

Решение задач по теме «Основы термодинамики»

Цели урока:

- 1. Повторить основные формулы.*
- 2. Научиться применять полученные знания для решения задач.*
- 3. Провести анализ полученных результатов.*

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

при нагревании и
охлаждении

$$Q = cm\Delta T$$

при горении

$$Q = qm$$

при плавлении и
кристаллизации

$$Q = \lambda m$$

при
парообразовании
и конденсации

$$Q = rm$$

5. Количество теплоты

Основные формулы

$$\Delta U = A + Q$$

6. Первый закон термодинамики

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

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

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

7. КПД тепловых двигателей

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

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

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:

$$m = 0,5 \text{ кг}$$

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

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

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

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$$

ΔU - ?

“СИ”

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

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

Решение.

$$U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R T_1.$$

$$U_2 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R T_2.$$

Найдём изменение внутренней энергии:

$$T = t + 273$$

$$\Delta t = \Delta T$$

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

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

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

Ответ: $\Delta U = 31,2$ Дж.

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

Дано:	“СИ”
$\nu = 5$ моль	
$t = 10^{\circ}\text{C}$	283°K
$R = 8,31$ Дж/моль К	
$U = ?$	

Решение.

Кислород O_2 – двухатомный газ.

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

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

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

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

Ответ: $U = 1,04$ кДж

Задача 3. Какова внутренняя энергия гелия, заполняющего аэростат объёмом 40 м^3 при давлении 80 кПа ?

Дано:

Решение.

$V = 40 \text{ м}^3$

$p = 80 \text{ кПа}$

$U = ?$

“СИ”

$8 \cdot 10^4 \text{ Па}$

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

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

-уравнение
Менделеева-
Клапейрона

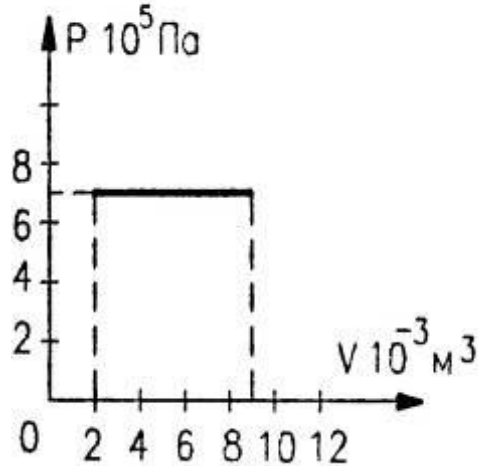
$$U = \frac{3}{2} pV.$$

$$U =$$

Ответ: $U =$

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

Дано:



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:

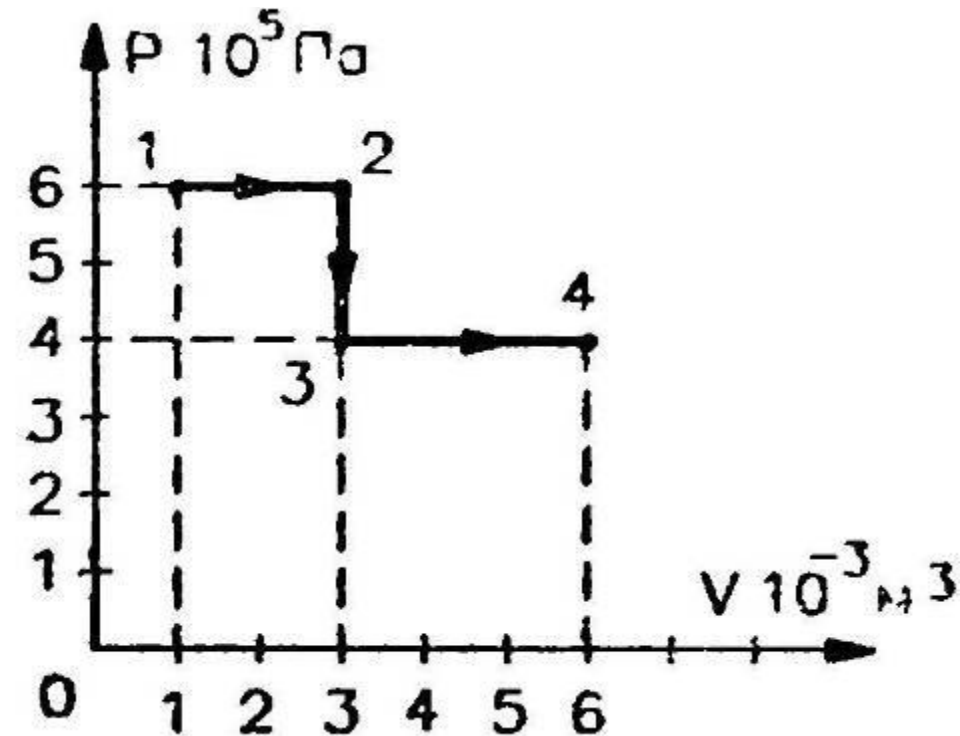
$$\begin{aligned} A' &= 7 \cdot 10^5 \text{ Па} (9 - 2) 10^{-3} \text{ м}^3 = \\ &= 49 \cdot 10^2 \text{ Дж} = 4,9 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

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:

Решение.



Найти: A' - ?

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

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

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

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

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

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

Ответ: $A' = 2,4 \text{ кДж.}$

Задача Какую работу совершает идеальный газ в количестве 2 моль при его изобарном нагревании на 4 °С?

Дано:
 $\nu = 2$ моль
 $p = \text{const}$
 $\Delta t = 4^\circ\text{C}$
 $R = 8,31$ Дж/мольК

$A' = ?$

“СИ”

$$\Delta T = 5^\circ\text{K}$$

Решение.

$$A' = p\Delta V$$

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

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

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

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

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

$$A' =$$

Ответ: A'

Задача 7. Для приготовления ванны вместимостью 200 л смешали холодную воду при температуре 10°C с горячей водой при температуре 60°C . Какие объёмы той и другой воды надо взять, чтобы температура установилась 40°C ?

Дано:

$$V = 200 \text{ л}$$

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

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

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

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

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

$$V_1 - ?$$

$$V_2 - ?$$

“СИ”

$$0,2 \text{ м}^3$$

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

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

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

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

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:

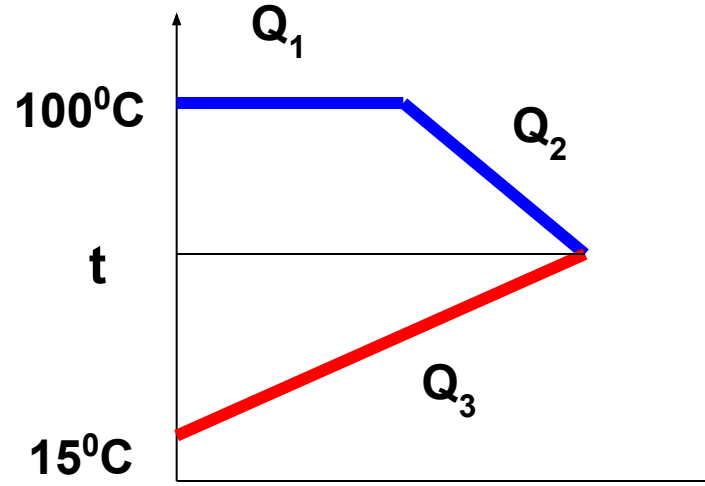
$m_1 = 1,5 \text{ кг}$
 $m_2 = 200 \text{ г}$
 $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{С}$
 $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{С}$
 $c = 4200 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{К}$
 $r = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$

$t - ?$

“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”

$A' = 15 \text{ кДж}$
 $T = \text{const}$

$1,5 \cdot 10^4 \text{ Дж}$

$Q - ?$

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: $Q = 15 \text{ кДж}$.

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:

Решение.

$$\Delta U = -500 \text{ Дж}$$

Q - ?

A' - ?

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: $Q = -500 \text{ Дж}$; $A' = 0$.

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:

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

$$m.k.\nu = \frac{m}{M}, m o A' = \nu R \Delta T$$

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

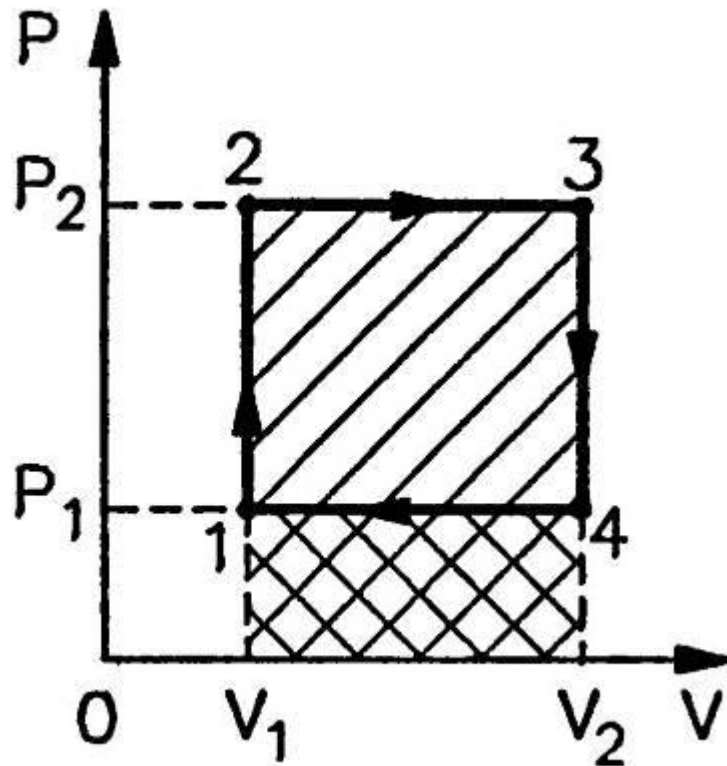
$$A' = 400 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}^\circ \text{К}} \cdot 300^\circ \text{К} = 99,72 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 0,9972 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

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

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.
 $A = p\Delta V$.

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

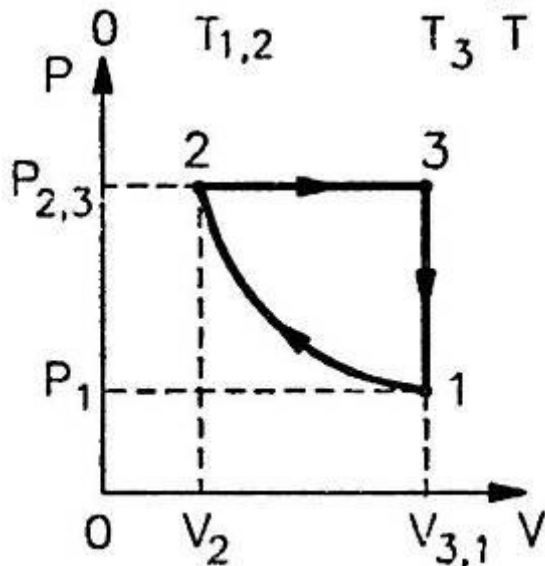
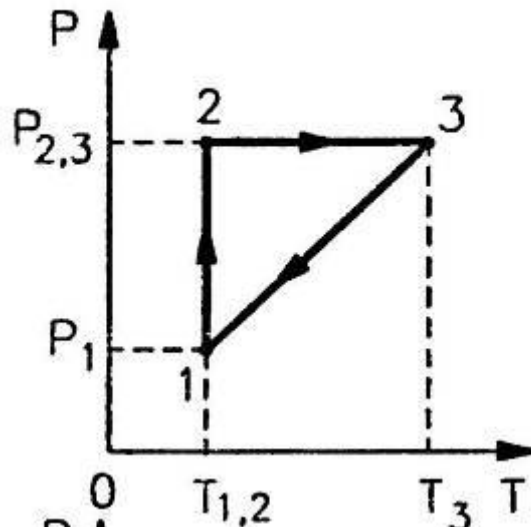
Работа равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса, осью OV и прямыми $V=V_1$ и $V=V_2$.

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

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:

“СИ”

Решение.

По определению КПД тепловой машины:

$$Q_1 = 7200 \text{ кДж}$$
$$Q_2 = 5600 \text{ кДж}$$

$$7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$
$$5,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

η - ?

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

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

Ответ: $\eta = 22\%$.

Задача 15. Идеальная тепловая машина получает от нагревателя, температура которого 500°K , за один цикл 3360 Дж теплоты. Найти количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику, температура которого 400°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°C , а отвод тепла осуществляется с помощью речной воды, обеспечивающей холодильнику температуру 27°C ? Каковы основные пути повышения КПД тепловых машин?

Дано:	“СИ”
$t_1 = 600^{\circ}\text{C}$ $t_2 = 27^{\circ}\text{C}$	873°K 300°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. В паровой турбине расходуется дизельное топливо массой 0,35 кг на 1 кВт·ч мощности. Температура поступающего в турбину пара 250⁰С, температура холодильника 30⁰С. Вычислите фактический КПД турбины и сравните его с КПД идеальной тепловой машины, работающей при тех же температурных условиях.

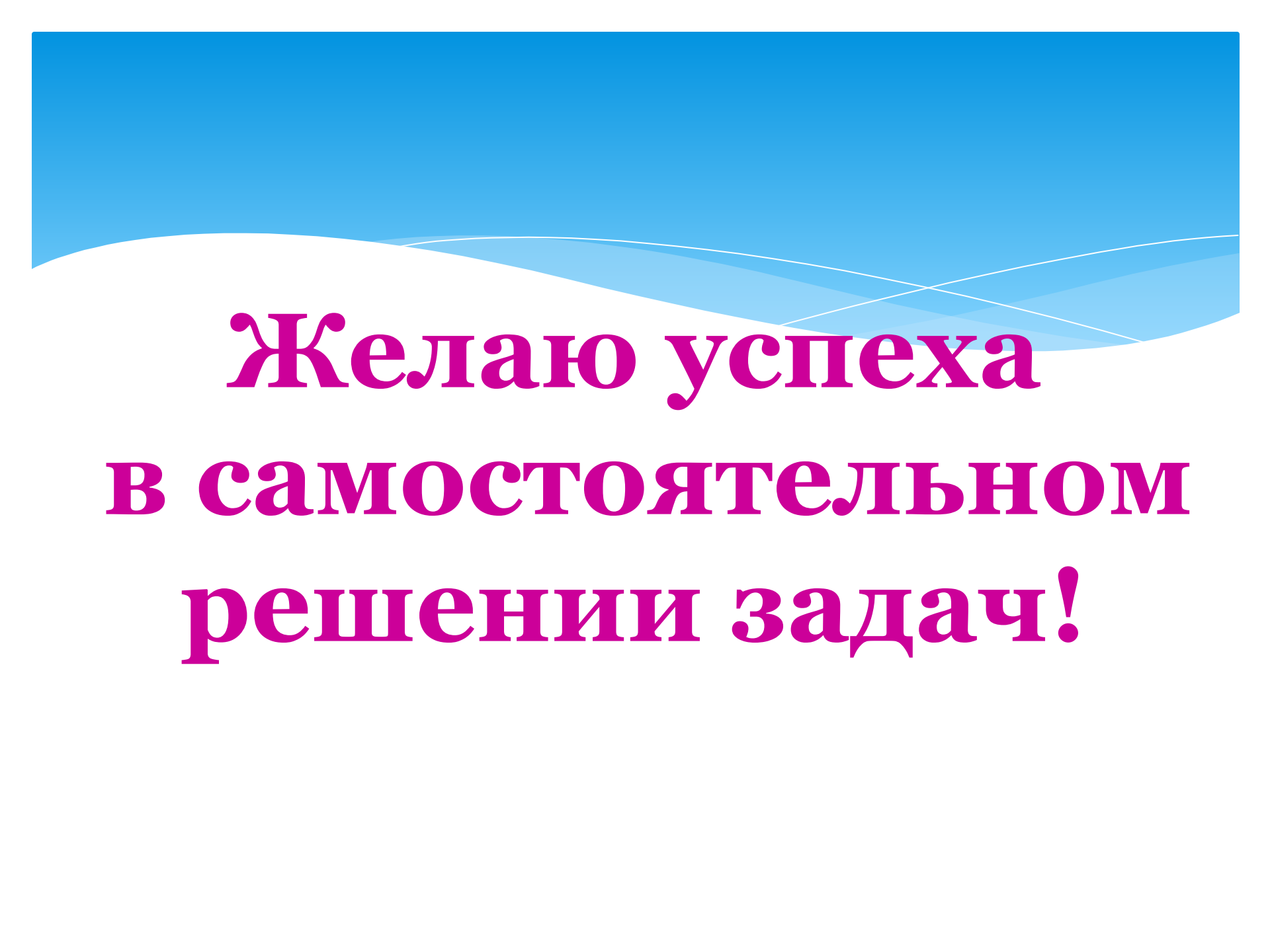
Дано: $A' = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ $m = 0,35 \text{ кг}$ $q = 42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ $t_1 = 250^\circ\text{C}$ $t_2 = 30^\circ\text{C}$	“СИ” $1 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$	Решение.
		Для реальной тепловой машины:
	$T_1 = 523^\circ\text{K}$ $T_2 = 303^\circ\text{K}$	$\eta = \frac{A'}{Q} \cdot 100\%$
$\eta - ?$ $\eta_{\max} - ?$		$Q = qm$, 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:

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

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



**Желаю успеха
в самостоятельном
решении задач!**

Литература

1. **Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н. Физика 10 класс. – М.: Просвещение, 2007. – 365 с.**
2. **Касьянов В.А. Физика 10 класс. – М.: Дрофа, 2006. – 410 с.**
3. **Волков В.А. Поурочные разработки по физике. 10 класс. – М: Вако, 2006. – 400 с.**
4. **Рымкевич А.П. Задачник 10 – 11 классы. – М.: Дрофа, 2004. – 188 с.**
5. **Степанова Г.Н. Сборник задач по физике 10 – 11 классы. – М: Просвещение, 2003. – 287 с.**
6. **Власова И.Г. Решение задач по физике. Справочник школьника. – М.: «Слово», 1997. – 640 с.**