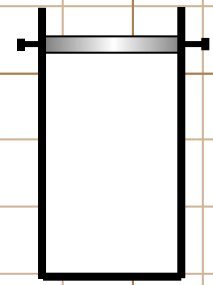


# Основы термодинамики

Зверев В.А. школа № 258

Санкт-Петербург 2012 г.

# Внутренняя энергия (U)



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

$E_n$  — суммарная потенциальная энергия взаимодействия молекул

$E_k$  — суммарная кинетическая энергия движения молекул

Для идеального газа:  $E_n = 0$

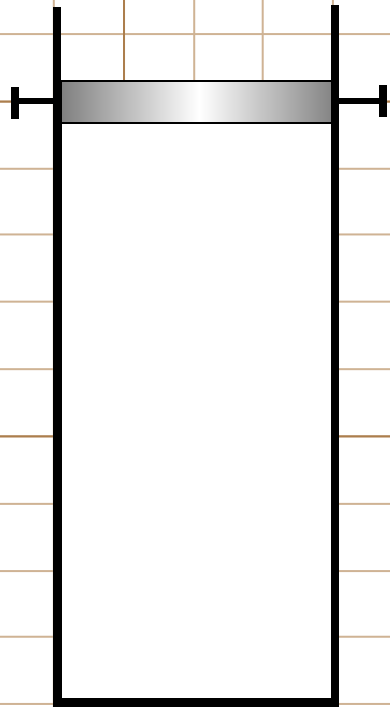
$$\left. \begin{aligned} E_k &= \bar{E}N \\ \bar{E} &= \frac{3}{2}kT \\ N &= \nu \cdot N_A \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U = E_k &= \bar{E}N = \frac{3}{2}kT \cdot \nu \cdot N_A \\ k \cdot N_A &= R \end{aligned}$$

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

# Работа в термодинамике

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

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



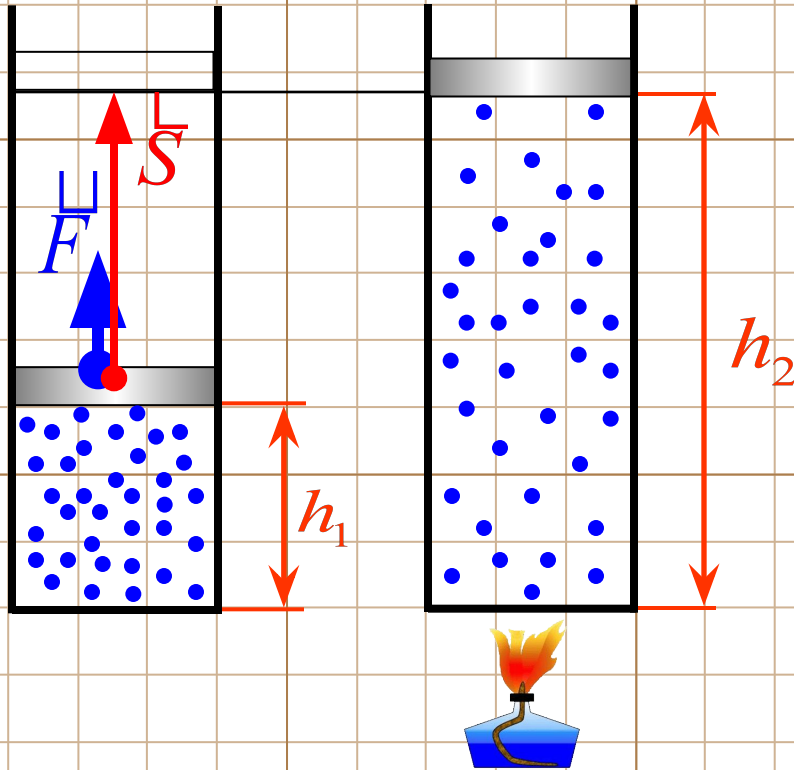
$$A = |\mathbf{F}| \cdot 0 \cdot \cos\alpha$$

$$A = 0$$

# Работа в термодинамике

$$A = |F| \cdot |S| \cdot \cos \alpha$$

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



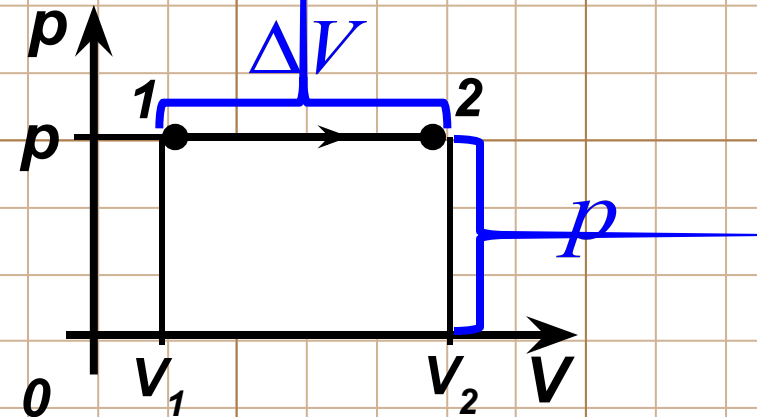
$$F = pS_* \quad S = h_2 - h_1$$

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

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

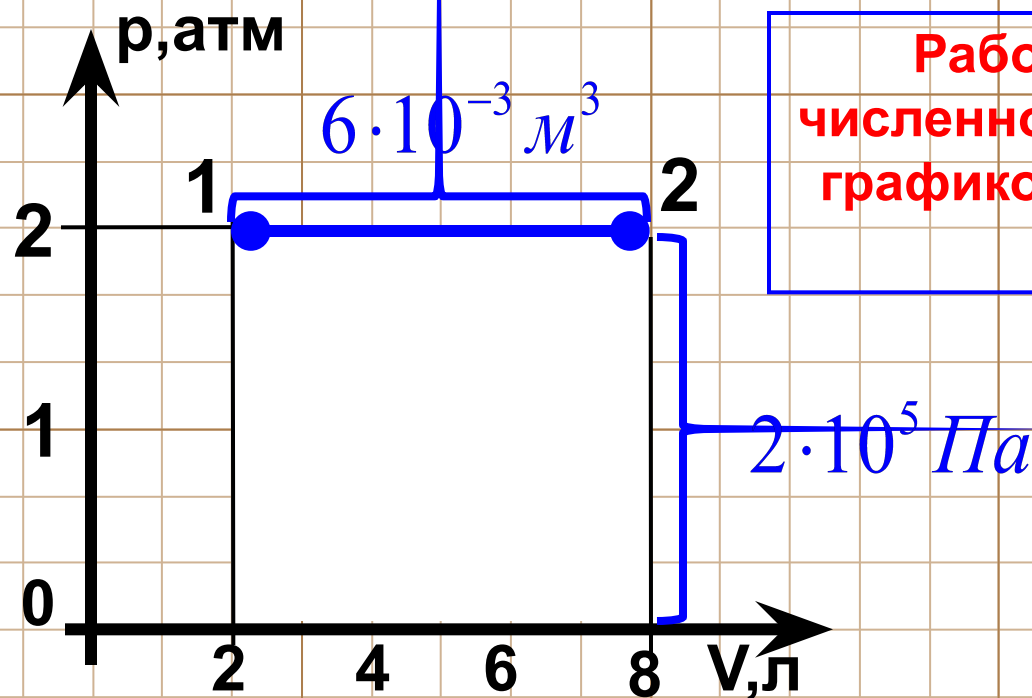
$$A = p\Delta V = \nu R\Delta T$$

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?

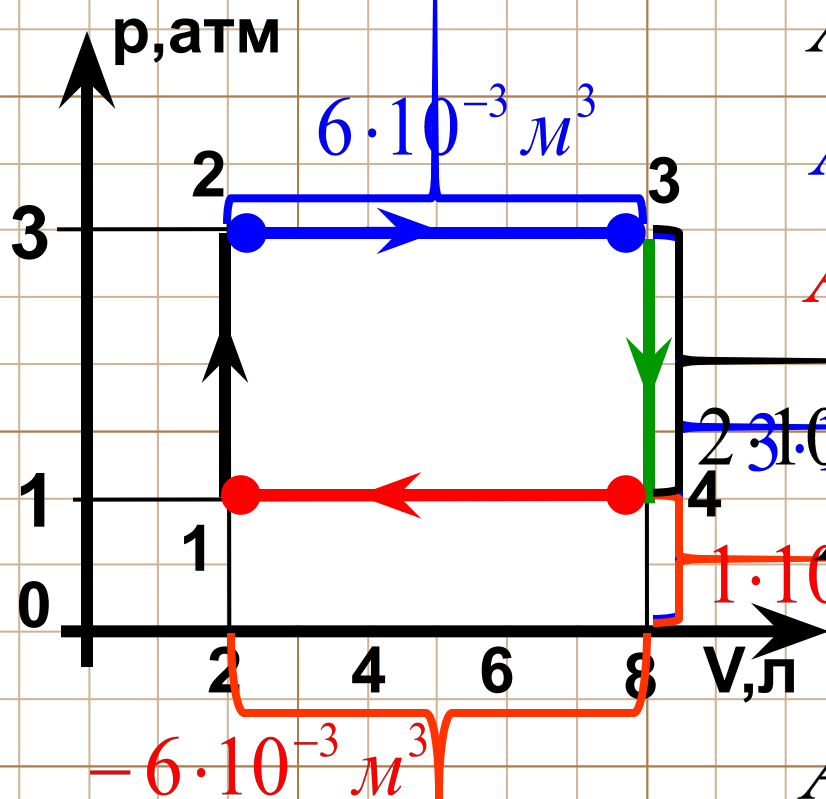


Работа газа в термодинамике численно равна площади фигуры под графиком процесса в координатах  $p$  ( $V$ )!

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

# 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.



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

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

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

$$A = 1800 - 600 = 1200 \text{ Дж}$$

$$A_{\Sigma} = 1800 - 600 = 1200 \text{ Дж}$$

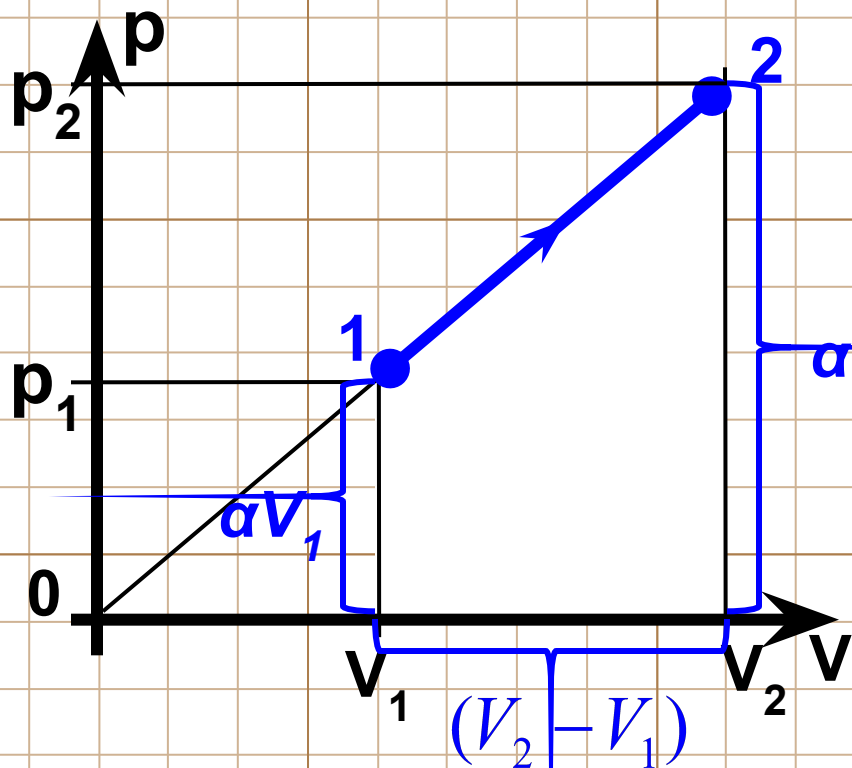
$$A_{\Sigma} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^5 = 1200 \text{ Дж}$$

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  $p(V)$ !



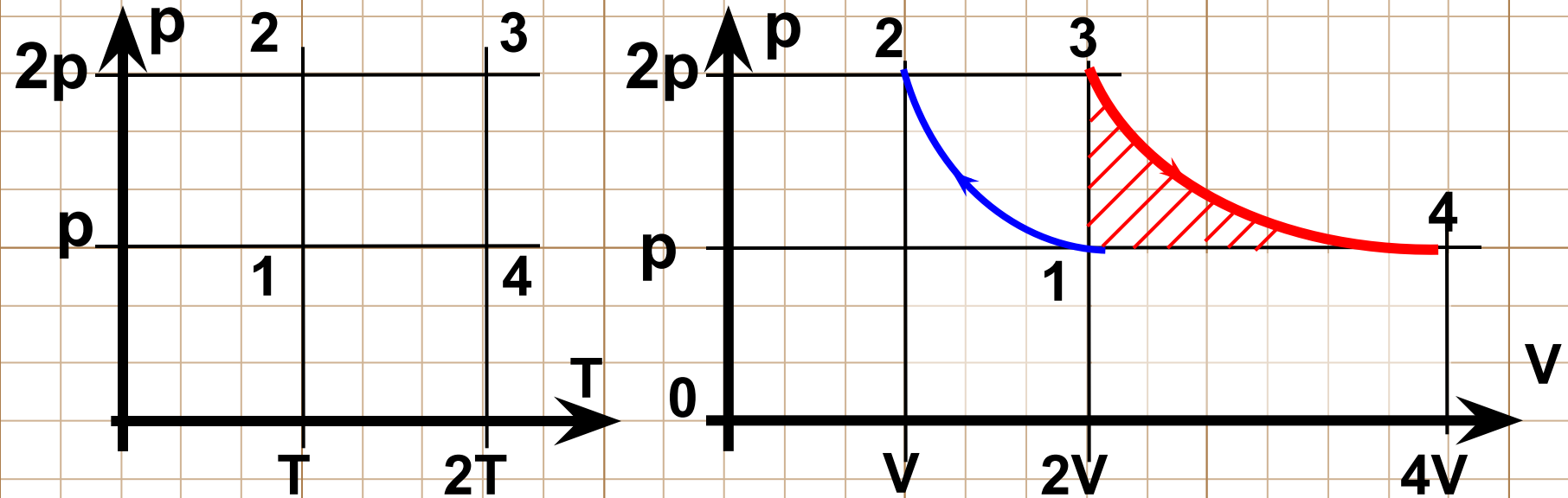
$$A = \frac{\alpha V_2 + \alpha V_1}{2} \cdot (V_2 - V_1)$$

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

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

# 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  $27^\circ\text{С}$ . На расстоянии  $0,8 \text{ м}$  от дна цилиндра находится поршень массой  $20 \text{ кг}$ . Атмосферное давление нормальное. Какую работу совершит газ при его нагревании до  $37^\circ\text{С}$ ?

Дано:

$$S = 0,01 \text{ м}^2$$

$$t_1 = 27^\circ\text{С}$$

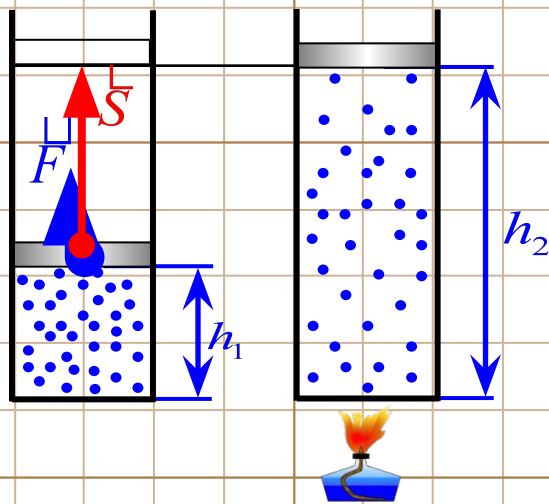
$$t_2 = 37^\circ\text{С}$$

$$h_1 = 0,8 \text{ м}$$

$$m_n = 20 \text{ кг}$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Па}$$

$$A = ?$$



$$p = \text{const}$$

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

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

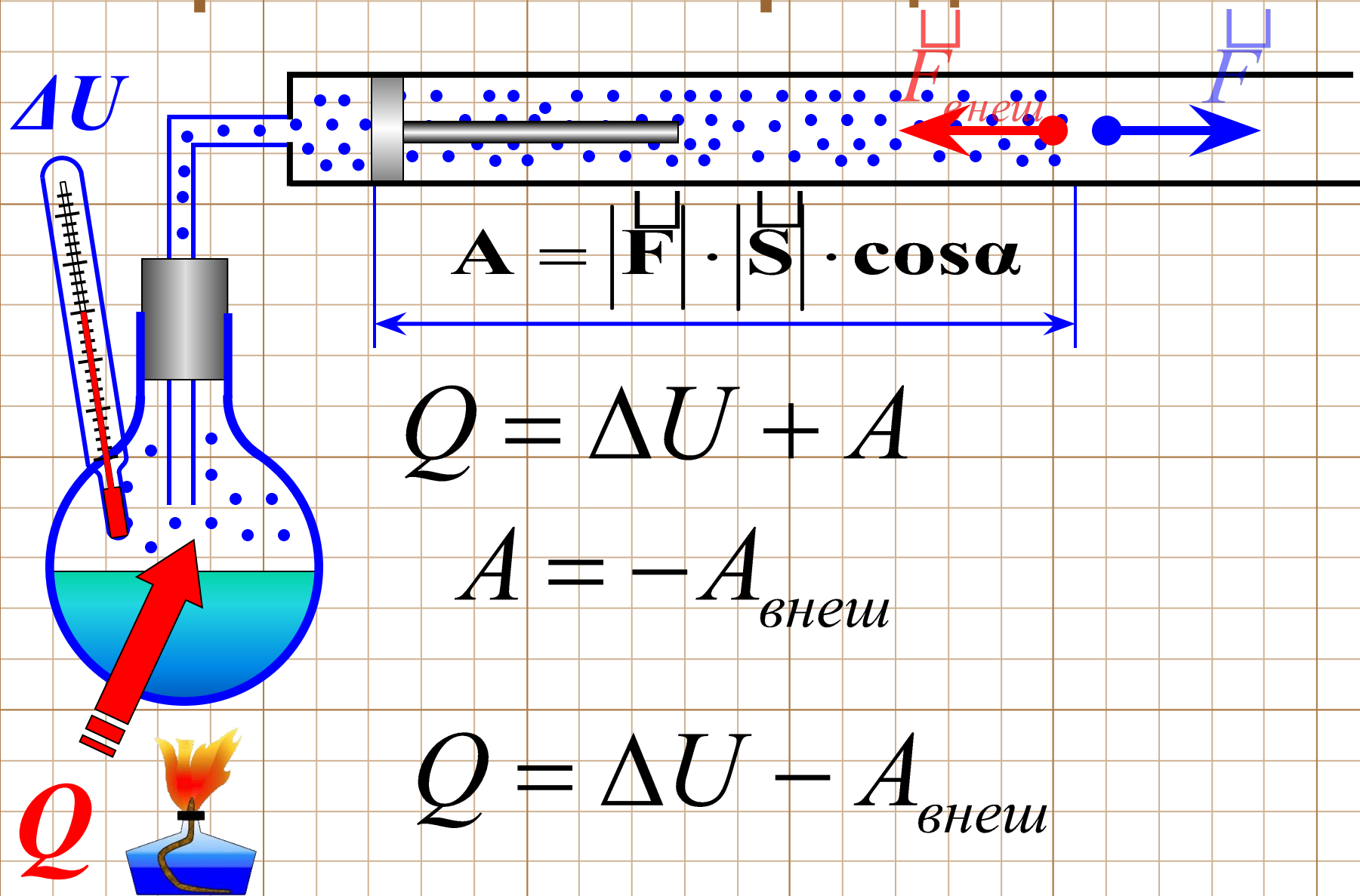
$$p = p_0 + \frac{m_n g}{S} \quad V_1 = S h_1$$

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

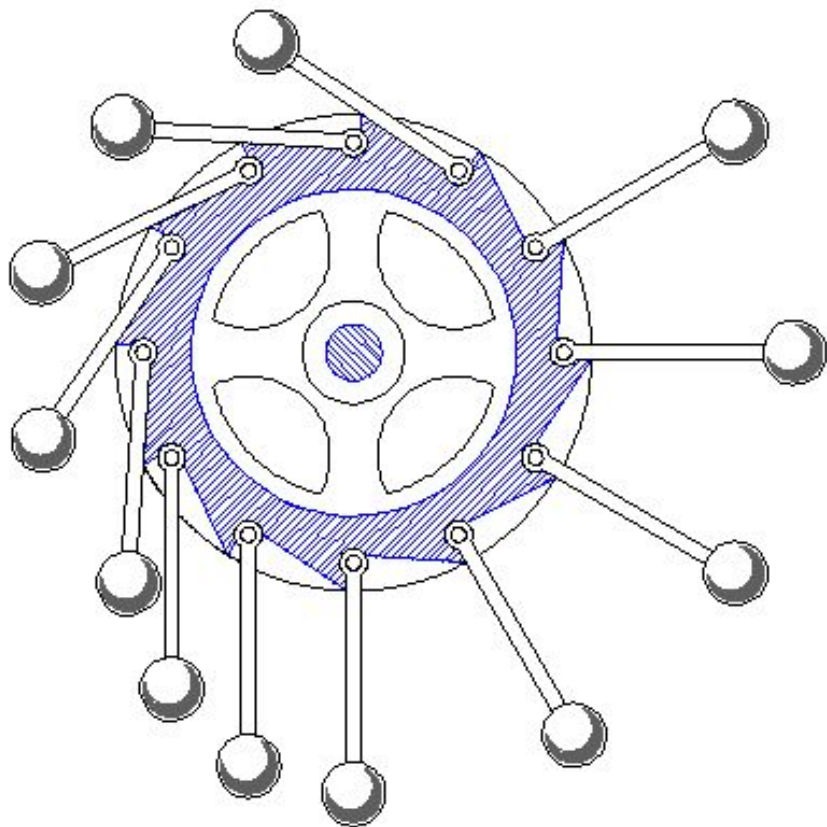
$$A = \frac{(10^5 \cdot 0,01 + 20 \cdot 10) \cdot 0,8}{300} \cdot 10 = 32 \text{ Дж}$$

Ответ: 32 Дж

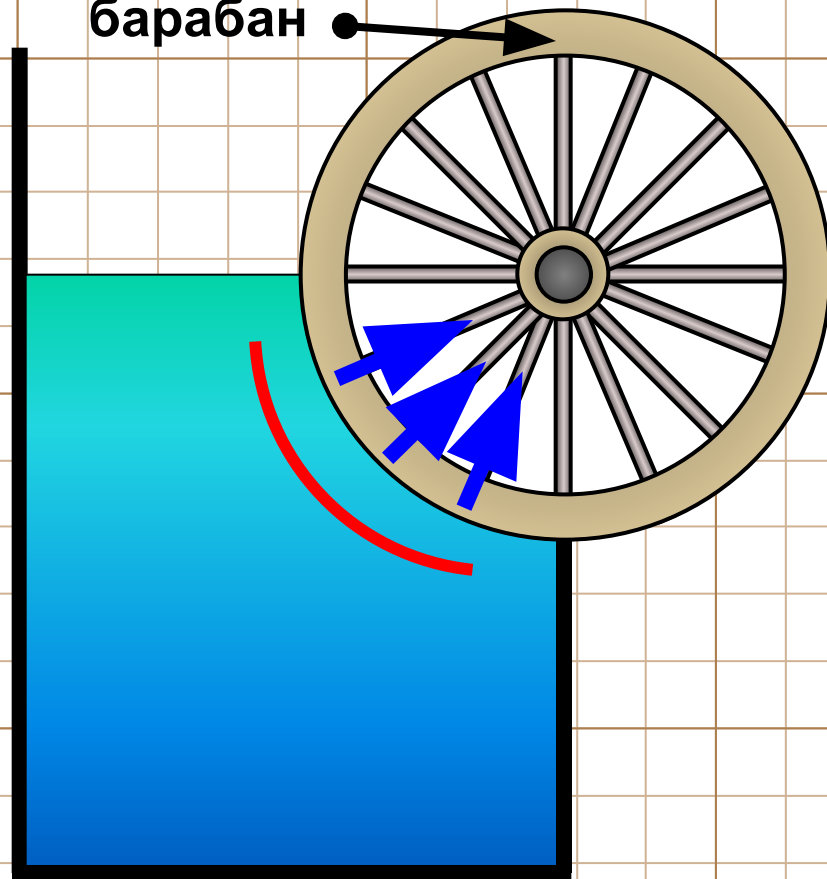
# Первый закон термодинамики



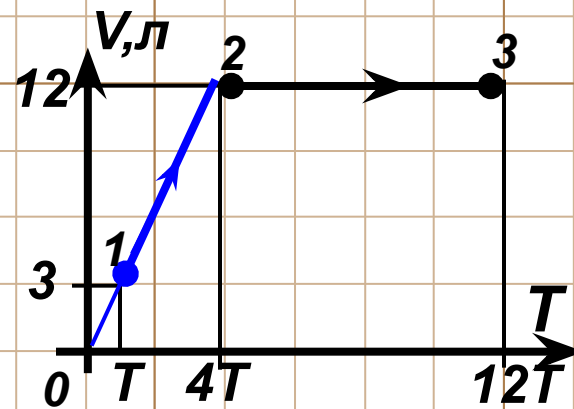
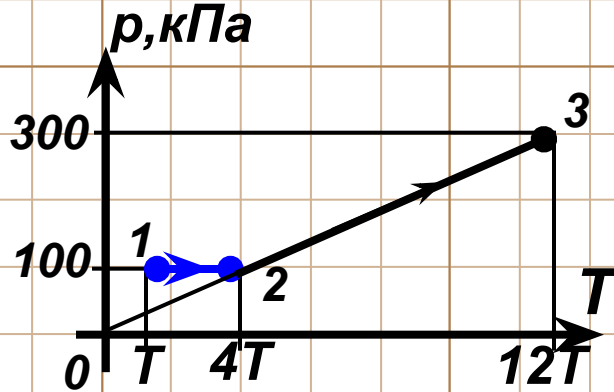
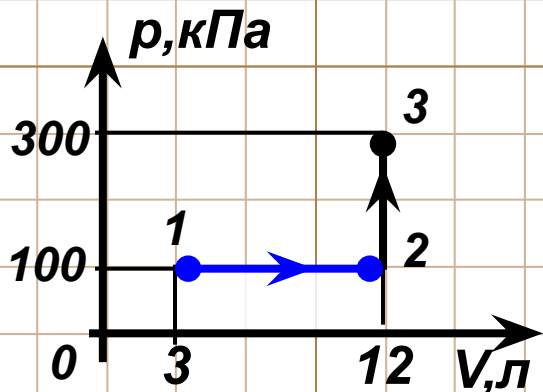
# Первый закон термодинамики запрещает вечный двигатель первого рода



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.



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

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

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

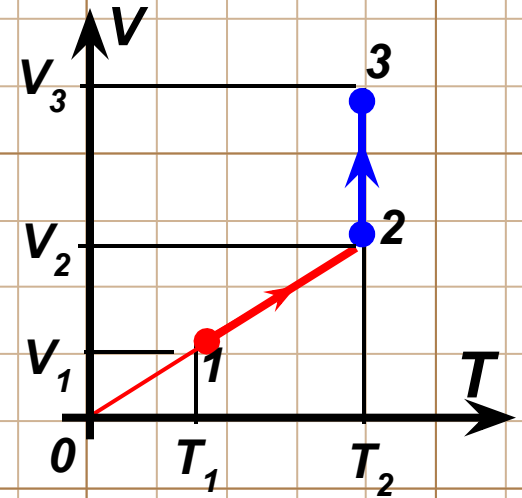
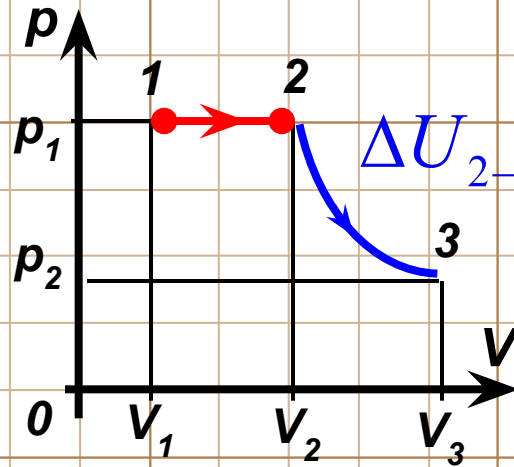
Идеальный газ при изобарном нагревании и изотермическом расширении получил 16 кДж тепла. При этом его внутренняя энергия увеличилась на 6 кДж. Нарисовать графики процессов с газом в координатах  $(p, V)$  и  $(V, T)$ . Какую работу совершил газ при изотермическом расширении?

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.

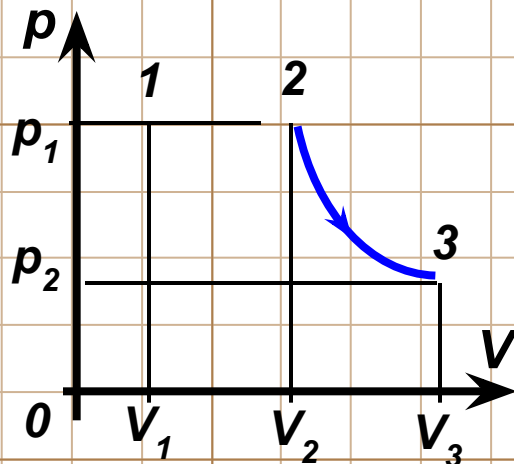
Одноатомный газ расширяется сначала изобарно, а затем изотермически. Работа, совершаемая газом при расширении, равна 800 Дж. В процессе изотермического расширения газ получил 300 Дж тепла. Найти изменение внутренней энергии газа.

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:

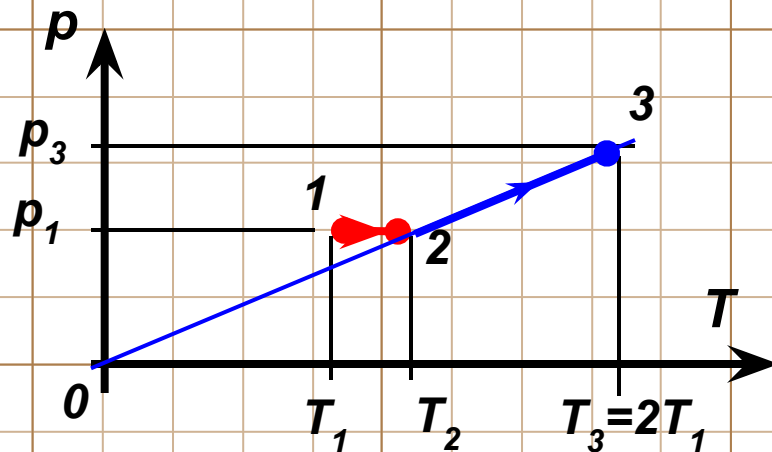
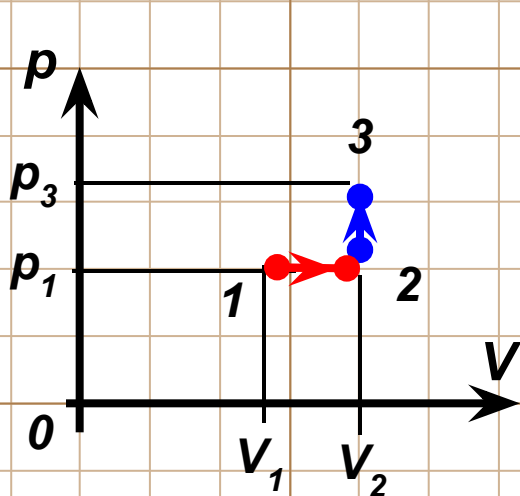
$$V = 2 \text{ л}$$

$$A = 100 \text{ Дж}$$

$$T_3 = 2T_1$$

---


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



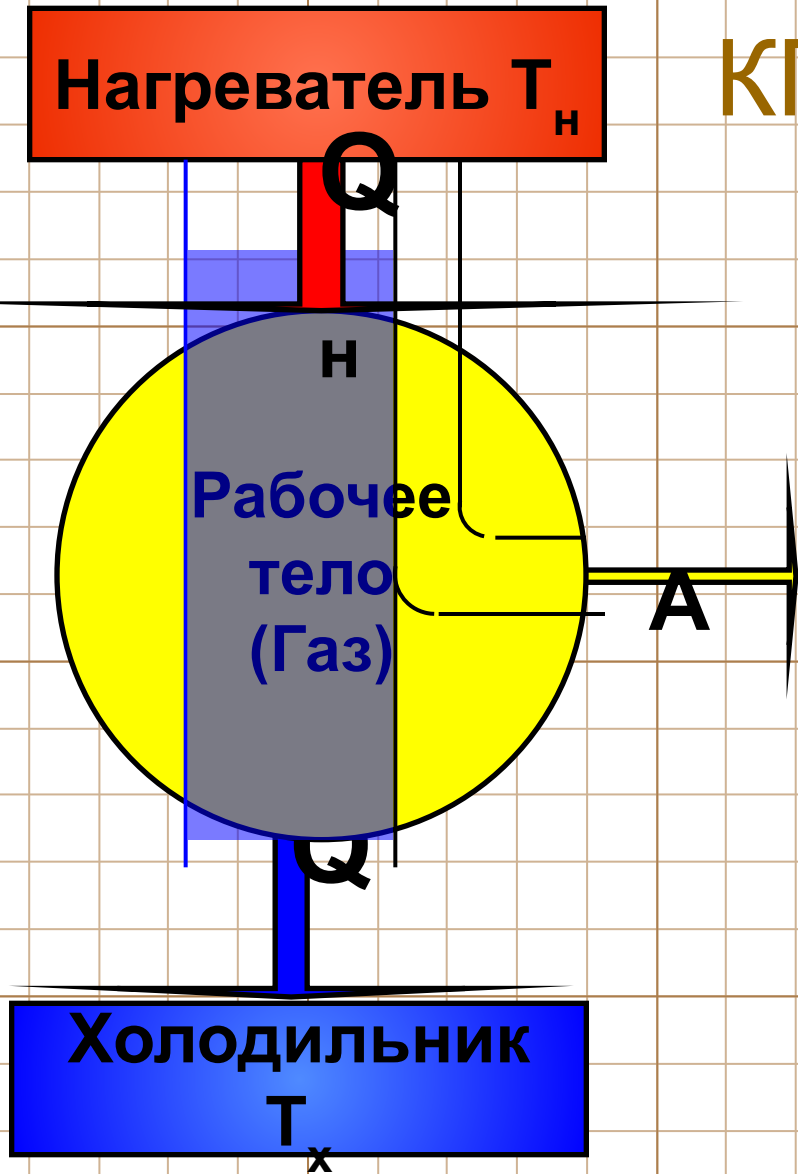
10 г аргона нагревают сначала изохорно, а затем изобарно так, что в результате температура газа возросла на  $100^{\circ}\text{C}$ . При этом газ совершил работу 62,32 Дж. Молярная масса аргона 40 г/моль. Найти изменение внутренней энергии газа в процессе изохорического нагревания. Ответ: 218.14 Дж.



# КПД тепловых машин

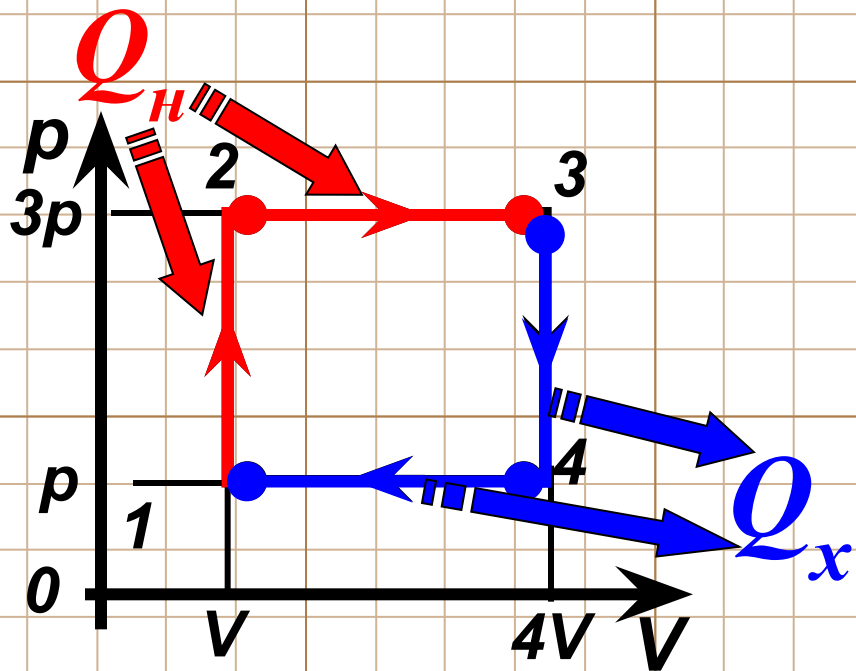


# КПД тепловых машин



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

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



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

$$Q = A + \Delta U$$

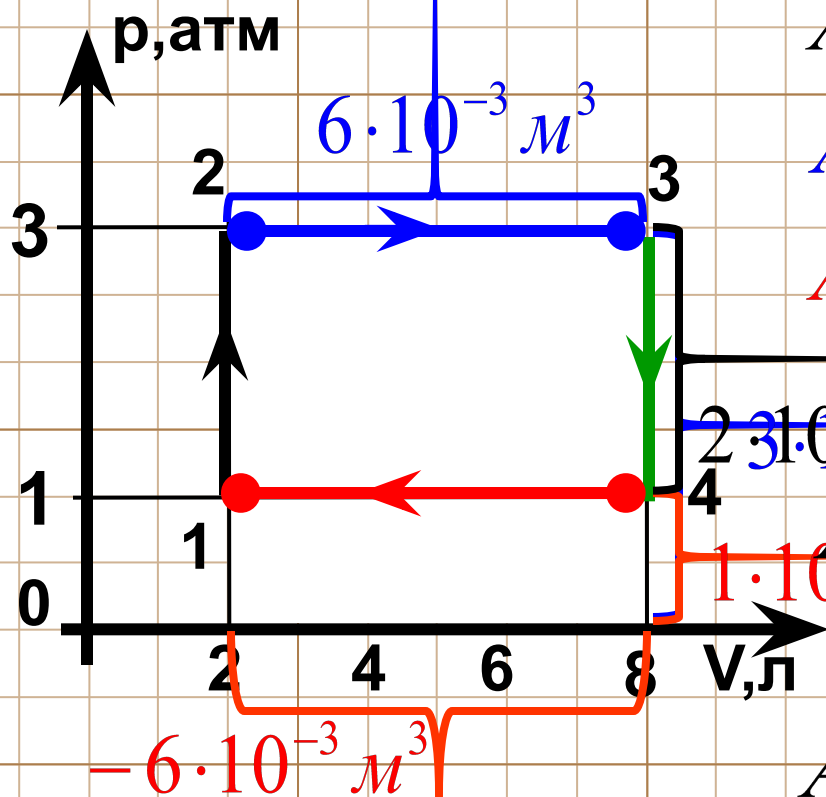
$$Q_H = Q_{1 \rightarrow 3}$$

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

	T	p	V	$\frac{pV}{T} = const$	A	$\Delta U$	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.



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

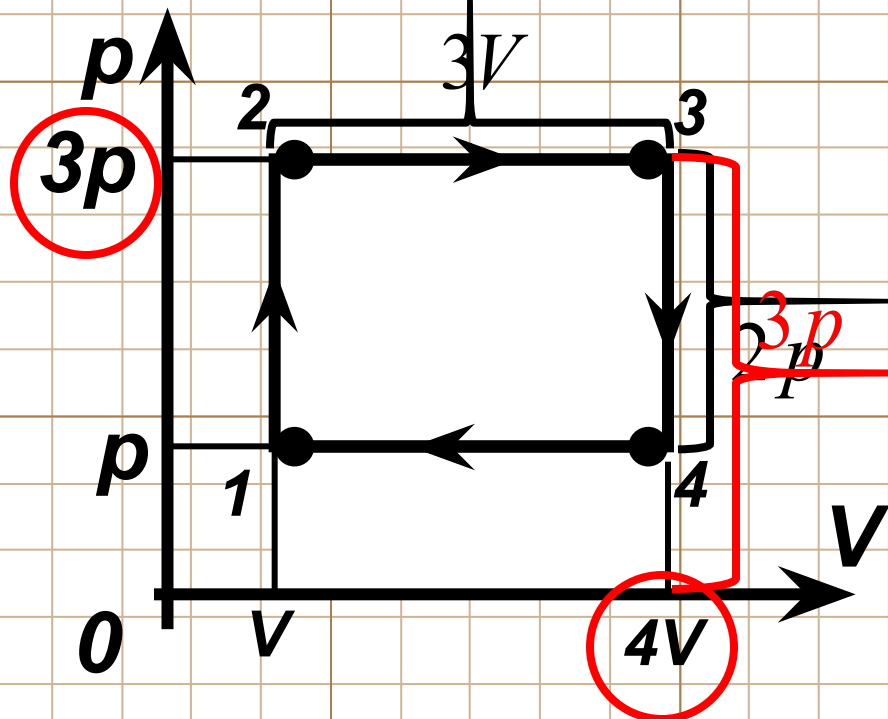
$$A_{2 \rightarrow 3} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^5 = 1800 \text{ Дж}$$

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

$$A_{\text{ц}} = 1800 - 600 = 1200 \text{ Дж}$$

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

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



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

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

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

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

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

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

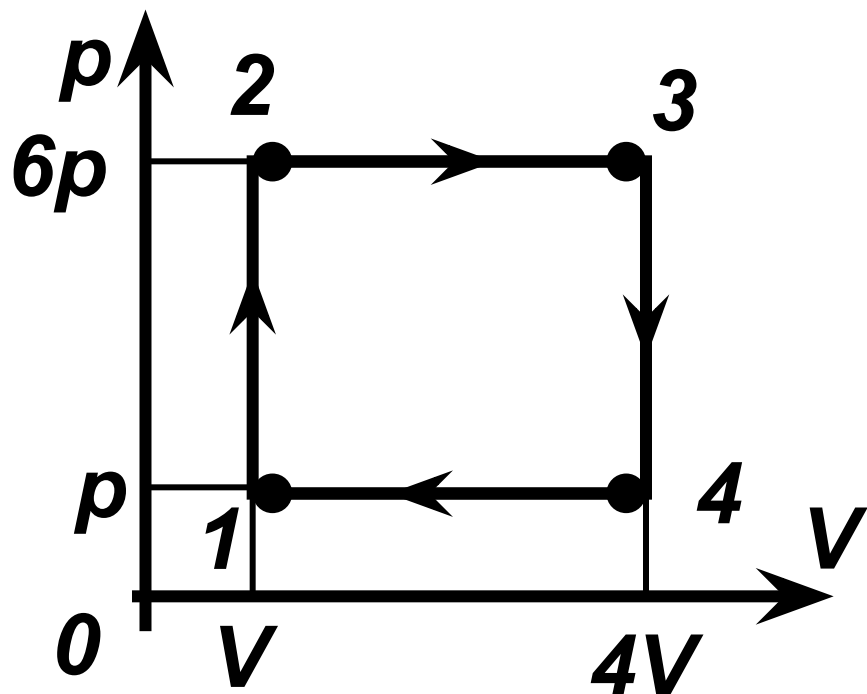
$$Q_H = A_{1 \rightarrow 3} + \Delta U_{1 \rightarrow 3}$$

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

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

Ответ:  $\eta = 23,5\%$

# Домашнее задание

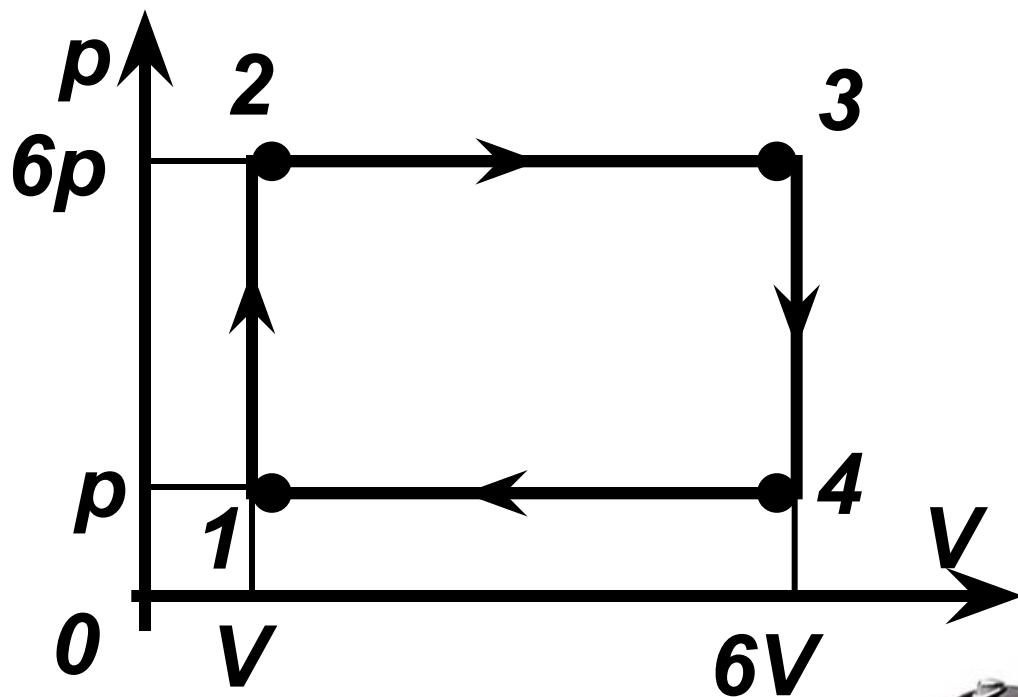


- 1) Найти к.п.д.
- 2) Перестроить график в координаты  $p(T)$ ,  $V(T)$



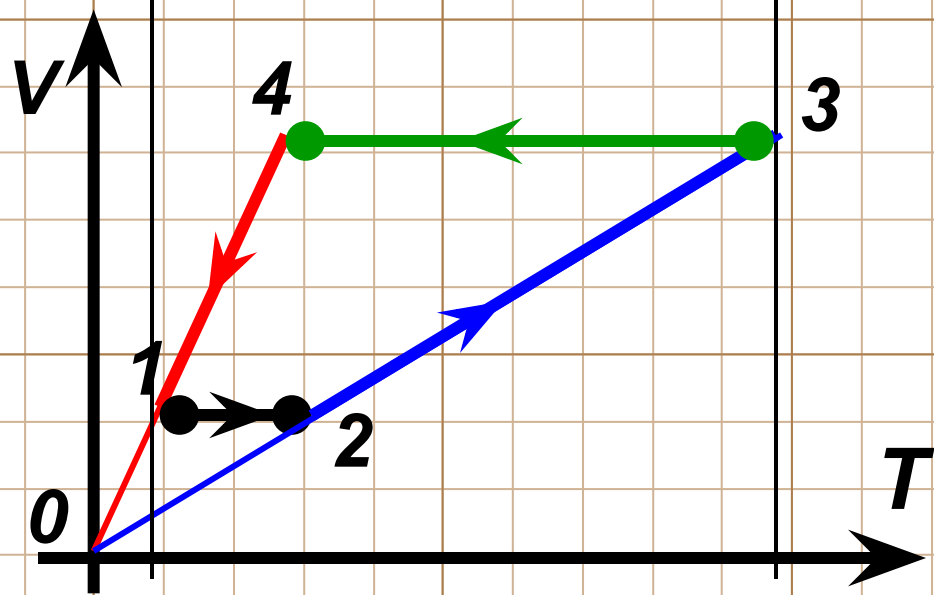
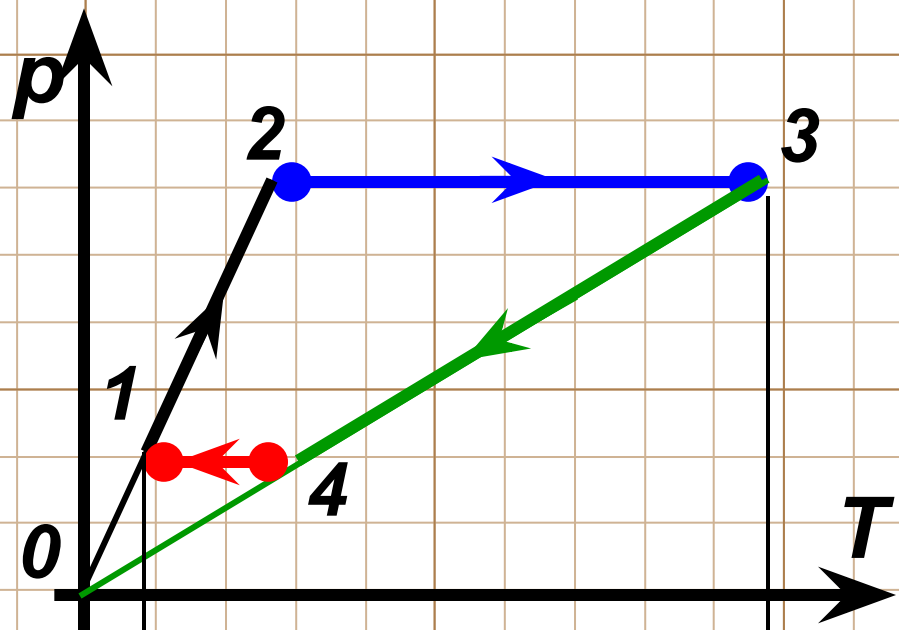
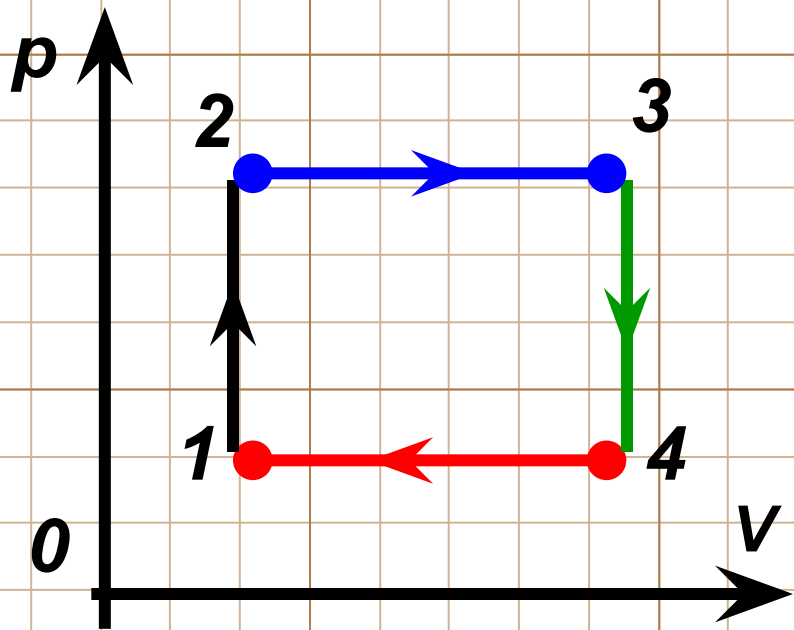


# Домашнее задание



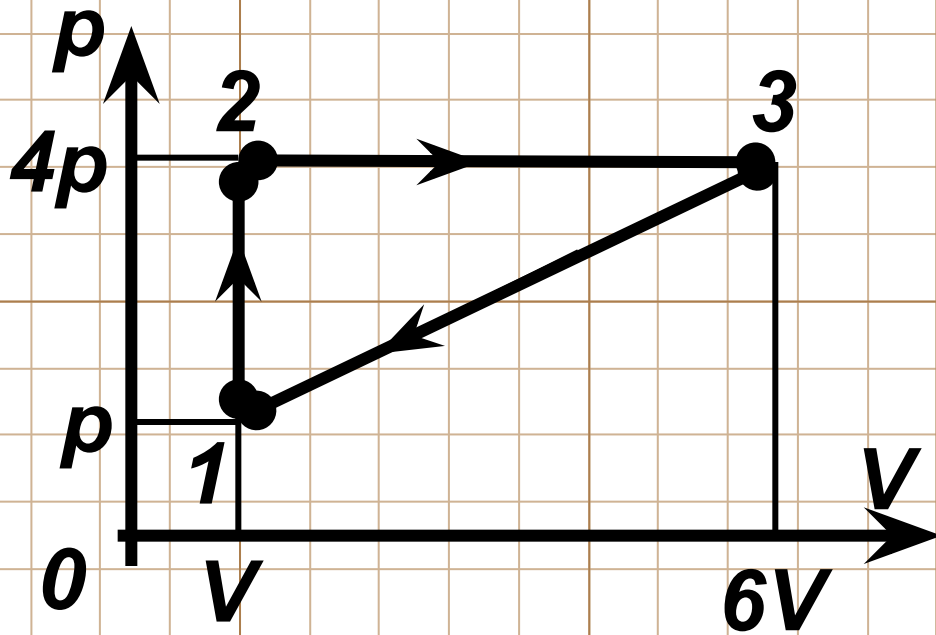
- 1) Найти к.п.д.
- 2) Перестроить график в координаты  $p(T)$ ,  $V(T)$

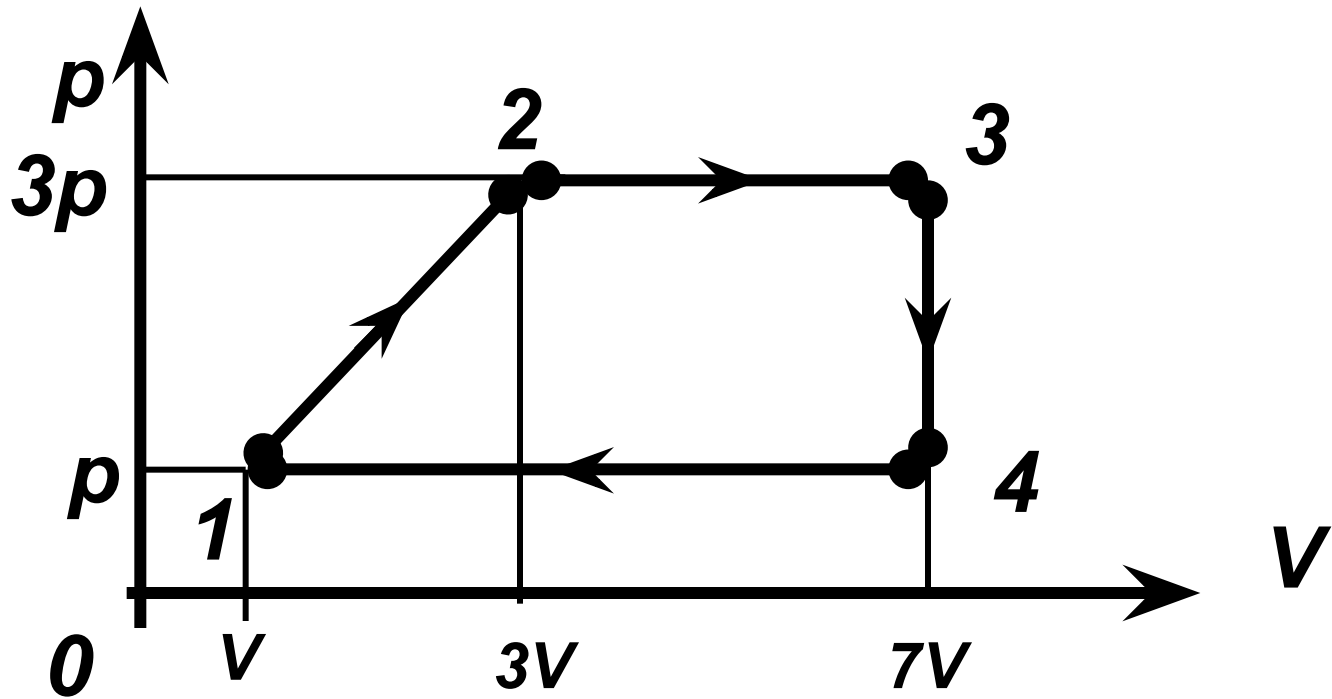




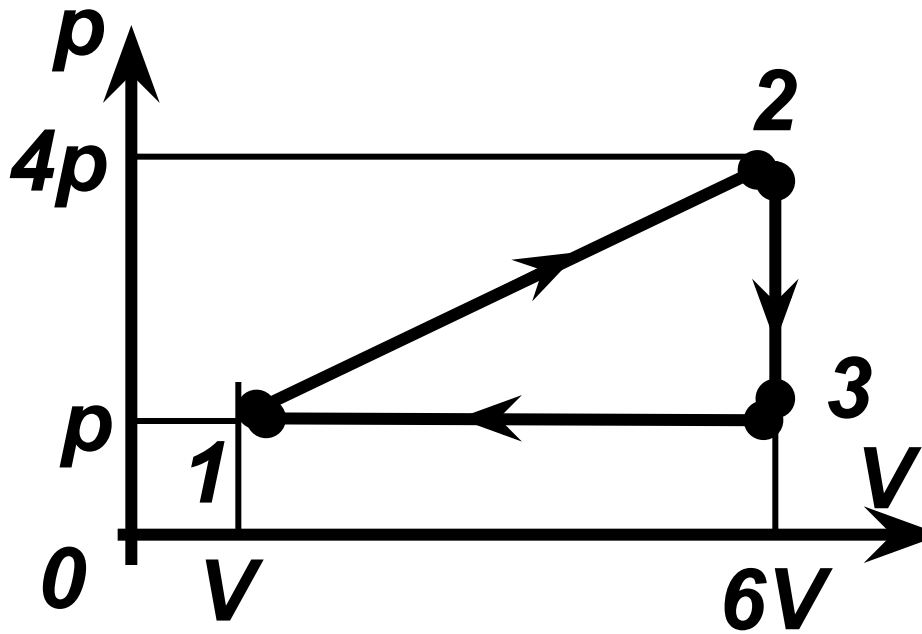


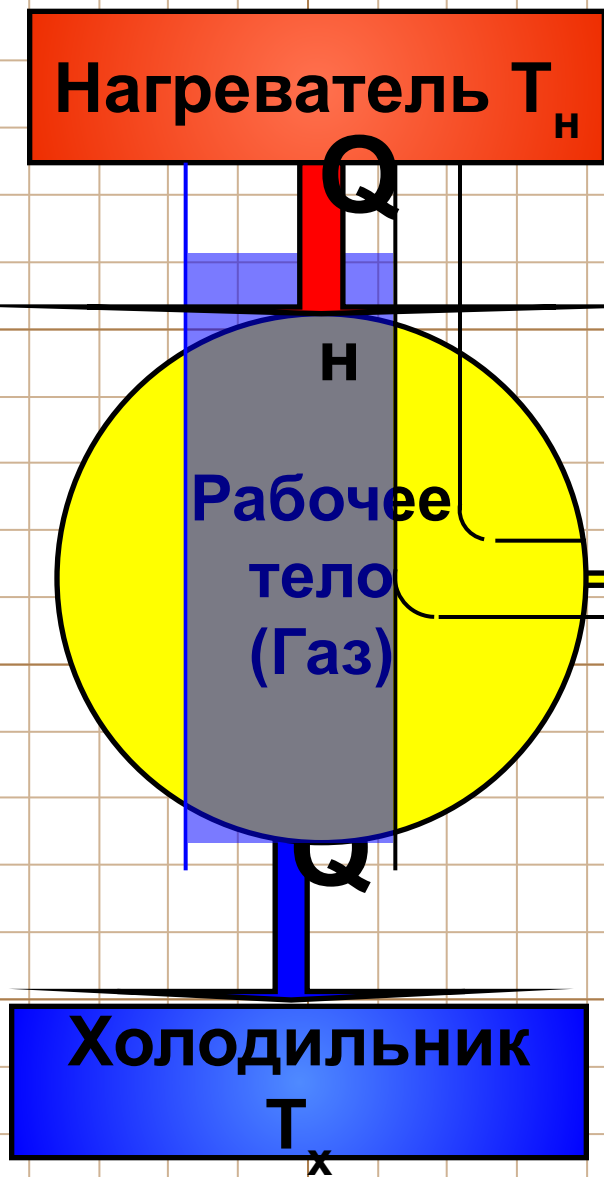
# Домашнее задание





# Домашнее задание

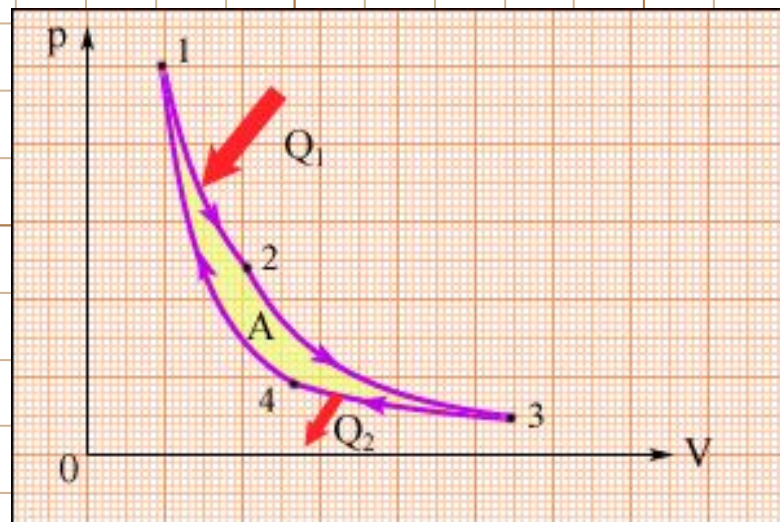




$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H}$$

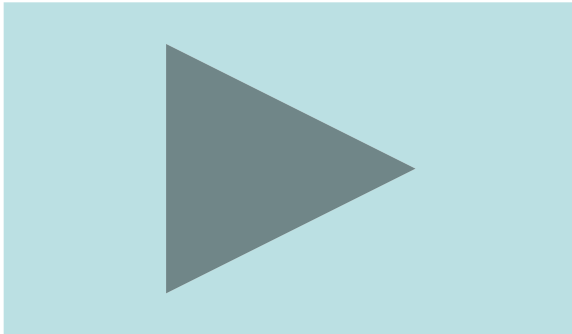
Для ИТМ

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







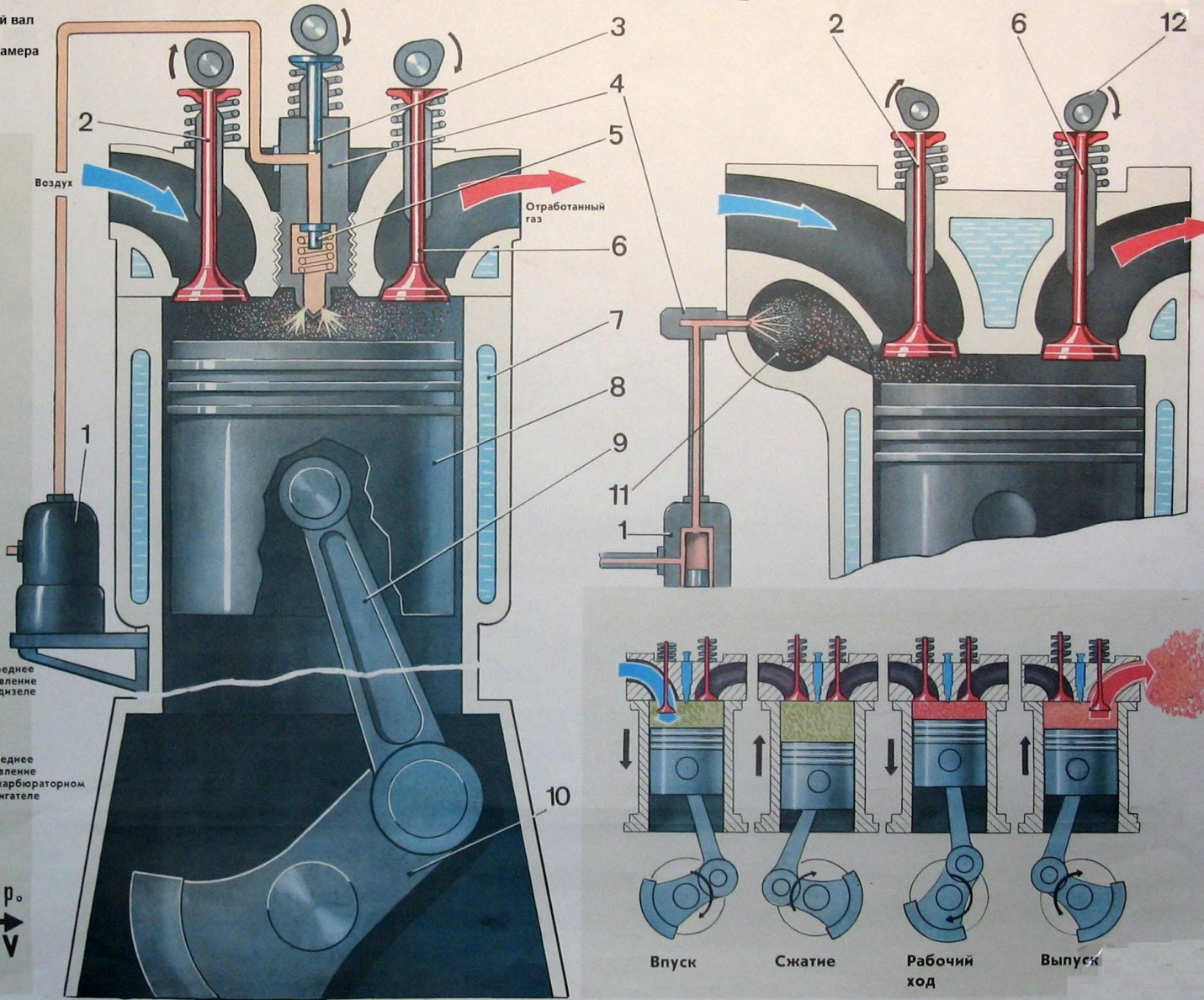






- 1. Насос предварительной подкачки
- 2. Впускной клапан
- 3. Плунжер
- 4. Форсунка
- 5. Нагнетательный клапан
- 6. Выпускной клапан
- 7. Вода
- 8. Поршень
- 9. Шатун
- 10. Коленчатый вал
- 11. Вихревая камера
- 12. Кулачок

# УСТРОЙСТВО ДИЗЕЛЯ (СХЕМА)



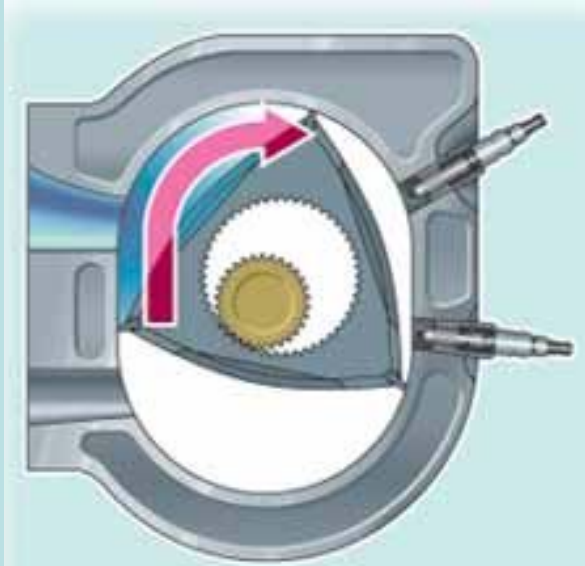
# СХЕМА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

ПАР



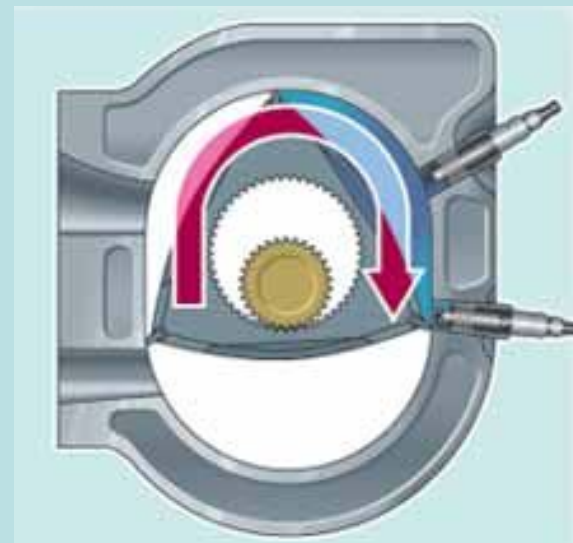
- 1. Корпус турбины
- 2. Сопловый аппарат
- 3. Лопатки диска ротора
- 4. Лопатки диска статора
- 5. Конденсатор
- 6. Генератор

## 1. Впуск.



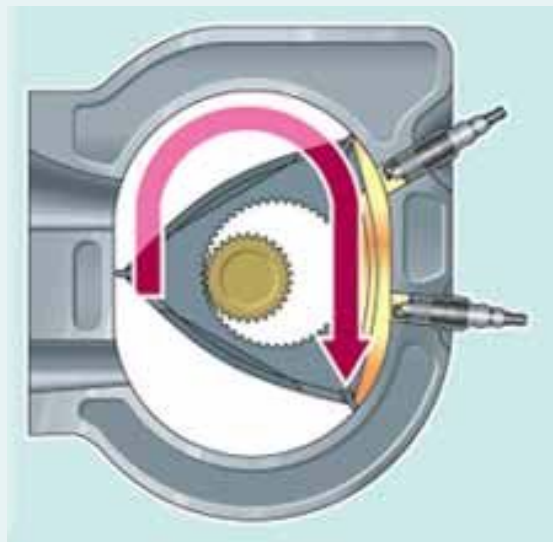
Одной из граней ротор затягивает топливно-воздушную смесь в камеру двигателя

## 2. Сжатие.



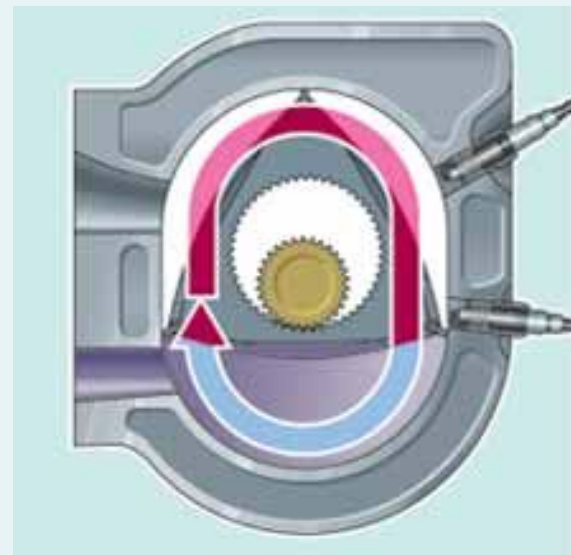
Проталкивая смесь по направлению к свечам зажигания, ротор сжимает ее

## 3. Рабочий ход.



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

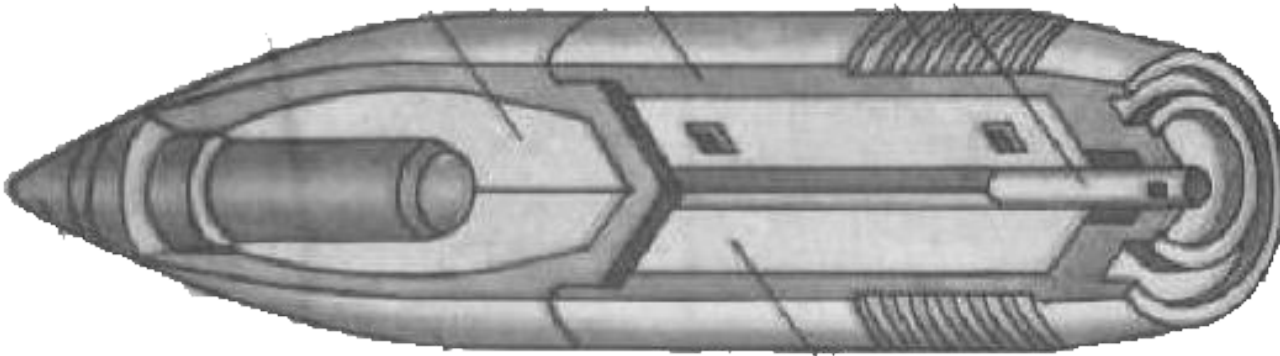
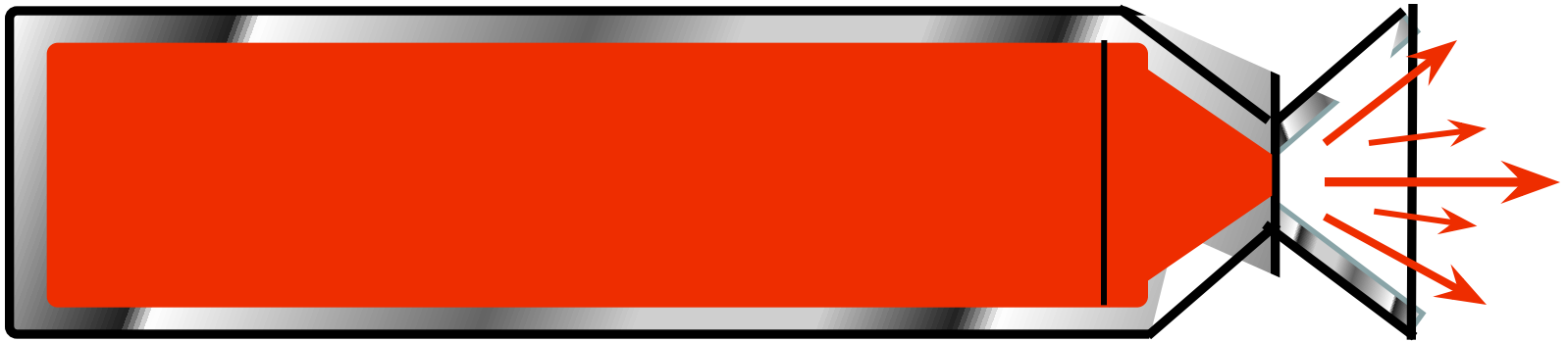
## 4. Выпуск

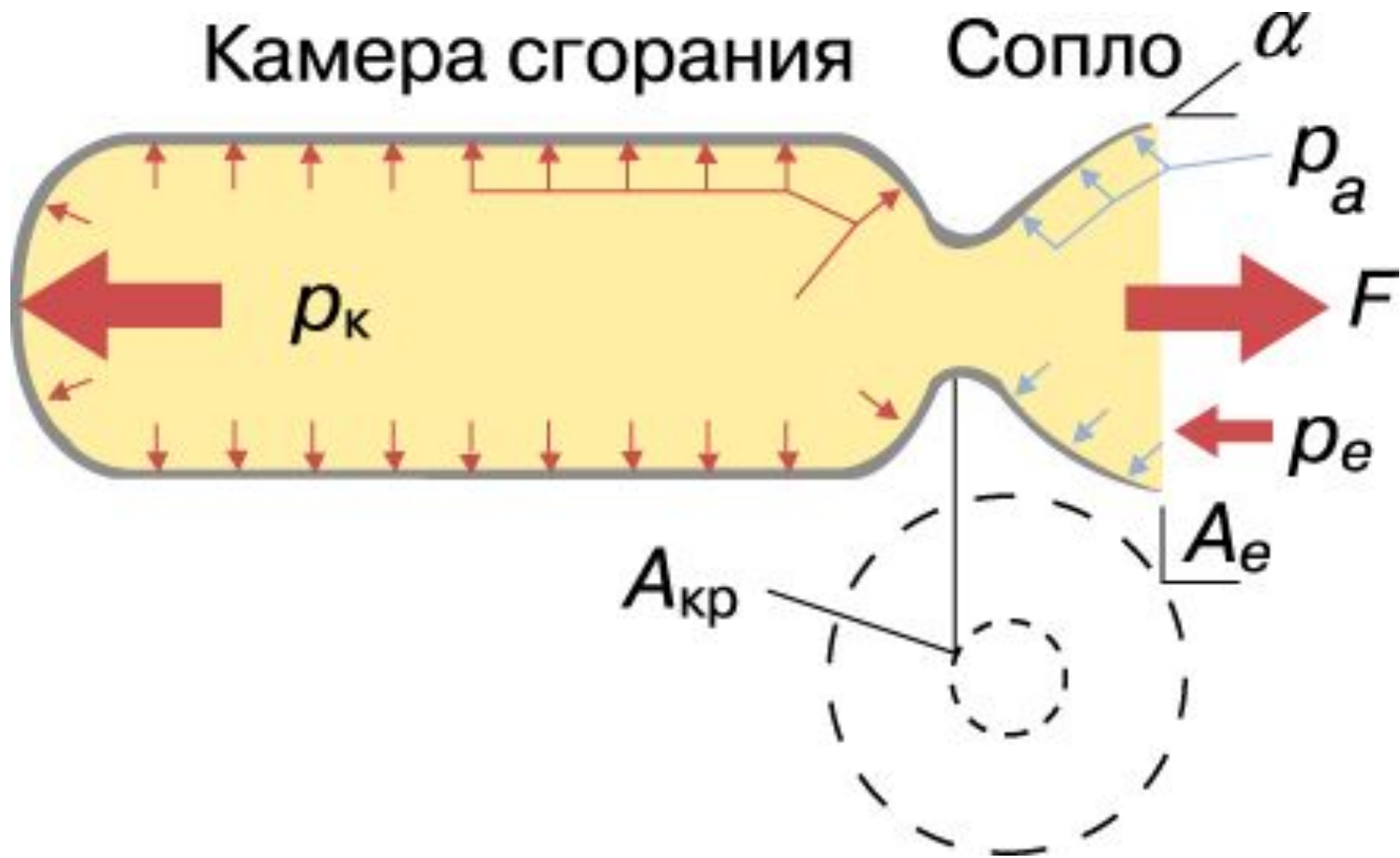


Как только одна из вершин ротора открывает выпускное окно, отработавшие газы удаляются в атмосферу

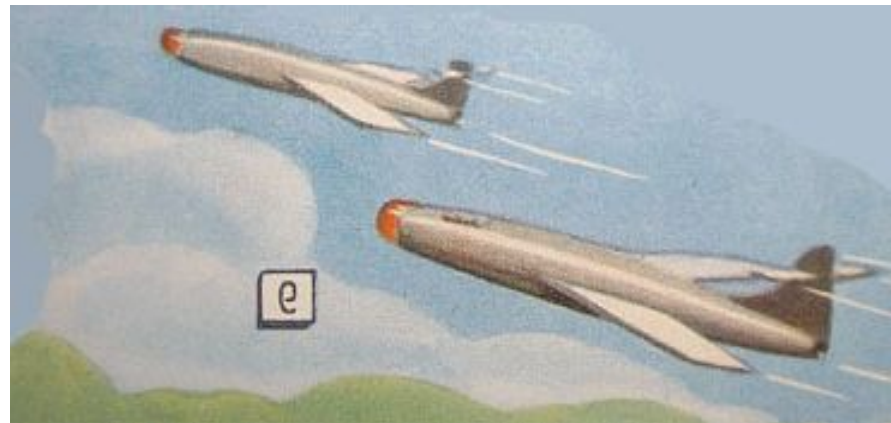
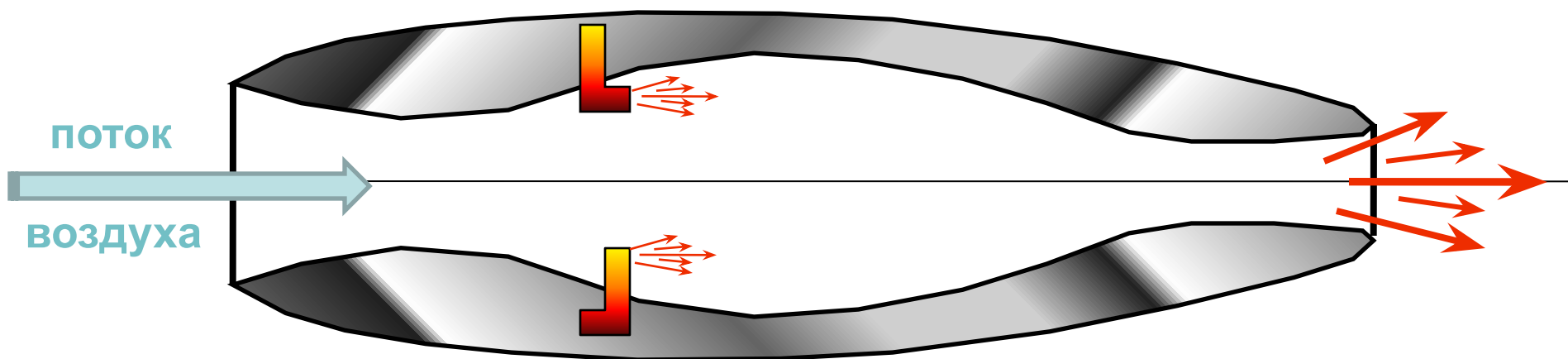


# Реактивный двигатель на твердом топливе

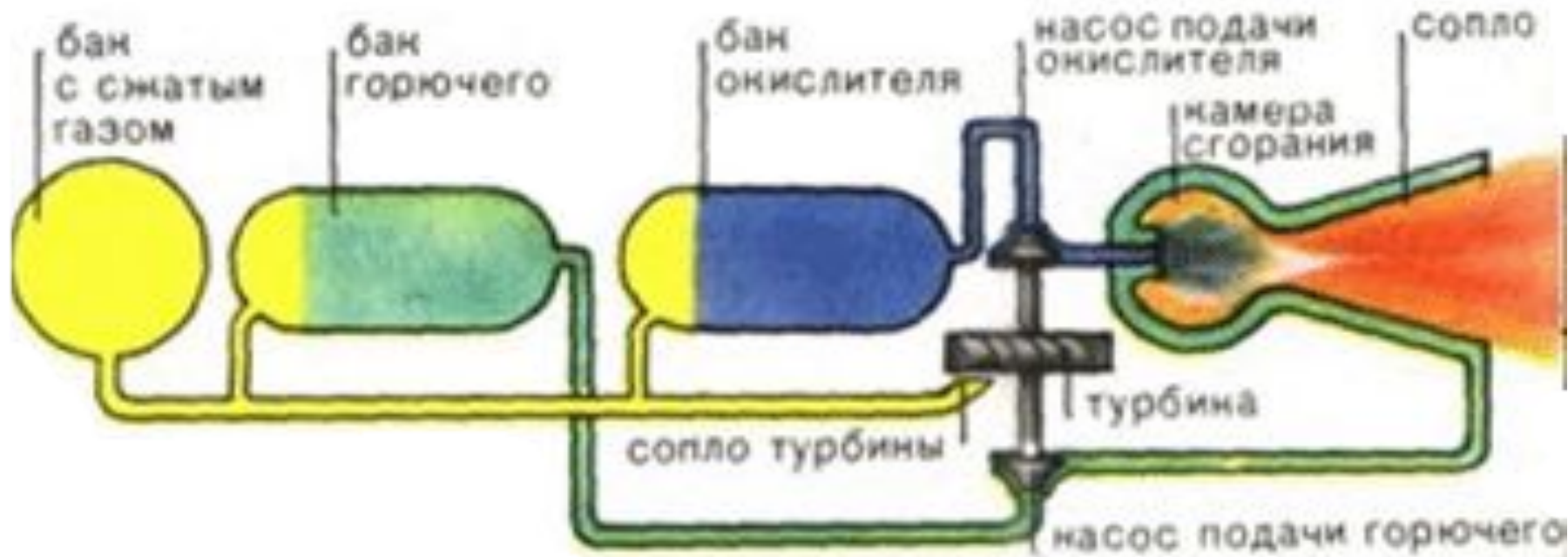
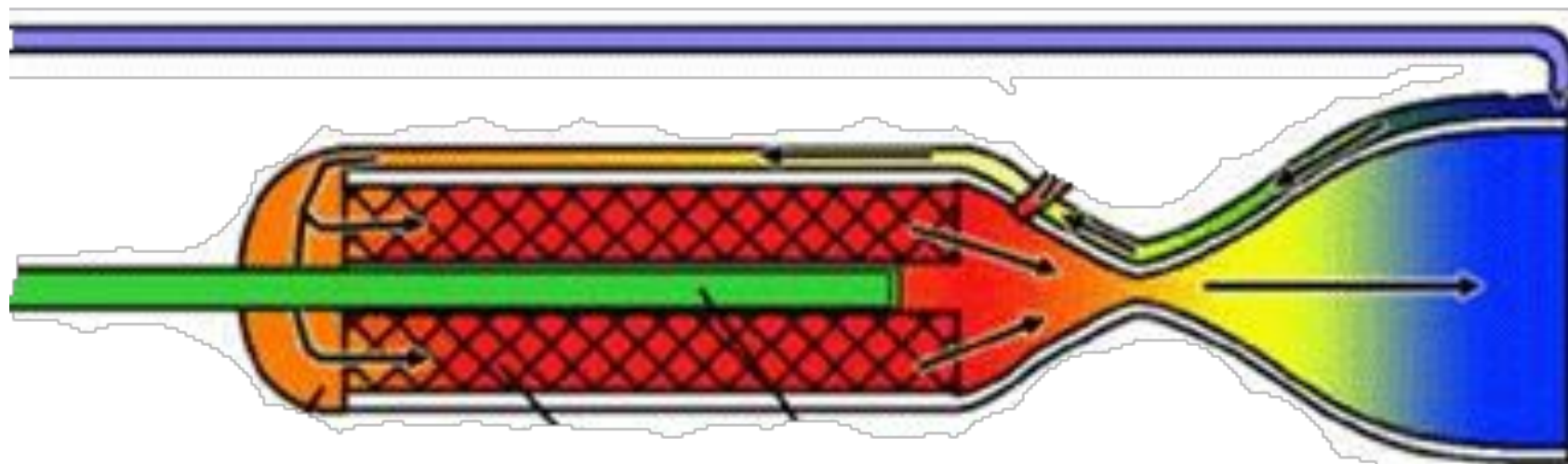




# Прямоточный реактивный двигатель



# Жидкостный реактивный двигатель

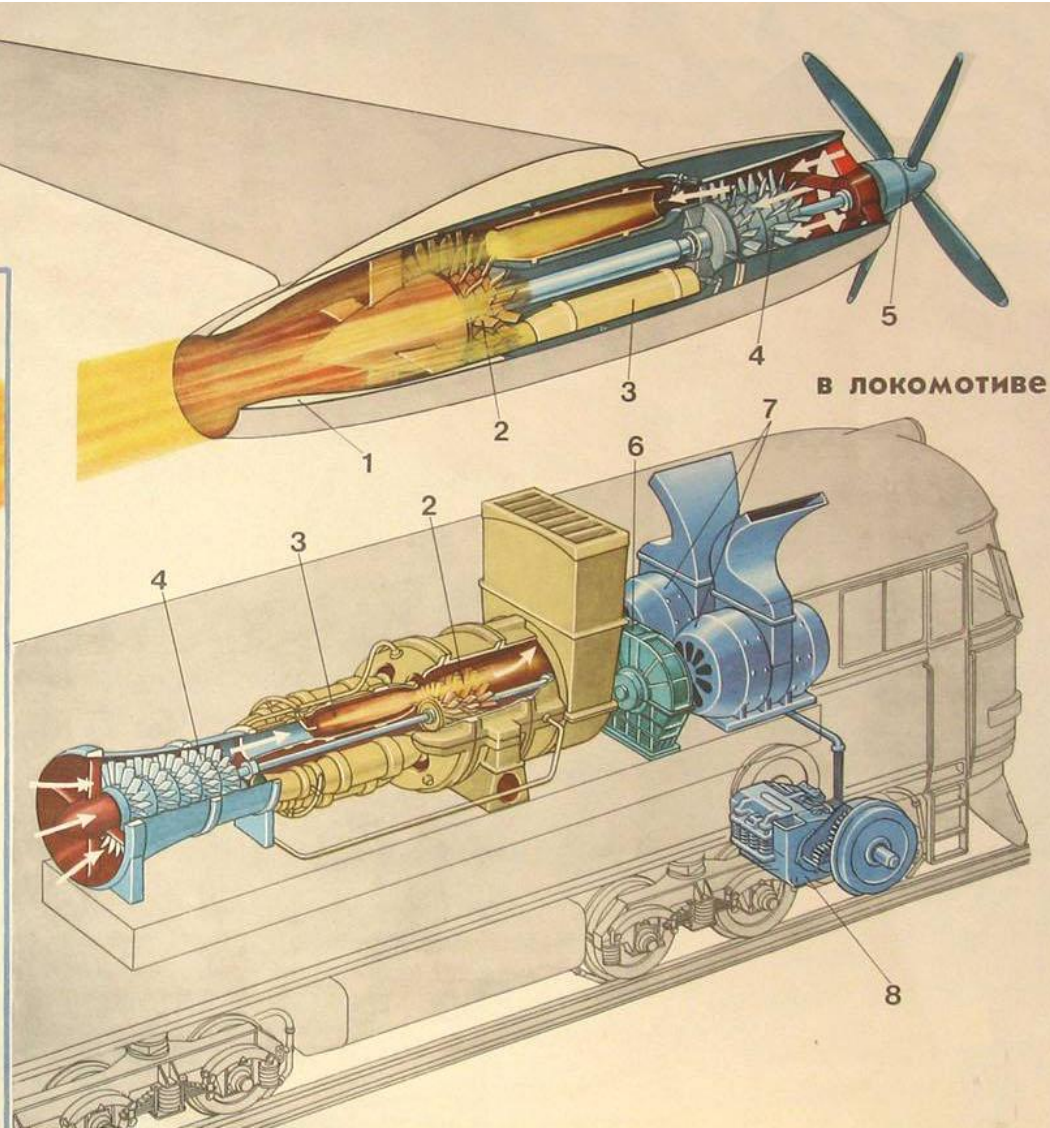
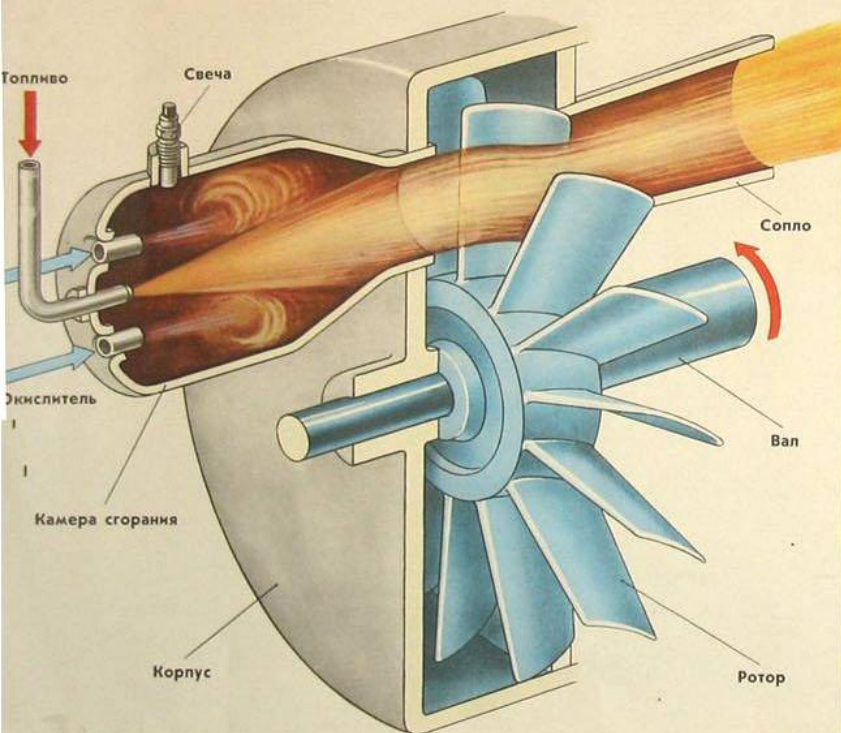




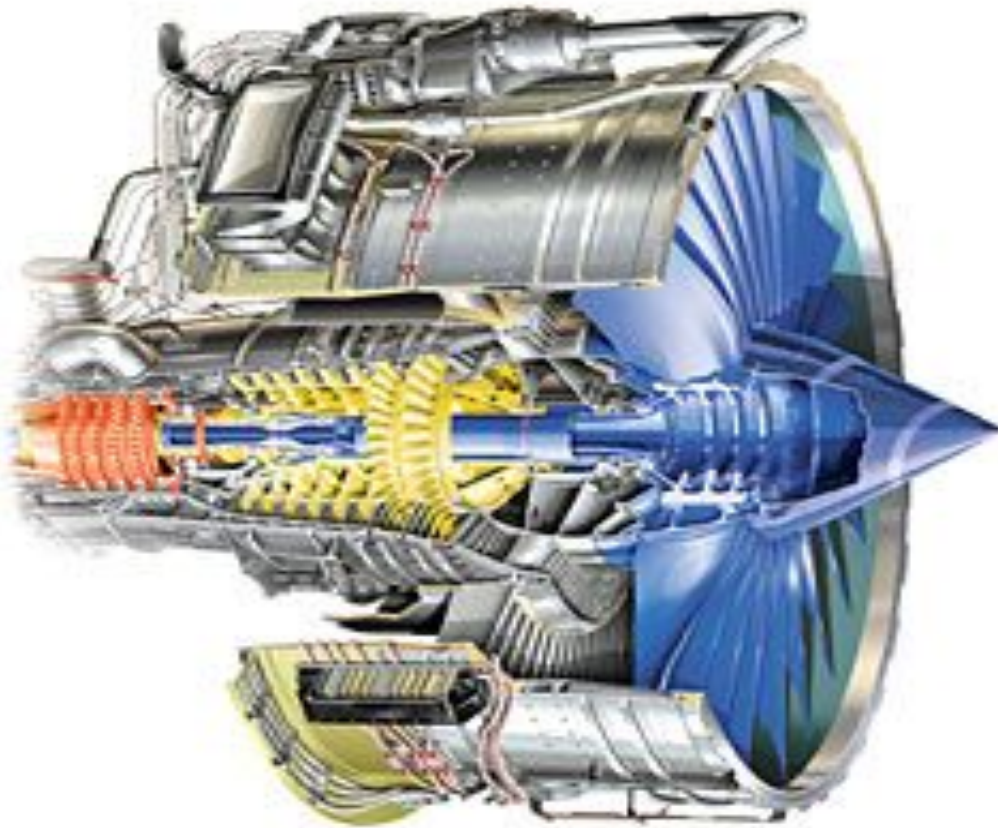
# Газотурбинный реактивный двигатель

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



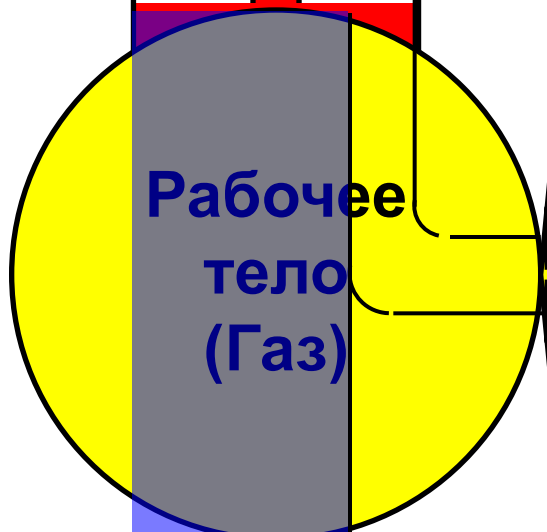
# Газотурбинный реактивный двигатель





Нагреватель  $T_H$

$Q$



$A$

$Q$

Холодильник  $T_x$



# ХОЛОДИЛЬНИК

