3p \cdot 3V = 9pV$$

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

$$\Delta U_{1 \rightarrow 3} = \frac{3}{2} (p_3 V_3 - p_1 V_1)$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 3} = \frac{3}{2} (3p \cdot 4V - pV)$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 3} = \frac{33}{2} pV = 16,5 pV$$

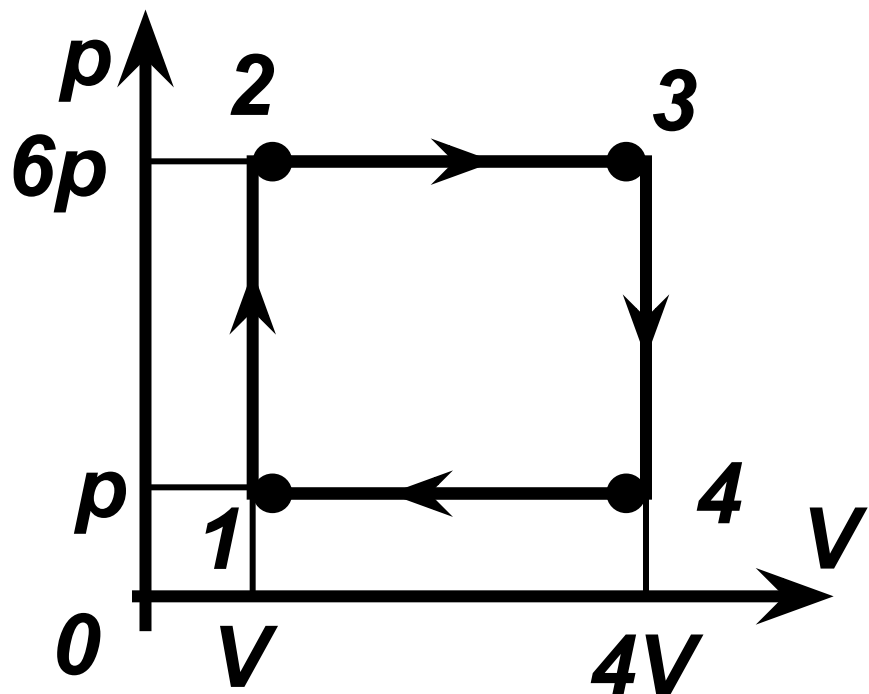
$$Q_H = A_{1 \rightarrow 3} + \Delta U_{1 \rightarrow 3}$$

$$Q_H = 9pV + 16,5pV = 25,5pV$$

$$\eta = \frac{A_{\text{D}}}{Q_H} = \frac{6pV}{25,5pV} = 0,235$$

Ответ: $\eta = 23,5\%$

Домашнее задание

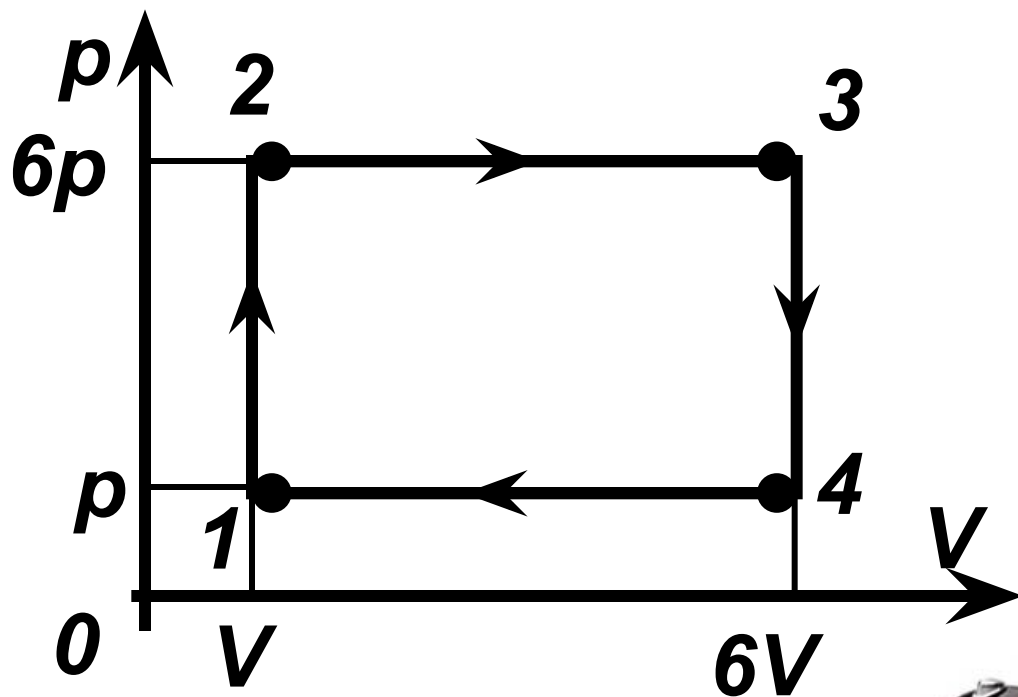


- 1) Найти к.п.д.
- 2) Перестроить график в координаты $p(T)$, $V(T)$



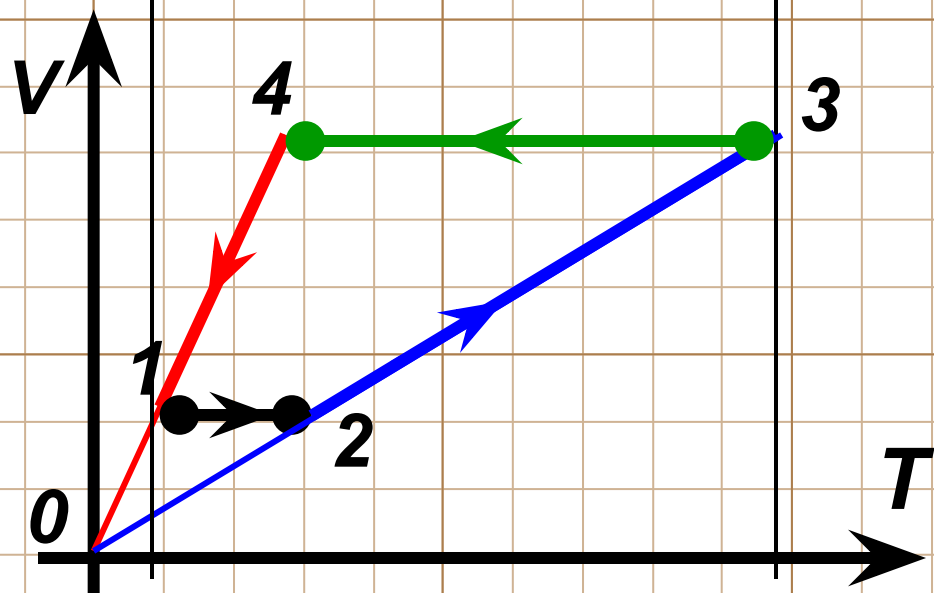
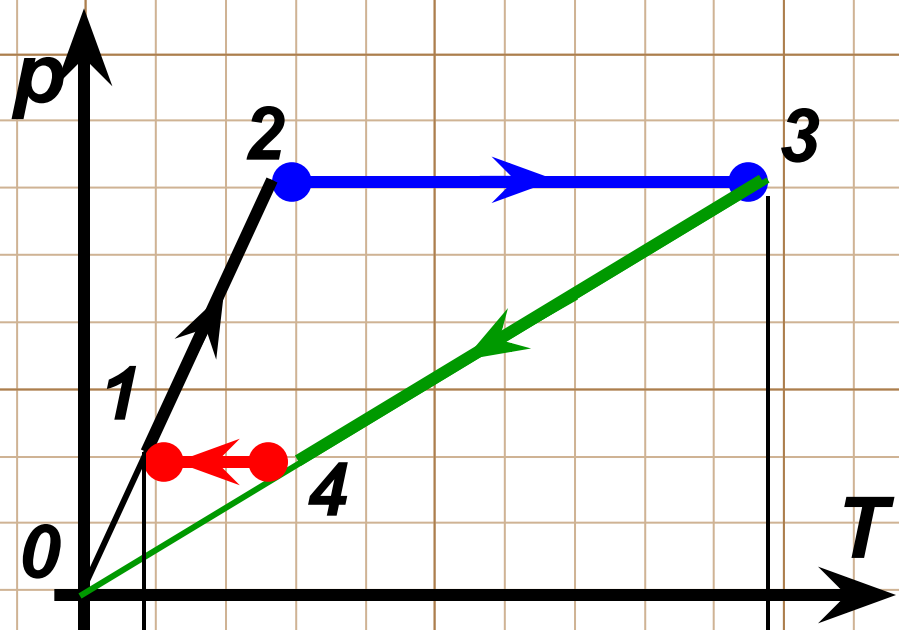
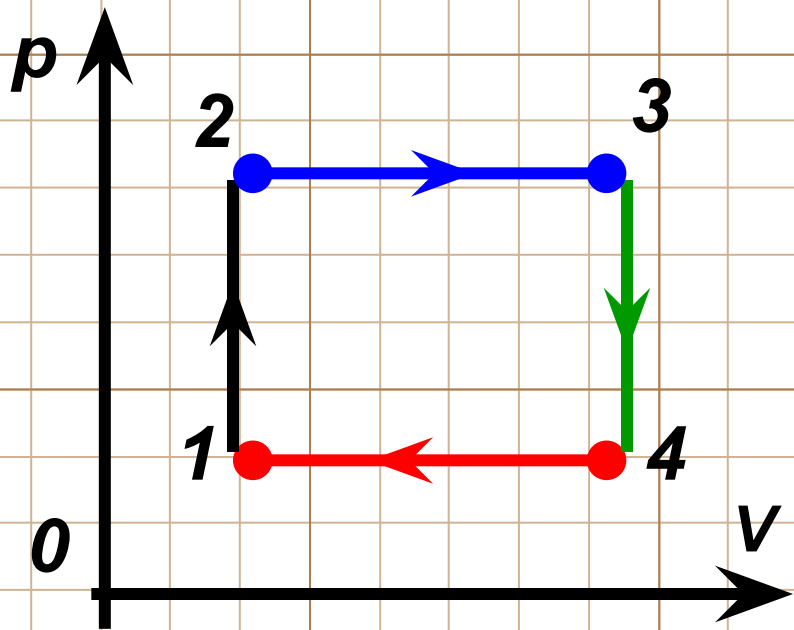


Домашнее задание

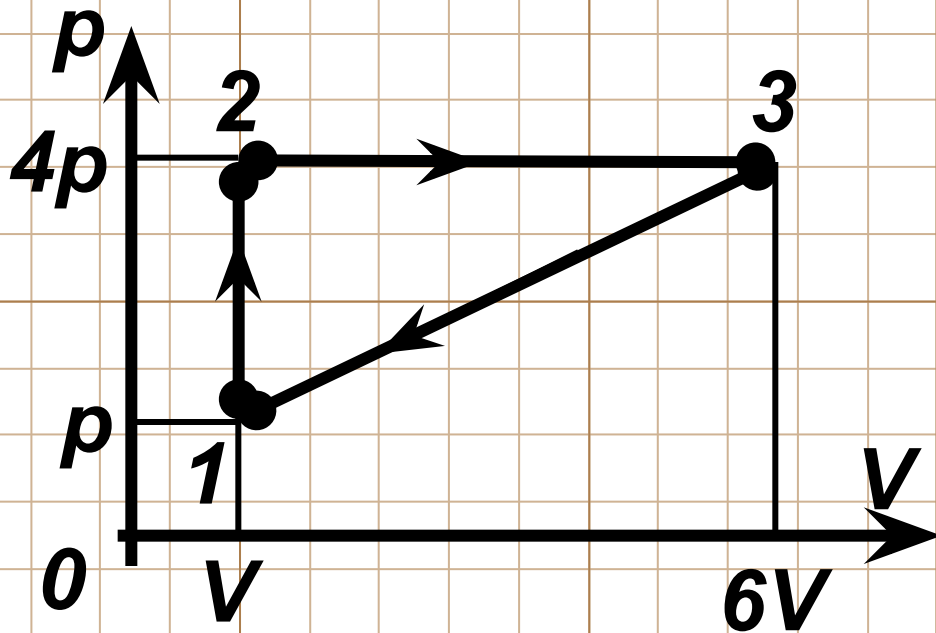


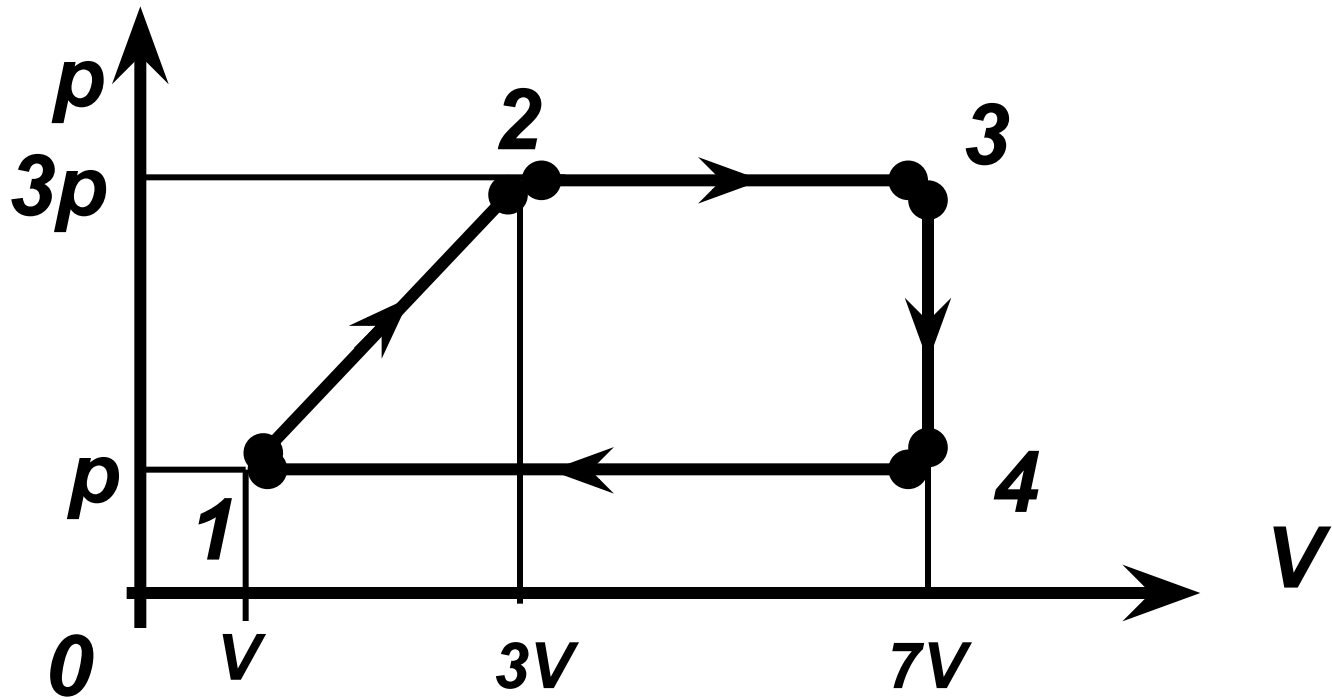
- 1) Найти к.п.д.
- 2) Перестроить график в координаты $p(T)$, $V(T)$



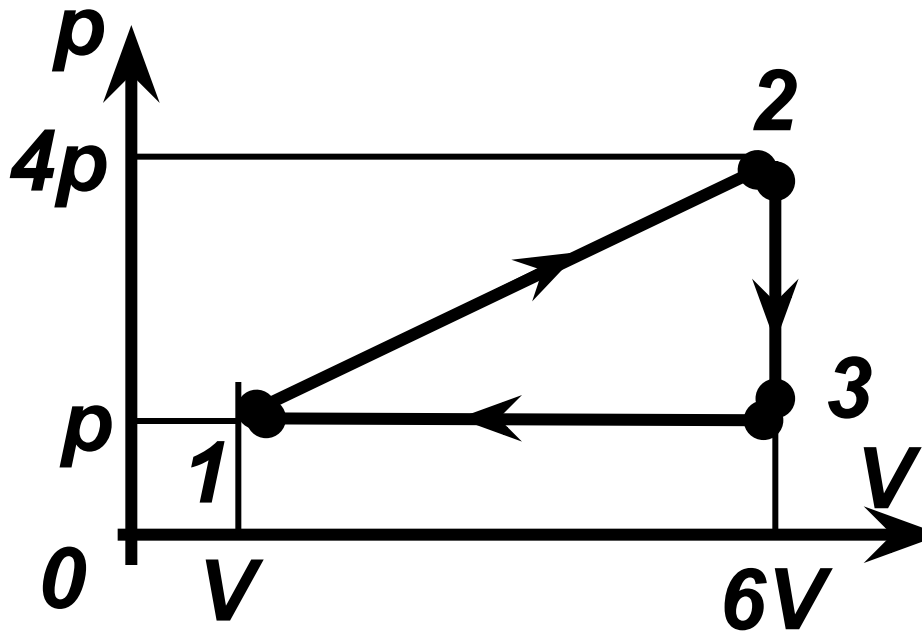


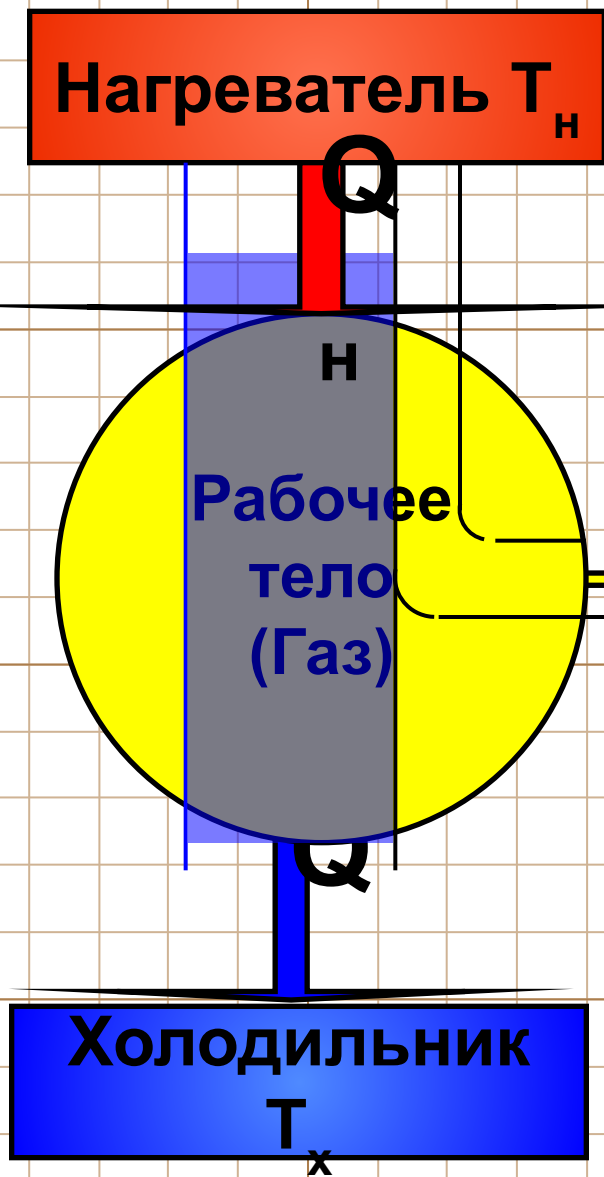
Домашнее задание





Домашнее задание

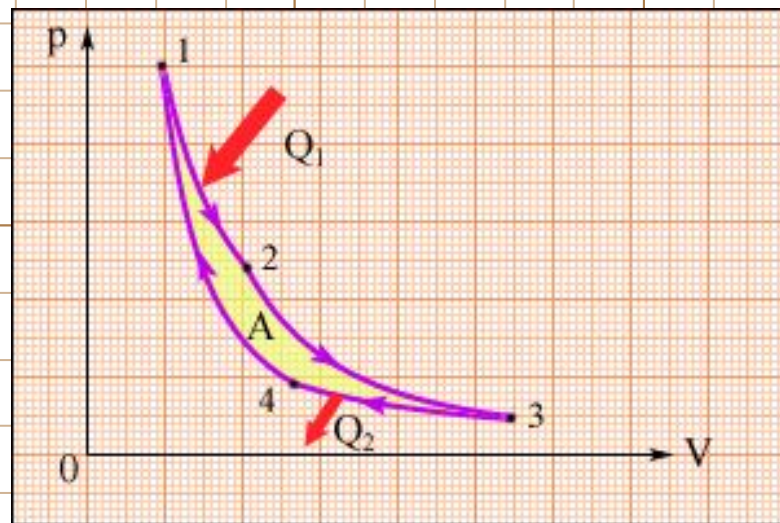




$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H}$$

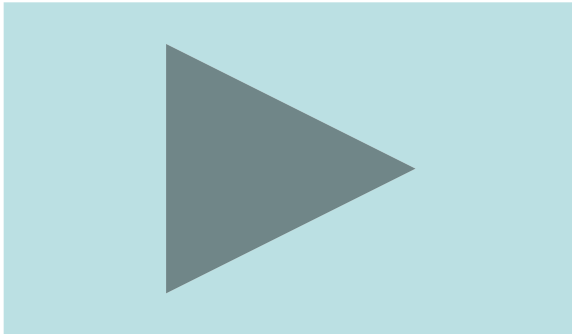
Для ИТМ

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{T_H - T_x}{T_H}$$











- 1. Насос предварительной подкачки
- 2. Впускной клапан
- 3. Плунжер
- 4. Форсунка
- 5. Нагнетательный клапан
- 6. Выпускной клапан
- 7. Вода
- 8. Поршень
- 9. Шатун
- 10. Коленчатый вал
- 11. Вихревая камера
- 12. Кулачок

УСТРОЙСТВО ДИЗЕЛЯ (СХЕМА)

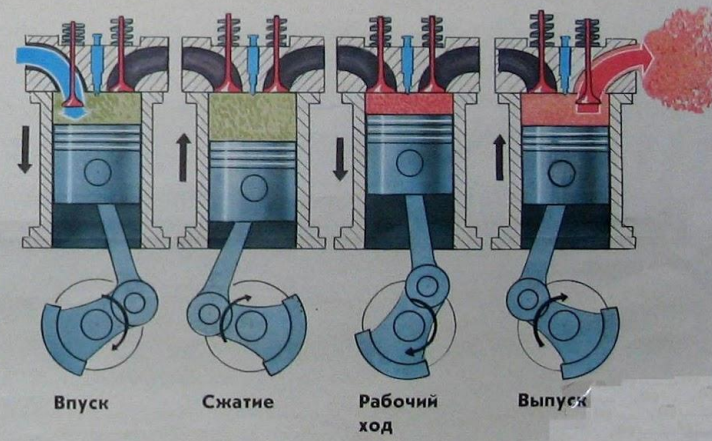
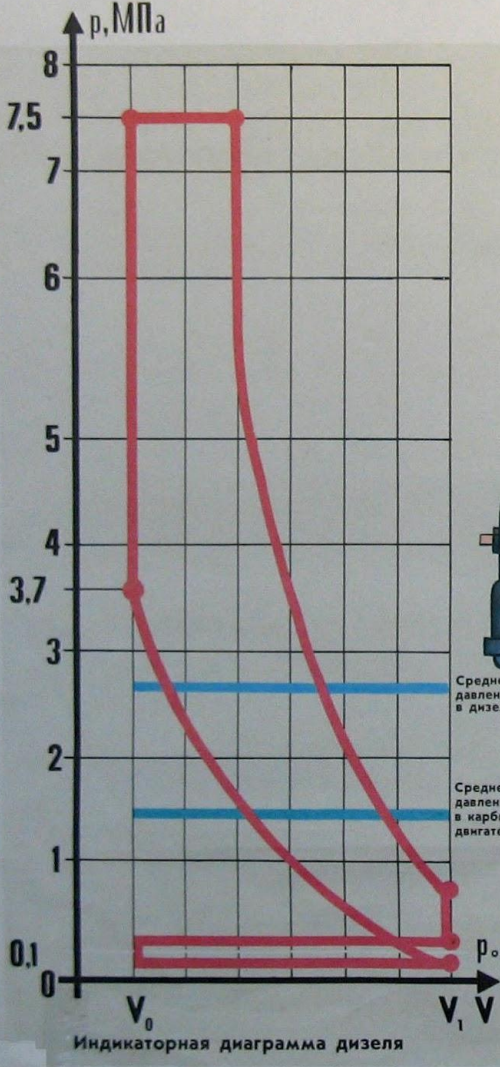
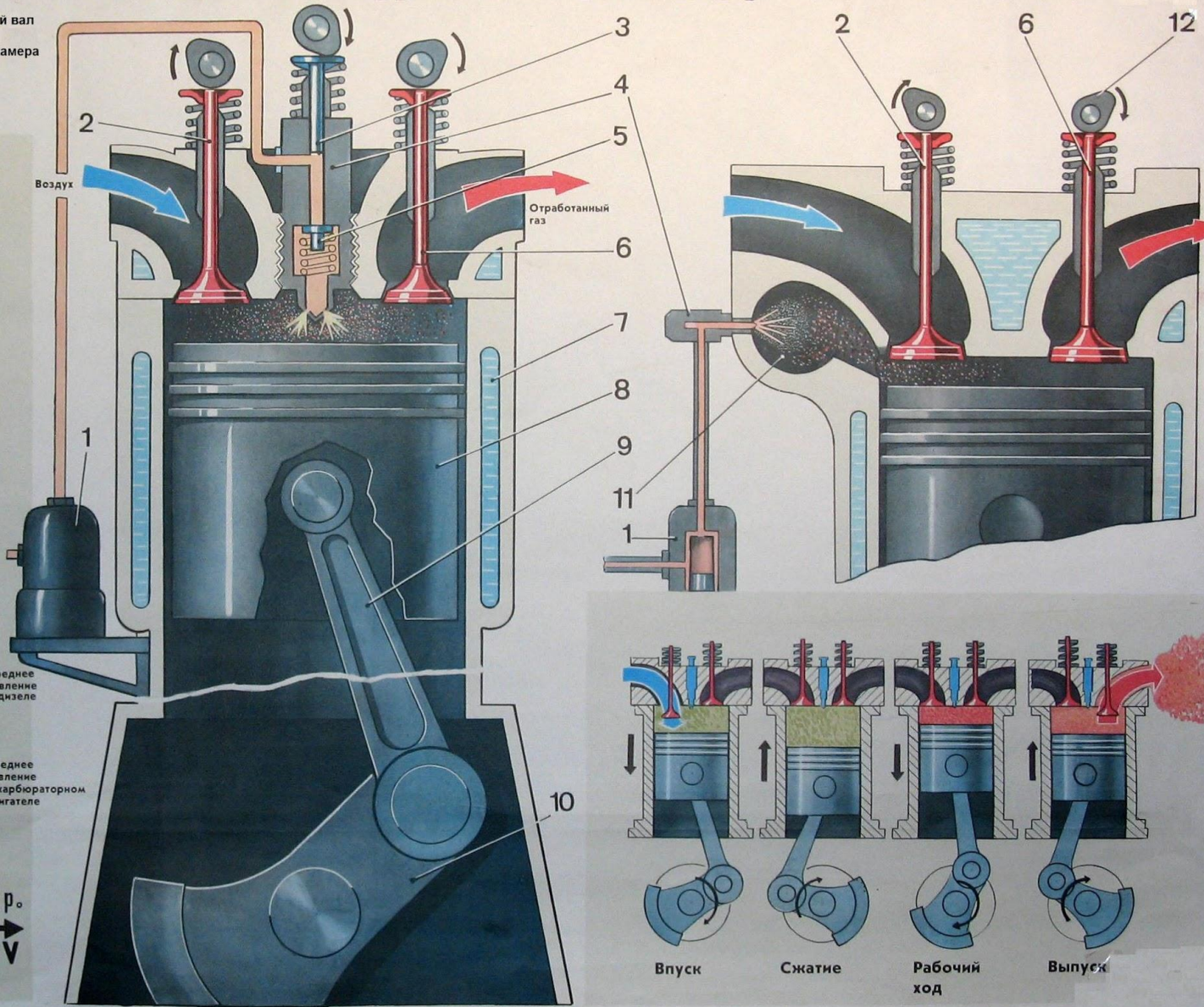


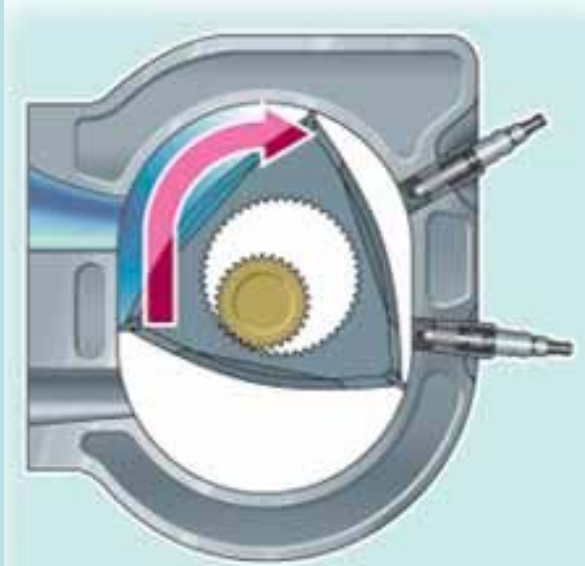
СХЕМА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

ПАР

- 1. Корпус турбины
- 2. Сопловый аппарат
- 3. Лопатки диска ротора
- 4. Лопатки диска статора
- 5. Конденсатор
- 6. Генератор



1. Впуск.



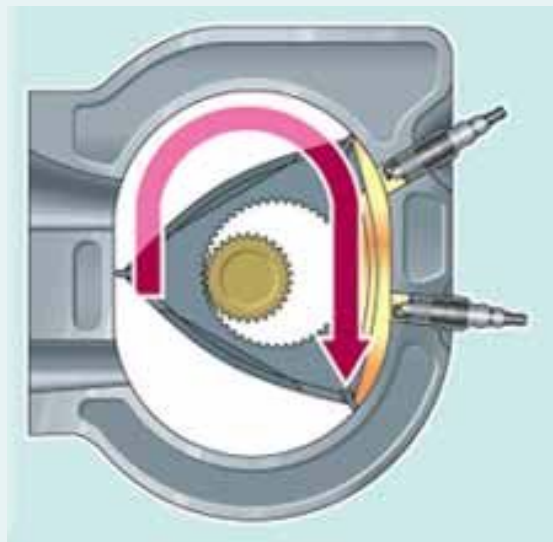
Одной из граней ротор затягивает топливно-воздушную смесь в камеру двигателя

2. Сжатие.



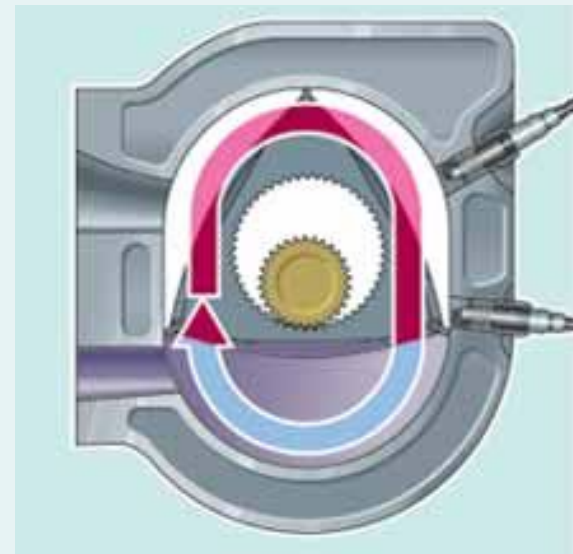
Проталкивая смесь по направлению к свечам зажигания, ротор сжимает ее

3. Рабочий ход.



После воспламенения смеси расширяющиеся газы вращают ротор вокруг эксцентрика, совершая полезную работу

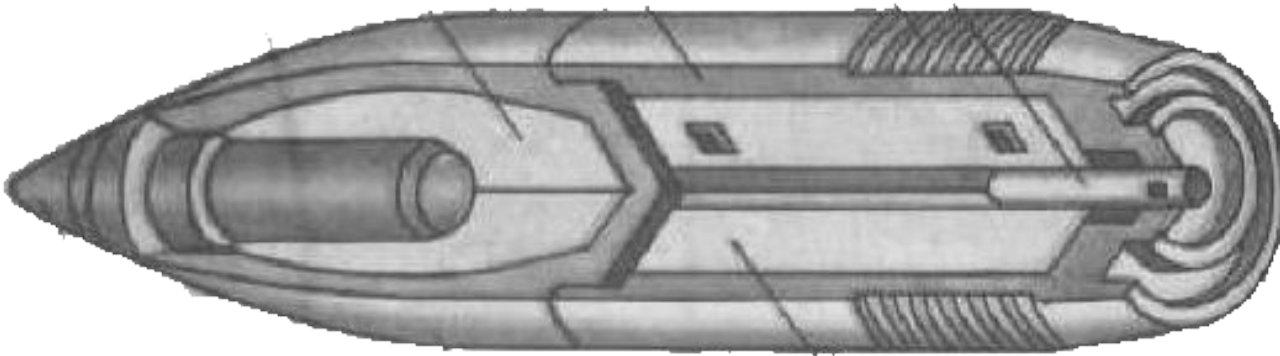
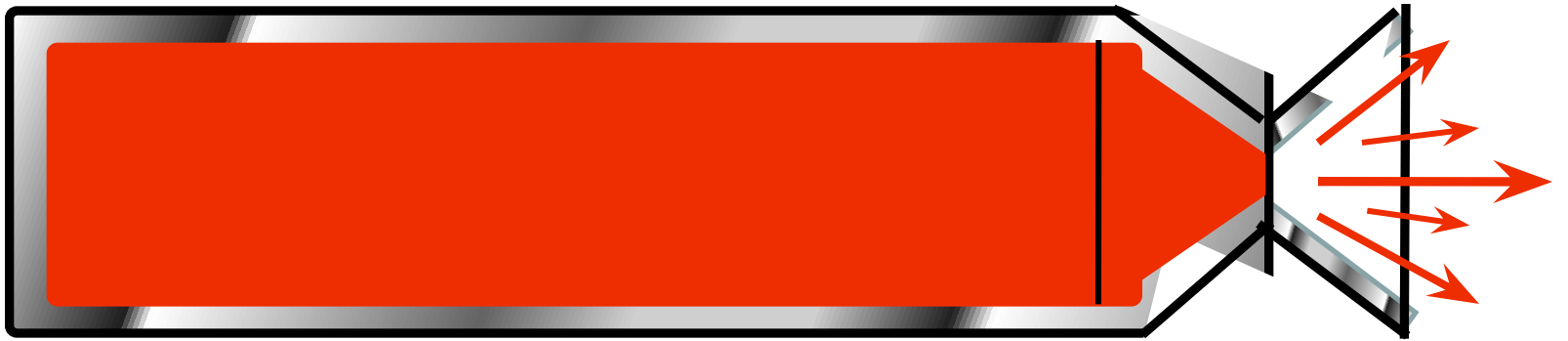
4. Выпуск

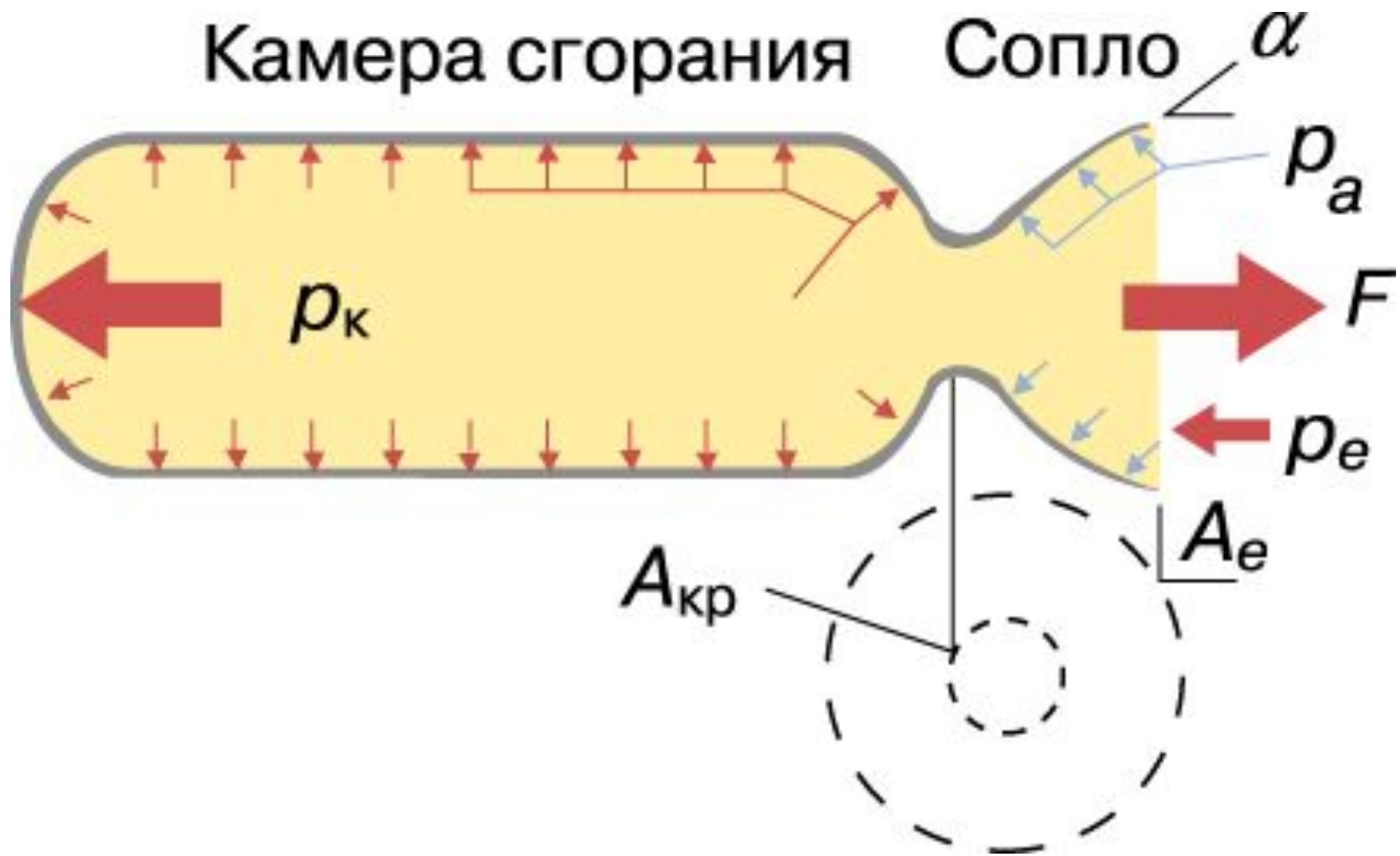


Как только одна из вершин ротора открывает выпускное окно, отработавшие газы удаляются в атмосферу

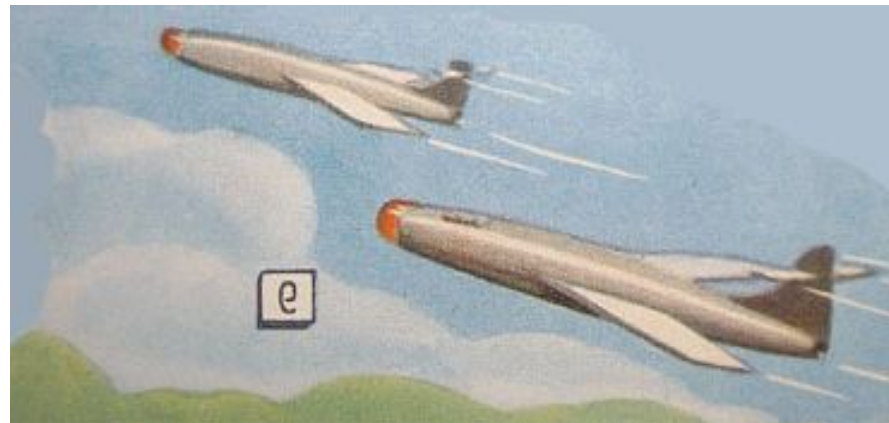
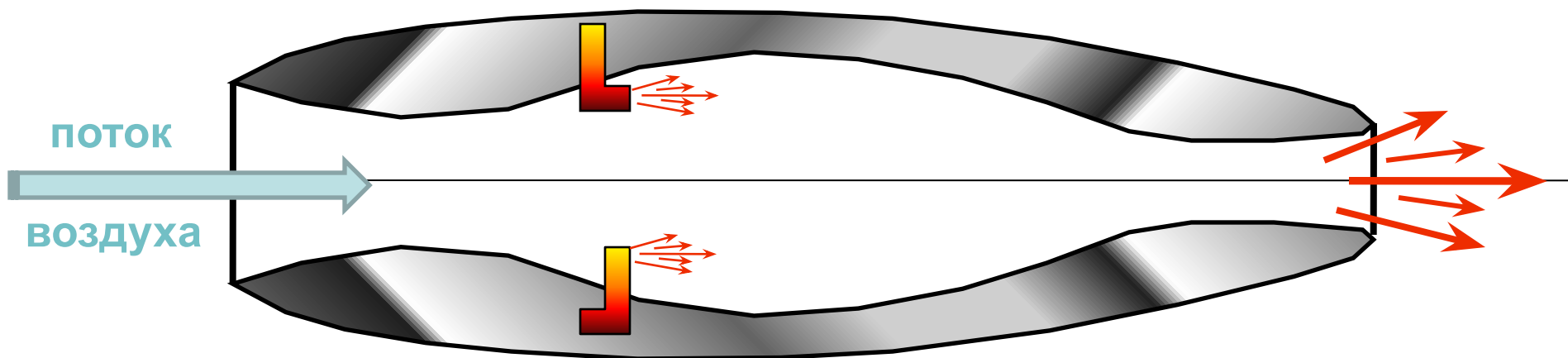


Реактивный двигатель на твердом топливе

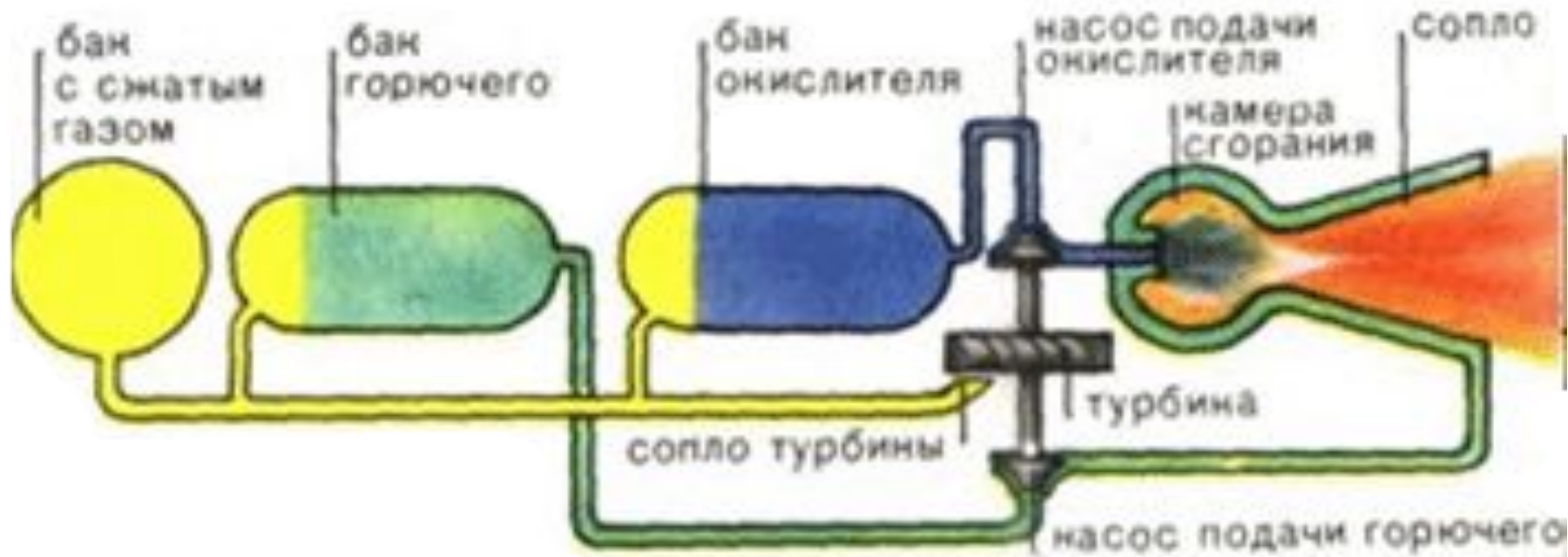
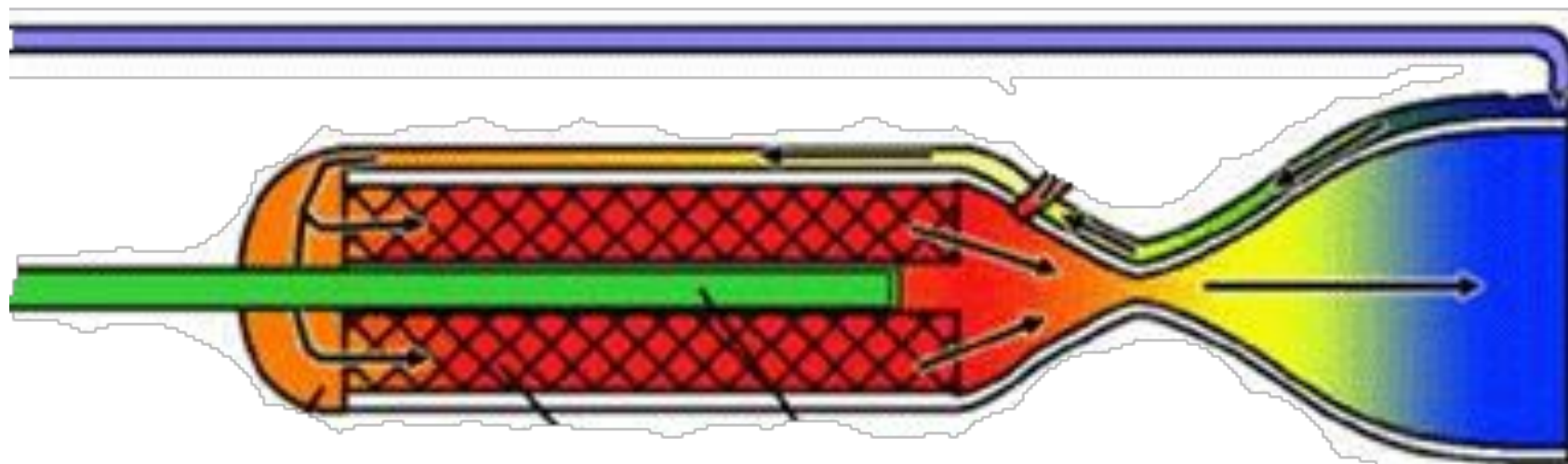




Прямоточный реактивный двигатель



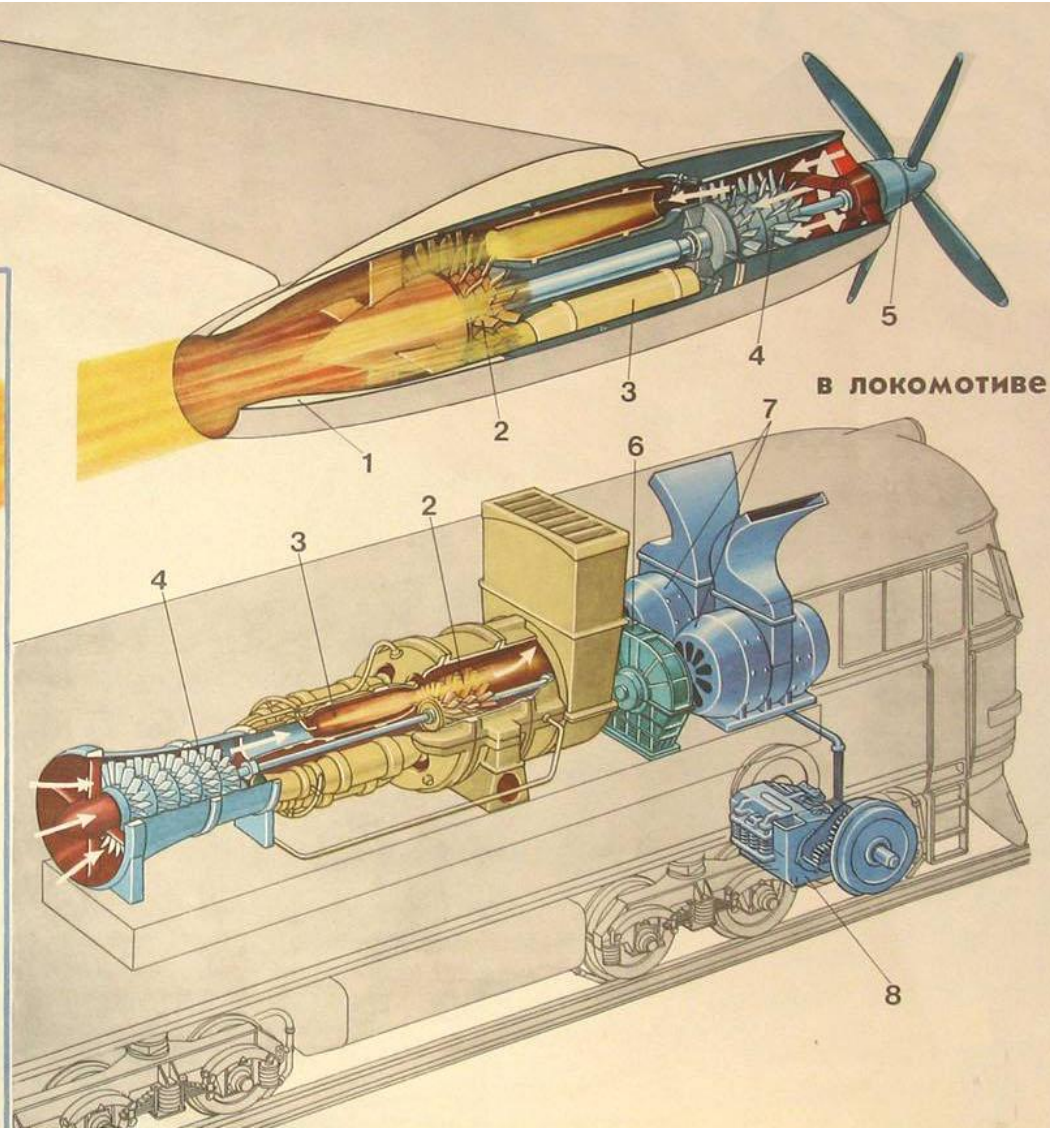
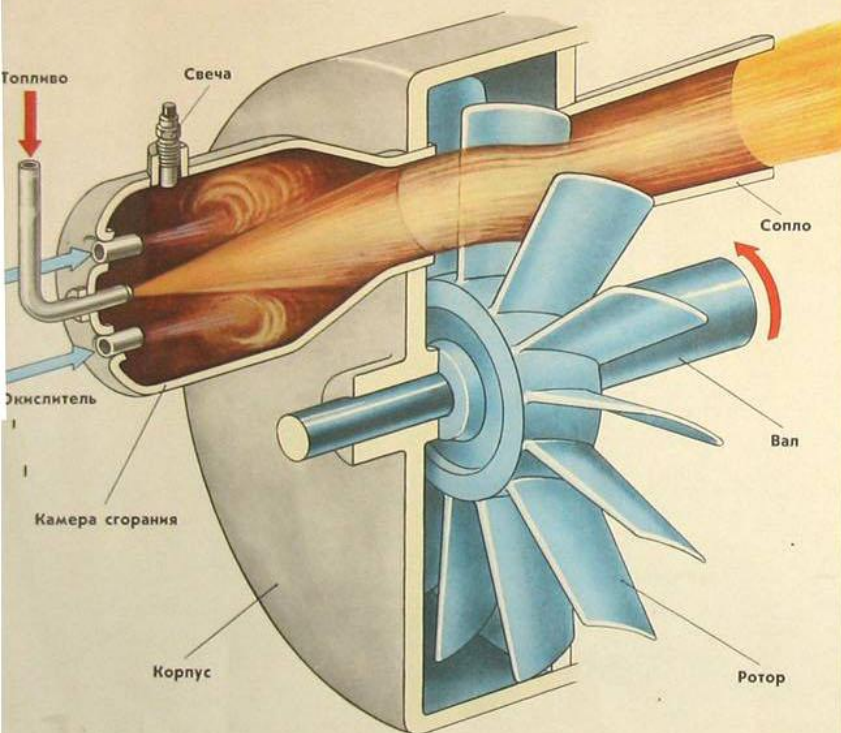
Жидкостный реактивный двигатель



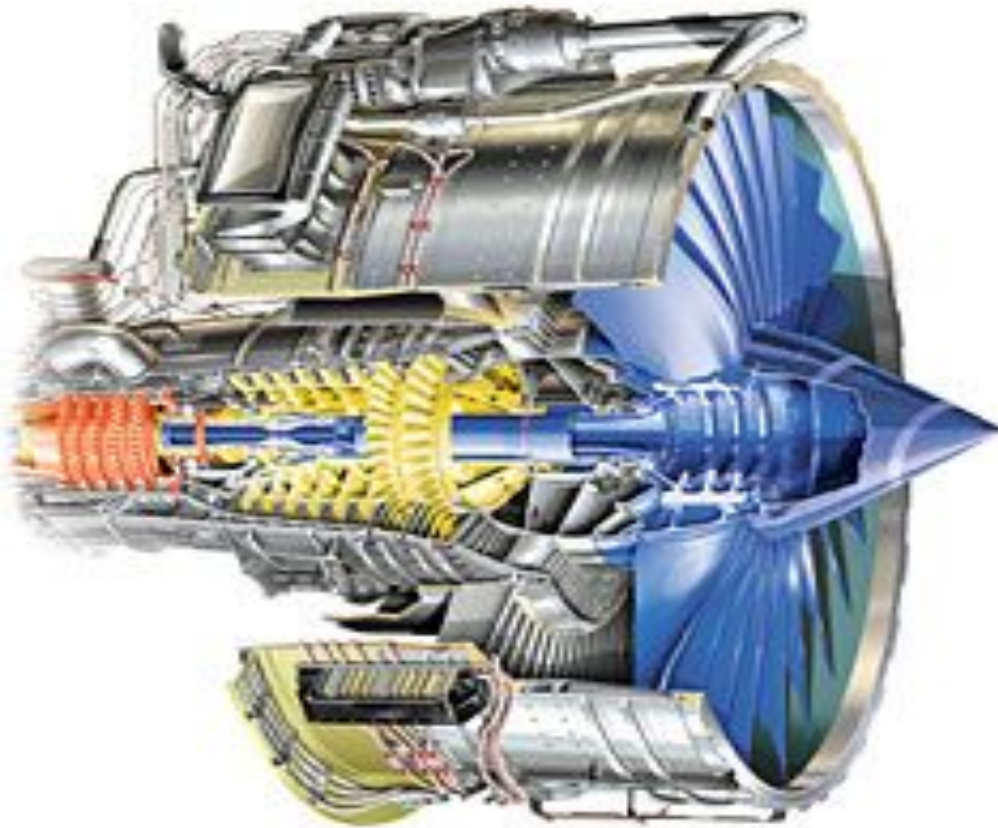
Газотурбинный реактивный двигатель

1. Сопловой аппарат
2. Турбина
3. Камеры сгорания
4. Компрессор
5. Воздушный винт
6. Редуктор
7. Электрические генераторы
8. Тяговый электродвигатель

Принципиальная схема газовой турбины



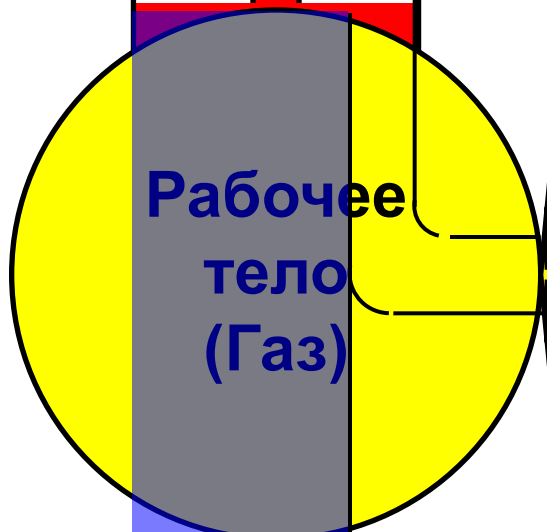
Газотурбинный реактивный двигатель





Нагреватель T_H

Q



A

Q

Холодильник T_x



ХОЛОДИЛЬНИК

