

Раздел 07

«Термодинамика»

Часть 2

Содержание

7.06. Работа идеального газа

7.07. Внутренняя энергия

7.08. Первый закон термодинамики

7.09. Второе начало термодинамики. Тепловые машины

www.repet.by

7.06. Работа идеального газа

Пусть газ находится в сосуде, закрытом подвижным поршнем. Давление газа будет равно внешнему давлению p , так как поршень подвижен. Это давление будет постоянно. Пусть газ расширяется. Например, его нагрели. По определению (вспоминаем параграф 4.01), работа силы равна

$$A = F \cdot \Delta l,$$

где $F = pS$ – сила давления газа на поршень, Δl – расстояние, пройденное поршнем при расширении. Получаем

$$A = F \cdot \Delta l = pS \cdot \Delta l = p\Delta V \text{ или } A = p\Delta V.$$

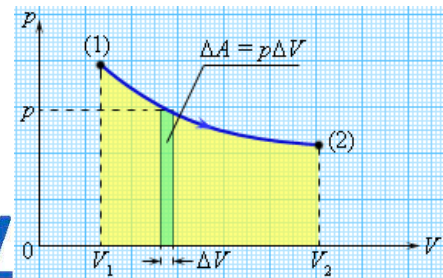
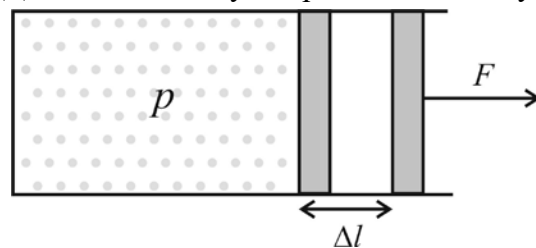
По этой формуле можно считать работу газа, если давление **постоянно**. Любой газ совершает работу только при **изменении объема**. При этом важно понимать, что при расширении газ будет совершать положительную работу, а при сжатии – отрицательную. Очевидно, что **при изохорном процессе работа газа будет равна нулю (объем газа остается постоянным)**.

Используя уравнение Менделеева – Клайперона $pV = \frac{m}{M}RT$ можно получить еще одну формулу для работы газа

$$A = p\Delta V = \frac{m}{M}R\Delta T \text{ или } A = \nu R\Delta T.$$

Хотя в последней формуле нет давления, но она также справедлива только в случае, если давление газа постоянно.

Если же давление газа меняется, то работу газа находят как **площадь фигуры под графиком p - V** (см. рисунок справа). В некоторых задачах вам придется нарисовать график и найти работу газа через площадь.



<p>Величина работы зависит от того, каким путем совершался переход из начального состояния в конечное. На следующем рисунке изображены три различных процесса, переводящих газ из состояния (1) в состояние (2). Во всех трех случаях газ совершает различную работу.</p>			
		Работа максимальна	

Процессы, изображенные на рисунке, можно провести и в обратном направлении. Тогда работа A просто изменит знак на противоположный. Процессы такого рода, которые можно проводить в обоих направлениях, называются **обратимыми**.

ПРИМЕР. В цилиндре с площадью основания 100 см^2 находится газ при температуре 300 К . На высоте 30 см от основания цилиндра расположен поршень массой 60 кг . Какую работу совершит газ при расширении, если его температура медленно повысится на 50°C ? Атмосферное давление 100 кПа .

На первый взгляд может показаться, что задача может быть решена в одно действие, так как мы знаем, что температуру газа повысили на 50°C . Просто выберем формулу для работы газа через изменение температуры $A = \nu R \Delta T$ и все. Однако это не так, так как мы не знаем количество газа ν . Поэтому запишем уравнение состояния идеального газа для его начального состояния (при температуре 300 Кельвинов), из которого выразим количество вещества

$$pV_1 = \nu RT_1 \Rightarrow \nu = \frac{pV_1}{RT_1}$$

Давление, под которым находится газ, будет состоять из двух давлений – атмосферного и давления, оказываемого поршнем: $p = p_A + \frac{mg}{S}$. Начальный объем газа будет равен произведению площади поршня и высоты, на которой находился поршень. Количество вещества будет равно

$$\nu = \frac{pV_1}{RT_1} = \frac{\left(p_A + \frac{mg}{S}\right)h_1S}{RT_1}$$

А вот теперь найдем работу газа

$$A = \nu R \Delta T = \frac{\left(p_A + \frac{mg}{S}\right)h_1S}{RT_1} R \Delta T = \frac{\left(p_A + \frac{mg}{S}\right)h_1S}{T_1} \Delta T$$

И не забывайте перевести все единицы измерения в СИ. **Только не переводите ИЗМЕНЕНИЕ температуры из градусов Цельсия в Кельвины!**

Эту задачу можно решить другим способом. Работа газа при изобарном процессе равна $A = p(V_2 - V_1)$. Конечный объем газа найдем из уравнения изобарного процесса (не стесняемся использовать ранее полученные знания)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = V_1 \left(\frac{T_1 + \Delta T}{T_1} \right) = V_1 \left(\frac{T_1}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_1} \right) = V_1 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1} \right)$$

Сейчас можем найти изменение объема газа

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_1 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1} \right) - V_1 = V_1 + V_1 \frac{\Delta T}{T_1} - V_1 = V_1 \frac{\Delta T}{T_1}$$

Окончательно получаем

$$A = p \Delta V = \left(p_{\text{атм}} + \frac{mg}{S} \right) Sh_1 \frac{\Delta T}{T_1}$$

Мы получили точно такой же ответ. **Ответ:** 80 Дж .

Если в задаче сказано о том, что с газом происходил какой-то изопроцесс, то для нахождения начальных и конечных параметров газа (давления, объема и температуры) не стесняйтесь использовать законы, описывающие изопроцессы.

Тест 7.06.02.

1. В вертикально расположенном цилиндре с площадью основания 1 дм^2 под поршнем массой 10 кг , скользящим без трения, находится воздух. При изобарном нагревании воздуха поршень поднялся на 20 см . Какую работу (в Дж) совершил воздух, если наружное давление равно 100 кПа ?

2. Некоторый газ расширяется от объема 1 л до объема 11 л . Давление при этом меняется по закону $p = aV^2$, где $a = 4 \cdot 10^3 \text{ Па/м}^3$. Найти графически работу, совершенную газом (в Дж).

3. Определить работу, совершаемую 1 моль идеального газа при изохорическом нагревании от

9. При изобарическом нагревании газа от 20 до 50°C газ совершает работу $2,5 \text{ кДж}$. Определить число молекул газа, участвующих в этом процессе.

10. Найти работу изобарического расширения 2 молей идеального газа, если известно, что концентрация молекул в конечном состоянии в 2 раза меньше чем в начальном при температуре 300 К .

11. График процесса, происходящего с идеальным газом, представляет собой отрезок, соединяющий точки с координатами $(4 \text{ м}^3; 7 \text{ Па})$, $(10 \text{ м}^3; 3 \text{ Па})$. Определить работу, совершенную газом.

12. На диаграмме T (температура), V (объем) график процесса представляет собой прямую, соеди-

температуры 300 К до температуры 400 К. Газ одноатомный.

4. В двух цилиндрах под подвижным поршнем находятся водород и кислород. Найти отношение работ, которые совершают эти газы при изобарном нагревании, если их начальные и конечные температуры равны, а масса кислорода в 4 раза больше массы водорода. Молярная масса водорода 2 г/моль, кислорода 32 г/моль.

5. Какую работу (в кДж) совершил воздух массой 200 г при его изобарном нагревании на 20 К? $M_{\text{воздуха}} = 29 \text{ кг/кмоль}$.

6. Какая масса водорода (в г) находится под поршнем в цилиндрическом сосуде, если при нагревании его от 250 до 680 К при постоянном давлении газ произвел работу 400 Дж?

7. Идеальный газ нагрели на 20 К при постоянном давлении и газ совершил работу 249 Дж. Сколько молей газа нагревали?

8. На сколько Кельвинов следует нагреть 6 моль идеального газа, чтобы он совершил работу, равную 124,5 Дж? Давление газа постоянное.

няющую точки (300 К; 0,1 л), (600 К; 0,2 л). Определить работу 1 моль идеального газа при расширении объема от 0,1 л до 0,2 л.

13. В цилиндре с площадью основания 100 см² находится газ при температуре 300 К. На высоте 30 см от основания цилиндра расположен поршень массой 60 кг. Какую работу совершит газ при расширении, если его температуру медленно повысить на 100 °С? Атмосферное давление 100 кПа.

14. Давление газа под поршнем цилиндра $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а температура 150 °С. Какую работу (в МДж) совершает 1 кмоль газа, если газ, нагреваясь изобарно, расширился до объема, вдвое большего начального?

15. При изобарическом нагревании от 300 К до 350 К газ совершил работу 100 Дж. Какую работу совершил газ при дальнейшем изобарическом нагревании на 25 К? Давление и масса газа постоянны.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
220	0,24	0	0,25	1,2	0,2	1,5	2,5
9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	
$6 \cdot 10^{24}$	5000	30	2490	160	3,5	50	

www.repet.by

7.07. Внутренняя энергия

Одним из важнейших понятий термодинамики является внутренняя энергия тела. Все тела обладают энергией, заключенной внутри самих тел. С точки зрения молекулярно-кинетической теории, **внутренняя энергия** вещества складывается из кинетической энергии (энергии движения) всех атомов и молекул тела и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом. Внутренняя энергия **идеального газа** равна сумме только кинетических энергий всех частиц газа, находящихся в непрерывном и беспорядочном тепловом движении (по определению идеального газа, частицы идеального газа не взаимодействуют друг с другом). Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры

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

Эту формулу мы получили еще в параграфе 6.02. Используя уравнение Менделеева–Клайперона $pV = \nu RT$ получим еще одну формулу

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

Внутренняя энергия газа будет меняться только в случае изменения температуры газа

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

Если температура газа постоянна (изотермический процесс), то и его внутренняя энергия меняться не будет. Если процесс **изобарный**, то изменение внутренней энергии мы можем найти используя уравнение Менделеева-Клайперона

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3}{2} p \Delta V.$$

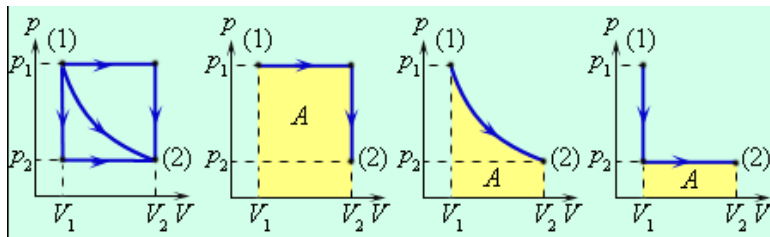
Если процесс **изохорный**, то

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3}{2} \Delta p V.$$

Таким образом, внутренняя энергия U тела однозначно определяется макроскопическими параметрами, характеризующими состояние тела. Она не зависит от того, каким путем было реализовано данное состояние. Принято говорить, что внутренняя энергия является функцией состояния. Это значит, что изменение внутренней энергии не зависит от того как система была переведена из одного состояния в

другое, а зависит лишь от характеристик первоначального и конечного состояний. В любых процессах для одноатомного идеального газа внутренняя энергия определяется выражением $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$.

На графиках идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 2. При этом совершается различная работа (это мы выяснили в предыдущем параграфе), но изменения внутренней энергии равны, так как во всех переходах совпадает начальная и конечная температура газа, то есть для всех переходов изменение температуры ΔT одинаково.



www.repet.by

ПРИМЕР. При увеличении объема одноатомного газа в 3,6 раза его давление уменьшилось на 30%. Как изменилась внутренняя энергия газа?

Нам надо связать между собой начальные и конечные объем и давление газа. С объемом все понятно. А вот с давлением очень важно не облажаться. Фраза «давление уменьшилось на 30%» означает, что

$$p_2 = p_1 - \frac{30\%}{100\%} p_1 = p_1 - 0,3 p_1 = 0,7 p_1$$

Или другими словами, у нас осталось всего 70% от первоначального давления. Так как в задаче речь идет об изменении объема и давления, то выбираем соответствующую формулу. И помним, что если нас просят найти изменение физической величины, то мы ищем отношение конечного значения этой величины к ее начальному значению, а не наоборот

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{3}{2} p_2 V_2}{\frac{3}{2} p_1 V_1} = \frac{0,7 p_1 \cdot 3,6 V_1}{p_1 V_1} = 2,52 \Rightarrow U_2 = 2,52 U_1$$

То есть внутренняя энергия увеличилась в 2,52 раза или выросла на 152 %.

www.repet.by

Тест 7.07.02.

- Какова внутренняя энергия 10 моль одноатомного газа при температуре 27 °С (в кДж)?
- На сколько изменяется внутренняя энергия гелия массой 200 г при увеличении температуры на 20 °С (в кДж)?
- Внутренняя энергия одноатомного идеального газа, находящегося в баллоне объемом 0,02 м³, равна 600 Дж. Определить в килопаскалях давление газа.
- Какова внутренняя энергия гелия (в МДж), заполняющего аэростат объемом 60 м³ при давлении 100 кПа?

5. Найдите концентрацию молекул идеального газа в сосуде емкостью 2 л при температуре 27°С, если его внутренняя энергия равна 300 Дж.

6. Каково давление идеального газа, занимающего объем 2 л, если его внутренняя энергия равна 300 Дж?

7. На диаграмме T (температура), V (объем) график процесса представляет собой прямую, проходящую через точки с координатами (250 К; 0,1 м³) и (250 К; 0,2 м³). Определить изменение внутренней энергии идеального газа в ходе процесса. Масса газа постоянна.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
37	21	20	9	$2,5 \cdot 10^{25}$	10^5	0

www.repet.by

7.08. Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики является обобщением закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы. Он формулируется следующим образом.

Изменение ΔU внутренней энергии неизолированной термодинамической системы равно разности между количеством теплоты Q , переданной системе, и работой A , совершенной системой над внешними телами: $\Delta U = Q - A$.

Соотношение, выражающее первый закон термодинамики, часто записывают в другой форме. На мой взгляд, следующая запись более понятна

$$Q = \Delta U + A$$

Сформулируем первый закон термодинамики по этой записи.

Количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы системой над внешними телами (или просто на совершение системой работы).

Первый закон термодинамики является обобщением опытных фактов. Согласно этому закону, энергия не может быть создана или уничтожена. Она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую. Важным следствием первого закона термодинамики является утверждение о невозможности создания машины, способной совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Такая гипотетическая машина получила название **вечного двигателя** (perpetuum mobile) первого рода. Многочисленные попытки создать такую машину неизменно заканчивались провалом. Любая машина может совершать положительную работу A над внешними телами только за счет получения некоторого количества теплоты Q от окружающих тел или уменьшения своей внутренней энергии ΔU .

Применим первый закон термодинамики к изопроцессам в газах.

В **изохорном процессе** ($V = \text{const}$) газ работы не совершает $A = 0$ (объем не меняется). Следовательно,

$$Q = \Delta U = U(T_2) - U(T_1).$$

Здесь $U(T_1)$ и $U(T_2)$ – внутренние энергии газа в начальном и конечном состояниях при температурах T_1 и T_2 . Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры. При изохорном нагревании тепло поглощается газом ($Q > 0$) и его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении тепло отдается внешним телам ($Q < 0$). Таким образом для одноатомного газа и изохорного процесса получаем

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T \quad \text{или} \quad Q = \Delta U = \frac{3}{2} V \Delta p$$

В **изобарном процессе** ($p = \text{const}$) работа, совершаемая газом, выражается соотношением

$$A = p(V_2 - V_1) = p \Delta V \quad \text{или} \quad A = \nu R \Delta T$$

Первый закон термодинамики для изобарного процесса будет иметь вид

$$Q = U(T_2) - U(T_1) + p(V_2 - V_1) = \Delta U + p \Delta V.$$

Если газ одноатомный, то можно получить более компактные соотношения

$$Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + \nu R \Delta T = \frac{5}{2} \nu R \Delta T \quad \text{или} \quad Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V$$

При изобарном расширении $Q > 0$ – тепло поглощается газом, газ совершает положительную работу и его внутренняя энергия возрастает. При изобарном сжатии $Q < 0$ – тепло отдается внешним телам. В этом случае $A < 0$. Температура газа при изобарном сжатии уменьшается ($T_2 < T_1$) и внутренняя энергия убывает, то есть $\Delta U < 0$.

А теперь одна важная особенность изобарного процесса. Так как работа газа равна $A = \nu R \Delta T$, то для изобарного процесса будет справедливо следующее соотношение

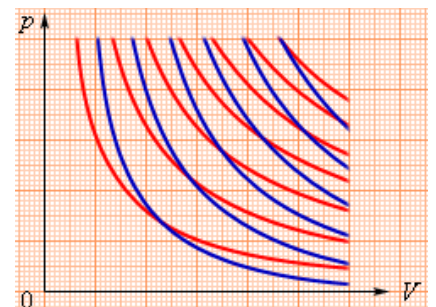
$$Q = \frac{5}{2} \nu R \Delta T = \frac{5}{2} A \Rightarrow A = \frac{2}{5} Q = 0,4Q,$$

то есть при изобарном процессе 40% теплоты, переданной газу, идут на работу газа. Остальные 60% идут на увеличение внутренней энергии газа. Другими словами, на изменение внутренней энергии при изобарном процессе идет в 1,5 раза большее количество теплоты чем на работу газа.

В **изотермическом процессе** температура газа не изменяется. Следовательно, не изменяется и внутренняя энергия газа, то есть $\Delta U = 0$. Первый закон термодинамики для изотермического процесса выражается соотношением $Q = A$. Количество теплоты Q , полученной газом в процессе изотермического расширения, превращается в работу над внешними телами. При изотермическом сжатии работа внешних сил, произведенная над газом, превращается в тепло, которое передается окружающим телам.

Наряду с изохорным, изобарным и изотермическим процессами в термодинамике часто рассматриваются процессы, протекающие без теплообмена с окружающими телами – **адиабатические процессы**. Сосуды с теплонепроницаемыми стенками называются **адиабатическими оболочками**, а процессы расширения или сжатия газа в таких сосудах называются **адиабатическими**.

При **адиабатическом процессе** $Q = 0$. Поэтому первый закон термодинамики принимает вид $A = -\Delta U$, то есть газ совершает работу за счет убыли его внутренней энергии. Вы сами не раз наблюдали такой процесс – расширение газа при открывании газированного напитка. Если напиток достаточно холодный, то при резком открывании из горлышка бутылки пойдет «туман». Почему так происходит? Дело в том, что при открывании бутылки мы даем газу возможность расширяться, то есть совершить работу. При этом никакого источника энергии для совершения работы у газа нет и он расширяется только за счет собственной внутренней энергии. Вследствие этого его температура резко падает и мы видим туман. Возможна ситуация, когда при таком открыва-



нии в бутылке резко образуются кусочки льда. Для наблюдения такого явления необходимо охладить бутылку с газировкой практически до нуля градусов по Цельсию. В youtube есть достаточно много видео с этим красивым явлением. Рекомендую посмотреть.

На плоскости (p, V) процесс адиабатического расширения (или сжатия) газа изображается кривой, которая называется адиабатой (на графике адиабата более крутая [синяя, в PDF-файле это видно]). При адиабатическом расширении газ совершает положительную работу $(A > 0)$ и поэтому его внутренняя энергия уменьшается $(\Delta U < 0)$. Это приводит к понижению температуры газа. Вследствие этого давление газа при адиабатическом расширении убывает быстрее, чем при изотермическом расширении. Адиабатический процесс также можно отнести к изопроцессам.

www.repet.by

А теперь оформим теорию, изложенную выше, в виде таблицы.

Процесс	Изменение внутренней энергии ΔU	Работа газа A	Полученное газом количество теплоты Q
Изохорный $V = \text{const}$	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ или $\Delta U = \frac{3}{2} V \Delta p$	$A = 0$	$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ или $Q = \Delta U = \frac{3}{2} V \Delta p$
Изобарный $p = \text{const}$	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$ или $\Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V$	$A = \nu R \Delta T$ или $A = \frac{3}{2} p \Delta V$	$Q = \frac{5}{2} \nu R \Delta T$ или $Q = \frac{5}{2} p \Delta V$
Изотермический $T = \text{const}$	0	$A = Q$ (площадь под графиком pV -координатах)	$Q = A$ (площадь под графиком pV -координатах)
Адиабатный	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$A = -\Delta U = -\frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$Q = 0$

www.repet.by

ПРИМЕР. В цилиндре под подвижным тяжелым поршнем находится 12 г аргона. Какое количество теплоты получил газ при нагревании от температуры 20°C до температуры 220°C? Молярная масса аргона 40 г/моль.

По первому закону термодинамики $Q = A + \Delta U$, где A – совершенная газом работа, ΔU – изменение его внутренней энергии. Нагревание газа происходит при постоянном давлении (поршень подвижен). По-

этому $A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$. Изменение внутренней энергии газа $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$. Тогда

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) = \frac{5 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31(493 - 293)}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-2}} \text{ Дж} = 1,2 \text{ кДж.}$$

www.repet.by

ПРИМЕР. Для нагревания некоторого количества идеального газа с молярной массой 28 кг/кмоль на 14 К при постоянном давлении потребовалось 29 Дж теплоты. Чтобы затем охладить этот же газ до исходной температуры при постоянном объеме, у него надо отнять 20,7 Дж теплоты. Найдите массу (в г) газа. Универсальная газовая постоянная 8,3 Дж/(моль·К).

Запишем первый закон термодинамики сразу для двух последовательных процессов

$$Q_1 = A_1 + \Delta U_1 \text{ – изобарный процесс}$$

$$Q_2 = \Delta U_2 \text{ – изохорный процесс.}$$

Так как конечная температура по условию равна начальной, то $\Delta U_1 = \Delta U_2$, то есть изменение внутренней энергии равно нулю (внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры, на сколько энергия увеличилась в первом процессе на столько же она уменьшилась во втором). Подставим в первое уравнение вместо $\Delta U_1 = \Delta U_2$. Получим

$$Q_1 = A_1 + \Delta U_1 \Rightarrow Q_1 = A_1 + \Delta U_2 \Rightarrow Q_1 = A_1 + Q_2 \Rightarrow A_1 = Q_1 - Q_2$$

Работа, совершенная газом, равна $A_1 = \nu R \Delta T$. Получаем $Q_1 - Q_2 = \frac{m}{M} R \Delta T$, откуда находим массу газа

$$m = \frac{M(Q_1 - Q_2)}{R\Delta T} = 2 \text{ г.}$$

ПРИМЕР. Для изобарного нагревания газа, количество вещества которого 800 моль, на 500 К ему сообщили количество теплоты 9,4 МДж. Определить работу газа и приращение его внутренней энергии (в МДж).

О каком газе идет речь в задаче? Об идеальном. Сколько атомный газ? Об этом в условии ни слова. Это значит, что мы не имеем права применять формулу для внутренней энергии. При этом формулу для работы газа мы применить можем. Найдем работу, которую совершил газ

$$A = \nu R\Delta T = 800 \cdot 8,3 \cdot 500 = 3\,320\,000 \text{ (Дж)} = 3,32 \text{ (МДж)}$$

Так как процесс изобарный, то мы найдем изменение внутренней энергии как разность между количеством теплоты сообщенной газу и работой, которую он совершил

$$Q = A + \Delta U \Rightarrow \Delta U = Q - A = 9,4 - 3,2 = 6,2 \text{ (МДж)}$$

www.repet.by

ПРИМЕР. При адиабатическом сжатии 1 кг аргона (молярная масса 40 г/моль) совершена работа 10^5 Дж. Какова конечная температура газа (в К), если до сжатия температура была 27°C .

При решении этой задачи важно не упустить два момента. Во-первых, работа газа будет отрицательной, так как происходит адиабатическое сжатие. Во-вторых, при адиабатическом процессе мы не имеем права считать работу газа по формуле $A = \nu R\Delta T$, так как согласно первому началу термодинамики

$$Q = A + \Delta U \Rightarrow 0 = A + \Delta U \Rightarrow A = -\Delta U = -\frac{3}{2}\nu R\Delta T$$

Так как $A = -\frac{3}{2}\nu R\Delta T$, то изменение температуры газа будет равно

$$A = -\frac{3}{2}\nu R\Delta T \Rightarrow \Delta T = -\frac{2}{3} \frac{A}{\nu R} = -\frac{2}{3} \frac{A}{\frac{m}{M} R} = -\frac{2}{3} \frac{-10^5}{\frac{1}{0,04} \cdot 8,3} = 321 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Обращаю ваше внимание на то, что когда мы ищем изменение температуры (а не саму температуру), то единицы измерения температуры роли не играют, так как изменение температуры на 1 градус Цельсия равно изменению температуры на 1 Кельвин. А теперь найдем конечную температуру газа

$$\Delta T = T_2 - T_1 \Rightarrow T_2 = T_1 + \Delta T = 27^\circ\text{C} + 321^\circ\text{C} = 348^\circ\text{C} = (348 + 273)\text{K} = 621\text{K}$$

www.repet.by

Тест 7.08.02.

1. Идеальный одноатомный газ в количестве 1 моль нагрели сначала изохорно, а затем изобарно. В результате как давление, так и объем газа увеличились в два раза. Какое количество теплоты получил газ в этих двух процессах, если его начальная температура была 100 К?

2. Для изобарного нагревания газа, количество вещества которого 800 моль, на 500 К ему сообщили количество теплоты 9,4 МДж. Определить работу газа и приращение его внутренней энергии (в МДж).

3. Какая часть количества теплоты, сообщенного одноатомному газу в изобарном процессе, идет на увеличение внутренней энергии и какая часть - на совершение работы?

4. При изобарном охлаждении внутренняя энергия идеального газа уменьшилась на 1662 кДж. Какое количество теплоты (в Дж) было им передано окружающим телам?

5. В изотермическом процессе газ совершил работу

9. При адиабатическом сжатии 1 кг аргона (молярная масса 40 г/моль) совершена работа 10^5 Дж. Какова конечная температура газа (в К), если до сжатия температура была 27°C .

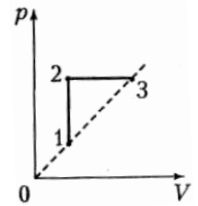
10. Для изобарного нагревания гелия ему сообщили 900 кДж теплоты. Найти изменение внутренней энергии гелия в этом процессе

11. Как изменилась внутренняя энергия газа если в некотором процессе газу сообщено 900 Дж теплоты, а газ при этом совершил работу 500 Дж?

12. Если в некотором процессе внутренняя энергия газа уменьшилась на 300 Дж, а газ совершил работу 500 Дж, то чему равно сообщенная газу в этом процессе теплота?

13. Газу сообщили 500 Дж теплоты, при этом его внутренняя энергия увеличилась на 750 Дж. Чему равна работа, совершенная газом?

14. Газ находится в сосуде под давлением $2,5 \cdot 10^4$ Па. При сообщении газу $6 \cdot 10^4$ Дж тепло-



1000 Дж. Насколько увеличится внутренняя энергия этого газа, если ему сообщить количество теплоты, вдвое большее, чем в первом процессе, а процесс проводить изохорно?

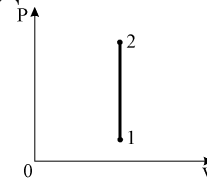
6. В адиабатном процессе внешние силы совершили над газом работу 200 Дж. Как и на сколько изменилась его внутренняя энергия?

7. Некоторое количество идеального одноатомного газа участвует в процессе, в ходе которого сначала давление газа изохорически увеличили в 2 раза, а затем его объем изобарически увеличили в 3 раза. Какое количество теплоты сообщили газу (в кДж)? Начальное давление и объем газа 10^5 Па и 100 л соответственно.

8. Для повышения температуры газа, имеющего массу 20 кг и молярную массу 28 г/моль, на 50 К при постоянном давлении необходимо затратить количество теплоты 0,5 МДж. Какое количество теплоты (в кДж) следует отнять от этого газа при постоянном объеме, чтобы его температура понизилась на 50 К?

ты он изобарно расширился и объем его увеличился на 2 м^3 . Насколько изменилась внутренняя энергия газа?

15. На рисунке показан процесс перехода газа из состояния 1 в состояние 2. Чему равно изменение внутренней энергии газа, если ему при этом сообщено $4 \cdot 10^3$ Дж теплоты?



16. Одноатомный идеальный газ находится в закрытом баллоне емкостью 5 л. Какое количество теплоты нужно сообщить газу, чтобы повысить его давление на 20 кПа?

17. При подведении к 2 моль идеального одноатомного газа 300 Дж теплоты его температура увеличилась на 10 К. Какую работу совершил при этом газ?

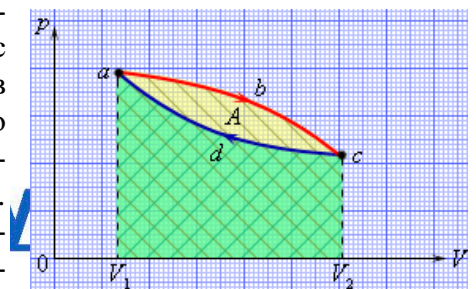
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.
5295	3,3; 6,1	3/5; 2/5	2770	2000	Увеличилась на 200 Дж	115	200	620	540 кДж	Увеличилась на 400 Дж	200	-250 Дж	10 кДж	4000	150	51

www.repet.by

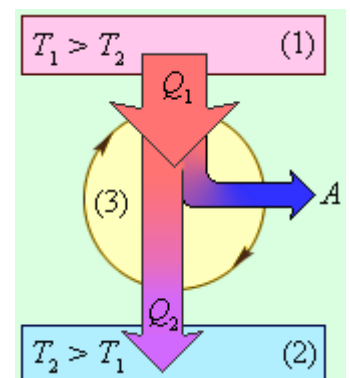
7.09. Второе начало термодинамики. Тепловые машины

Тепловым двигателем называется устройство, способное превращать полученное количество теплоты в механическую работу. Механическая работа в тепловых двигателях производится в процессе расширения некоторого вещества, которое называется **рабочим телом**. В качестве рабочего тела обычно используются газообразные вещества (пары бензина, воздух, водяной пар). Как следует из первого закона термодинамики, полученное газом количество теплоты Q полностью превращается в работу A при **изотермическом** процессе, при котором внутренняя энергия остается неизменной ($\Delta U = 0$): $A = Q$.

Но такой **однократный акт** преобразования теплоты в работу не представляет интереса для техники. Реально существующие тепловые двигатели (паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и т. д.) работают **циклически**. Процесс теплопередачи и преобразования полученного количества теплоты в работу периодически **повторяется**. Для этого рабочее тело должно совершать **круговой процесс** или термодинамический цикл, при котором периодически восстанавливается **исходное** состояние системы. Круговые процессы изображаются на диаграмме (p, V) с помощью замкнутых кривых. При расширении газ совершает положительную работу A_1 , равную площади под кривой abc . При сжатии газ совершает **отрицательную** работу A_2 , равную по модулю площади под кривой cda . Полная работа за цикл на диаграмме (p, V) равна площади цикла: $A = A_1 + A_2$ или $A = A_1 - |A_2|$. Работа A положительна, если цикл обходится по часовой стрелке (как раз такое направление указано на рисунке), и A отрицательна, если цикл обходится в противоположном направлении.



Общее свойство всех круговых процессов состоит в том, что их невозможно провести, приводя рабочее тело (на рисунке обозначено (3)) в тепловой контакт только с одним тепловым резервуаром. Их нужно, по крайней мере, два. Тепловым резервуаром с более высокой температурой называют **нагревателем** (на рисунке обозначен (1)), а с более низкой – **холодильником** (на рисунке обозначен (2)). Совершая круговой процесс, рабочее тело получает от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 , которое пытается преобразовать в работу A . Очевидно, что нет такого двигателя, который сможет 100% поступившей энергии преобразовать в полезную работу.



Поэтому некоторое количество теплоты Q_2 рабочее тело вынуждено отдать холодильнику. Таким образом, работа газа за цикл будет равна разности полученной и отданной теплоты

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Отношение работы A к количеству теплоты Q_1 , полученному рабочим телом за цикл от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия** η тепловой машины:

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

Важно понимать, что работу A и общее количество теплоты Q_1 , мы можем найти как сумму или разность других теплот. Например, работу мы можем найти как разность полученной Q_1 и отданной Q_2 теплоты. Тогда формула для КПД примет следующий вид

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \text{ или } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{Q_1}{Q_1} - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

При этом общее количество теплоты, полученное системой, равно сумме выполненной работы и теплоты, которую рабочее тело отдало холодильнику

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{A}{A + Q_2}$$

Важно понимать, что в числителе должна стоять **полезная работа**, а в знаменателе обязательно будет стоять количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя. В любом случае мы должны помнить, что КПД это всегда отношение **полезной работы к полной работе**.

Коэффициент полезного действия указывает, какая часть тепловой энергии, полученной рабочим телом от «горячего» теплового резервуара, превратилась в полезную работу. Остальная часть $(1 - \eta)$ была «бесполезно» передана холодильнику. Поэтому если в условии задачи сказано, что холодильнику было передано 60% теплоты, то это значит, что КПД будет 40%.

Если не отдать эту энергию холодильнику, то тепловая машина может разрушиться. Именно поэтому у любого двигателя внутреннего сгорания есть система охлаждения и подключенный к ней радиатор. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы ($\eta < 1$).

В 1824 году французский инженер Карно рассмотрел круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Этот круговой процесс сыграл важную роль в развитии учения о тепловых процессах. Он называется **циклом Карно** (см. рисунок).

Немного теории для продвинутых. Цикл Карно совершает газ, находящийся в цилиндре под поршнем. На изотермическом участке (1–2) газ приводится в тепловой контакт с горячим тепловым резервуаром (нагревателем), имеющим температуру T_1 . Газ изотермически расширяется, совершая работу A_{12} . При этом к газу подводится некоторое количество теплоты $Q_1 = A_{12}$. Далее на участке (2–3) газ помещается в адиабатическую оболочку и продолжает расширяться в отсутствие теплообмена. На этом участке газ совершает работу $A_{23} > 0$. Температура газа при адиабатическом расширении падает до значения T_2 . На следующем участке (3–4) газ приводится в тепловой контакт с холодным тепловым резервуаром (холодильником) при температуре $T_2 < T_1$. Происходит процесс изотермического сжатия. Газ совершает работу $A_{34} < 0$ и отдает тепло $Q_2 < 0$, равное произведенной работе A_{34} . Внутренняя энергия газа не изменяется. Наконец, на последнем участке адиабатического сжатия газ вновь помещается в адиабатическую оболочку. При сжатии температура газа повышается до значения T_1 , газ совершает работу $A_{41} < 0$. Полная работа A , совершаемая газом за цикл, равна сумме работ на отдельных участках:

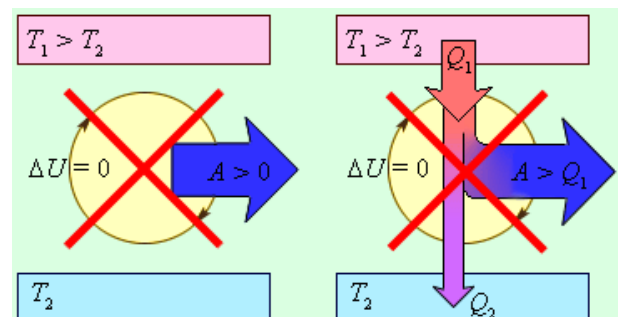
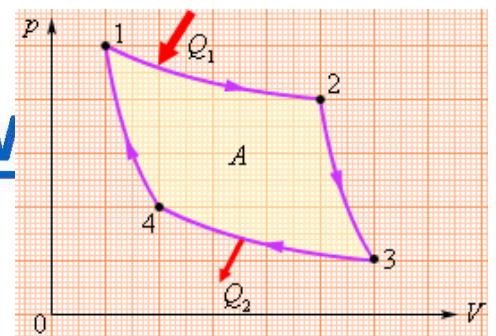
$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}.$$

А теперь опять теория для всех. Карно выразил **коэффициент полезного действия цикла** через температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \text{ или } \eta = \frac{T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}} = 1 - \frac{T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}}.$$

Цикл Карно – **наиболее эффективный круговой процесс из всех возможных при заданных температурах нагревателя и холодильника**: $\eta_{\text{Карно}} = \eta_{\text{max}}$.

Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии



для тепловых процессов. Он устанавливает связь между **количеством теплоты** Q , полученной системой, изменением ΔU ее **внутренней энергии** и **работой** A , совершенной над внешними телами $Q = \Delta U + A$. Согласно этому закону, энергия не может быть создана или уничтожена. Она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую. Процессы, нарушающие первый закон термодинамики, никогда не наблюдались. На рисунке изображены устройства, запрещенные первым законом термодинамики — циклически работающие тепловые машины. На первом рисунке вечный двигатель 1 рода, **совершающий работу без потребления энергии извне**. На втором — **тепловая машина с коэффициентом полезного действия $\eta > 1$** .

При этом первый закон термодинамики не устанавливает направление протекания тепловых процессов. Однако, как показывает опыт, многие тепловые процессы могут протекать только в одном направлении. Такие процессы называются **необратимыми**. Например, при тепловом контакте двух тел с разными температурами тепловой поток всегда направлен от более теплого тела к более холодному. Никогда не наблюдается **самопроизвольный** (то есть без вмешательства человека) процесс передачи тепла от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой. Следовательно, процесс теплообмена при конечной разности температур является необратимым.

Обратимыми процессами называют процессы перехода системы из одного равновесного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний. При этом сама система и окружающие тела возвращаются к исходному состоянию.

Необратимыми являются процессы превращения механической работы во внутреннюю энергию тела из-за наличия трения, процессы диффузии в газах и жидкостях, процессы перемешивания газа при наличии начальной разности давлений и так далее. Все реальные процессы необратимы, но они могут сколь угодно близко приближаться к обратимым процессам. Обратимые процессы являются идеализацией реальных процессов.

Первый закон термодинамики не может отличить обратимые процессы от необратимых. Он просто требует от термодинамического процесса определенного энергетического баланса и ничего не говорит о том, возможен такой процесс или нет. Направление самопроизвольно протекающих процессов устанавливает второй закон термодинамики. Он может быть сформулирован в виде запрета на определенные виды термодинамических процессов.

Английский физик У. Кельвин дал в 1851 г. следующую формулировку второго закона термодинамики.

В циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученного от единственного теплового резервуара.

Гипотетическую тепловую машину, в которой мог бы происходить такой процесс, называют «вечным двигателем второго рода». В земных условиях такая машина могла бы отбирать тепловую энергию, например, у Мирового океана и полностью превращать ее в работу. Масса воды в Мировом океане составляет примерно 10^{21} кг, и при ее охлаждении на один градус выделилось бы огромное количество энергии ($\approx 10^{24}$ Дж), эквивалентное полному сжиганию 10^{17} кг угля. Ежегодно вырабатываемая на Земле энергия приблизительно в 10 000 раз меньше. Поэтому «вечный двигатель второго рода» был бы для человечества не менее привлекателен, чем «вечный двигатель первого рода», запрещенный первым законом термодинамики.

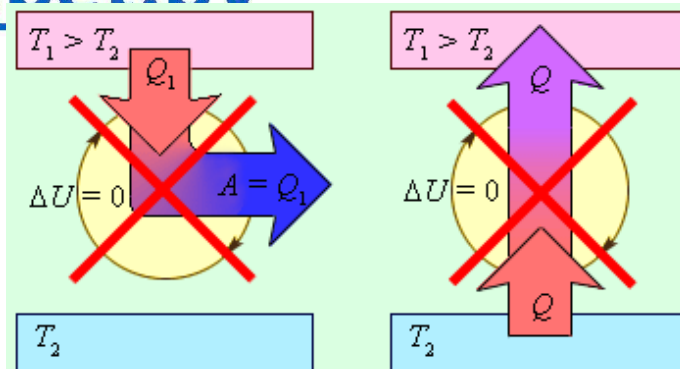
Немецкий физик Р. Клаузиус дал другую формулировку второго закона термодинамики.

Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии путем теплообмена от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой.

На рисунке изображены процессы, запрещаемые вторым законом термодинамики, но не запрещаемые первым законом термодинамики. На первом рисунке «вечный двигатель второго рода». На втором — самопроизвольный переход тепла от холодного тела к более тепловому («идеальная холодильная машина»). Эти процессы соответствуют двум формулировкам второго закона термодинамики.

Следует отметить, что обе формулировки второго закона термодинамики **эквивалентны**.

Второй закон термодинамики связан непосредственно с необратимостью реальных тепловых процессов. Энергия теплового движения молекул качественно отличается от всех других видов энергии — механи-



ческой, электрической, химической и т. д. Энергия любого вида, кроме энергии теплового движения молекул, может полностью превратиться в любой другой вид энергии, в том числе и в энергию теплового движения. Последняя может испытать превращение в любой другой вид энергии лишь частично. Поэтому любой физический процесс, в котором происходит превращение какого-либо вида энергии в энергию теплового движения молекул, является необратимым процессом, то есть он не может быть осуществлен полностью в обратном направлении.

На основании любой из формулировок второго закона термодинамики могут быть доказаны следующие утверждения, которые называются **теоремами Карно**.

1. Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей при данных значениях температур нагревателя и холодильника, не может быть больше, чем коэффициент полезного действия машины, работающей по обратимому циклу Карно при тех же значениях температур нагревателя и холодильника.

2. Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, не зависит от рода рабочего тела, а зависит только от температур нагревателя и холодильника.

Таким образом, коэффициент полезного действия машины, работающей по циклу Карно, максимален.

При решении задач пользуйтесь формулами

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \text{ и } \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Эти формулы так же можно записать в виде

$$\eta = 1 - \frac{Q_X}{Q_H} \text{ и } \eta = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

Приравняв эти две формулы можно получить соотношение

$$1 - \frac{Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H} \Rightarrow \frac{Q_X}{Q_H} = \frac{T_X}{T_H}$$

 **ЗАДАЧИ ПО ЭТОЙ ТЕМЕ ДОСТАТОЧНО ПРОСТЫЕ. ВНИМАТЕЛЬНО ЧИТАЙТЕ УСЛОВИЕ И АККУРАТНО ЗАПИСЫВАЙТЕ ДАНО.**

www.repet.by

ПРИМЕР. Рабочее тело идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, получает от нагревателя с температурой 273°C количество теплоты 80 кДж . Роль холодильника играет окружающий воздух, температура которого 0°C . На какую максимальную высоту эта машина может поднять груз массой 400 кг ? $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Зная температуры нагревателя и холодильника, мы легко найдем КПД тепловой машины

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}} = 0,5.$$

Работа, произведенная этой машиной, будет равна

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{нагр}}} \Rightarrow A = \eta Q_{\text{нагр}} = 40 \text{ кДж}.$$

Если вся эта работа пойдет на увеличение потенциальной энергии груза, то она будет равна

$$A = mgh,$$

Откуда найдем максимальную высоту

$$h = \frac{A}{mg} = 10 \text{ м}.$$

www.repet.by

СЛОЖНЫЙ ПРИМЕР. На подъем груза весом 1000 кН на высоту 6 м пошло 80% всей механической работы, полученной в результате работы идеальной тепловой машины, у которой разность температур нагревателя и холодильника равна 125 К , а отношение количества теплоты, полученной от нагревателя, к его абсолютной температуре равно 300 Дж/К . Сколько циклов было совершено за время подъема груза?

Как было сказано выше, любая тепловая машина работает циклически. Она не постоянно вырабатывает полезную механическую энергию, а порциями. Просто из-за того, что цикл длится очень малый промежуток времени и перерывов между циклами почти нет, мы этого не замечаем. Например, двигатель внутреннего сгорания в автомобиле. При движении двигатель автомобиля может совершать около 2000 оборотов в минуту или около 33 оборотов в секунду (посмотрите на тахометр на приборной панели). Это и есть количество рабочих циклов в единицу времени. Как видите цифра очень большая и поэтому мы не замечаем отдельных циклов.

В нашей задаче количество циклов N будет равно отношению работы по подъему A , которую надо совершить, к работе A_0 , которую тепловая машина совершает за один цикл. Работа A равна потенциальной энергии, которую мы сообщаем грузу. Следовательно,

$$N = \frac{A}{A_0} = \frac{mg \cdot h}{A_0}$$

А теперь подробно остановимся на фразе «...пошло 80% всей механической работы, полученной в результате работы идеальной тепловой машины...». Во-первых, не стоит думать, что КПД двигателя 80%. Важно понять, что только 80% от полезной работы совершенной тепловой машиной идет на подъем тела. Потери происходят не только при работе тепловой машины, но и при передаче механической энергии (полезной работы) от тепловой машины к потребителю этой энергии. Рассмотрим из-за чего образуются потери на примере двигателя внутреннего сгорания.

В цилиндры двигателя внутреннего сгорания поступает смесь из бензина и воздуха. Смесь поджигают и выделяется энергия, которая превращается в механическую энергию. Эта механическая энергия будет полезной, но она не сможет сразу же попасть на колеса и привести автомобиль в движение. Механическая энергия вынуждена пройти через большое количество промежуточных звеньев (карданный вал, коробка передач, полуоси, ШРУСы) и только потом попадает на колеса. И на каждом из этих промежуточных этапов теряется некоторое количество механической энергии. То есть потери происходят не только в самом двигателе, но и вне его. Такая же ситуация и у нас в задаче. Работа A_0 , которая будет доходить до тела, будет равна

$$A_0 = A_1 \cdot 0,8$$

где A_1 – полезная работа, совершенная тепловой машиной за один цикл.

По определению КПД двигателя можно найти через температуру нагревателя и холодильника

$$\eta = \frac{T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}}$$

С другой стороны $\eta = \frac{A_1}{Q}$. Так как КПД двигателя не зависит от метода, которым мы его вычисляем, то

$$\frac{T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}} = \frac{A_1}{Q} \Rightarrow A_1 = Q \cdot \frac{T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}}{T_{\text{Нагр}}} = \frac{Q}{T_{\text{Нагр}}} (T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}})$$

А теперь внимательно читаем условие. Во-первых, нам дано «отношение количества теплоты, полученной от нагревателя, к его абсолютной температуре равно 300 Дж/К» или $\frac{Q}{T_{\text{Нагр}}} = 300$ (Дж/К). Во-

вторых, «разность температур нагревателя и холодильника равна 125 К» или $(T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}) = 125$ (К).

Следовательно, мы можем найти полезную работу A_1 , совершаемую тепловой машиной за один цикл

$$A_1 = \frac{Q}{T_{\text{Нагр}}} (T_{\text{Нагр}} - T_{\text{Хол}}) = 300 \cdot 125 = 37,5 \text{ (кДж)}$$

Следовательно, $A_0 = A_1 \cdot 0,8 = 30$ (кДж). Окончательно получаем $N = \frac{mg \cdot h}{A_0} = \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 6}{30 \cdot 10^3} = 200$ (циклов)

www.repet.by

При решении задач по этой теме помните о следующих нюансах.

1. Всегда переводите температуру в Кельвины. При этом изменение температуры переводить не надо.
2. Если в результате теплового процесса теряется (передается холодильнику) какое-то количество теплоты, то КПД процесса равен 100% минус процент потерянной теплоты.
3. Работу A и общее количество теплоты Q_1 мы можем найти как сумму или разность других теплот. Например, работу мы можем найти как разность полученной Q_1 и отданной Q_2 теплоты. Так же помните о том, что количество потерянной теплоты (теплоты, отданной холодильнику) можно найти как разность общего количества теплоты Q_1 (теплоты, сообщенной рабочему телу) и совершенной работы A .

Тест 7.09.02.

1. Температура нагревателя идеальной тепловой машины 117°C , а холодильника 27°C . Количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя за 1 с, равно 60 кДж. Вычислить КПД (в %) и мощность машины.

8. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу 73,5 кДж. Температура нагревателя 100°C , температура холодильника 0°C . Найти количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику.

2. В идеальной тепловой машине за счет каждого килоджоуля энергии, получаемой от нагревателя, совершается работа 300 Дж. Определить КПД машины (в %) и температуру нагревателя (в К), если температура холодильника 280 К.

3. Идеальная тепловая машина поднимает груз массой 400 кг. Рабочее тело машины получает от нагревателя с температурой 200°C количество теплоты, равное 80 кДж. Определить КПД двигателя (в %). На какую максимальную высоту (в м) поднимет груз эта тепловая машина? Трением пренебречь. В качестве холодильника выступает окружающий воздух, находящийся при нормальных условиях.

4. Идеальный тепловой двигатель получает от нагревателя каждую секунду 7200 кДж теплоты и отдает в холодильник 6400 кДж. Каков КПД двигателя?

5. Двигатель работает по циклу Карно. Как изменится его КПД (η_2/η_1), если при постоянной температуре холодильника 17°C температуру нагревателя повысить со 127 до 447°C?

6. В идеальном тепловом двигателе абсолютная температура нагревателя в три раза больше, чем температура холодильника. Нагреватель передал газу 40 кДж теплоты. Какую работу (в кДж) совершил газ?

7. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу 2,94 кДж и отдает за один цикл холодильнику количество теплоты 13,4 кДж. Найти КПД цикла (в %).

9. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. При этом 80% количества теплоты, получаемого от нагревателя, передается холодильнику. Машина получает от нагревателя количество теплоты 6,28 кДж. Найти работу, совершаемую за один цикл (в кДж).

10. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, за цикл получает от нагревателя количество теплоты 2,512 кДж. Температура нагревателя 400 К, температура холодильника 300 К. Найти количество теплоты, отдаваемое холодильнику за один цикл.

11. Температура нагревателя машины работающей по циклу Карно, 427°C, холодильника 227°C, причем холодильник этой машины служит нагревателем второй машины. Найти отношение КПД первой машины к КПД второй машины, если разность температур нагревателя и холодильника у этих машин одинаковая?

13. В идеальной тепловой машине рабочим веществом является пар с начальной температурой 710 К, температура отработанного пара 350 К. Определить среднюю полезную мощность машины, если от нагревателя поступает в среднем 142 кДж теплоты в минуту.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
23%; 14 000	30; 400	38; 7,6	11	2,17	26,7	18	200 000	1,3	1880	1,4	1200

www.repet.by

Итоговый тест по разделу «Термодинамика»

1. Как изменится внутренняя энергия идеального газа при увеличении его температуры в 2 раза?

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Уменьшится в 2 | 2. не изменится; |
| 3. увеличится в 2 раза; | 4. увеличится в 4 раза. |

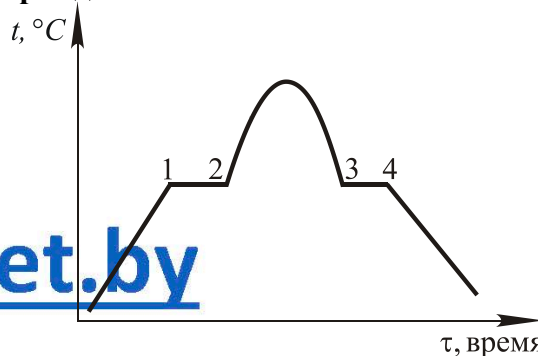
2. Одноатомный идеальный газ при изотермическом расширении совершил работу 30 Дж. Какое количество теплоты было передано газу?

- | | |
|-----------|-----------|
| 1. 30 Дж; | 2. 45 Дж; |
| 3. 75 Дж; | 4. 0 Дж. |

3. Газ, которому сообщили количество теплоты 500 Дж, совершил работу 200 Дж. Определите изменение внутренней энергии газа.

- | | |
|------------|-------------|
| 1. 300 Дж; | 2. 700 Дж; |
| 3. 500 Дж; | 4. -300 Дж. |

4. На рисунке изображен график изменения температуры при нагревании и охлаждении олова. Какая из точек соответствует началу кристаллизации олова?



- | | |
|-------|-------|
| 1. 1; | 2. 2; |
| 3. 3; | 4. 4. |

5. Для описания какого процесса используется формула расчета количества теплоты $Q = mc(t_2 - t_1)$?

- | | |
|---------------|--------------------|
| 1. Нагреваия; | 2. плавления; |
| 3. испарения; | 4. кристаллизации. |

6. Какое количество теплоты необходимо затратить для обращения в пар 2 кг эфира при температуре кипения, если его удельная теплота парообразования 0,4 МДж/кг?

- | | |
|-------------|-------------|
| 1. 0,2 МДж; | 2. 0,4 МДж; |
| 3. 400 кДж; | 4. 0,8 МДж. |

www.repet.by

7. Коэффициент полезного действия теплового двигателя, совершившего работу A после получения количества теплоты Q_1 от нагревателя, рассчитывается по формуле:

www.repet.by

1. $A/(Q_1 - A)$;
2. A/Q_1 ;
3. $A/(Q_1 + A)$;
4. $(Q_1 - A)/Q_1$.

8. Поезд массой $2,4 \cdot 10^6$ кг, движущийся со скоростью 36 км/ч, начинает тормозить и останавливается. Какое количество теплоты выделится при торможении?

1. $1,2 \cdot 10^7$ Дж;
2. $2,4 \cdot 10^8$ Дж;
3. $2,4 \cdot 10^7$ Дж;
4. $1,2 \cdot 10^8$ Дж.

9. Идеальный газ при некотором процессе совершил работу 700 Дж, но его внутренняя энергия при этом уменьшилась на 400 Дж. Какое количество теплоты было сообщено газу при данном процессе?

1. 300 Дж;
2. 1100 Дж;
3. 700 Дж;
4. 400 Дж.

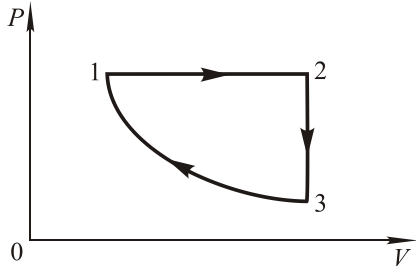
10. На сколько увеличится внутренняя энергия идеального газа, находящегося под давлением 500 кПа, если его объем изобарно увеличить на 2 м^3 ?

1. 1 МДж;
2. 1,5 МДж;
3. 1,3 МДж;
4. 2 МДж.

11. Одноатомный идеальный газ в количестве 10 молей изохорно нагревается на 2°C . Определите количество теплоты, полученное газом.

1. 250 Дж;
2. 25 Дж;
3. 41,6 Дж;
4. 416 Дж.

12. На рисунке изображен круговой процесс идеального газа. На каком этапе процесса работа газа больше нуля?



1. $3 \rightarrow 1$;
2. $2 \rightarrow 3$;
3. $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$;
4. $1 \rightarrow 2$.

13. При изобарном расширении 2,0 молей многоатомного идеального газа объем увеличился в 2 раза. Определите работу, совершенную газом при нагревании, если его начальная температура равна 300 К.

1. 3,5 кДж;
2. 5,0 кДж;
3. 7,5 кДж;
4. 25 кДж.

14. Газ теплового двигателя совершил за один цикл работу 2500 Дж и отдал холодильнику количество теплоты 7500 Дж. Определите коэффициент полезного действия теплового двигателя.

1. 0,33;
2. 0,25;
3. 0,75;
4. 0,3.

15. Температура воды массой 2 кг, находящейся в калориметре, равна 10°C . Сколько кипятка необходимо долить в калориметр, чтобы получить воду температурой 50°C ?

1. 1,0 кг;
2. 1,2 кг;
3. 1,5 кг;
4. 1,6 кг.

16. На сколько градусов Цельсия нагреется вода, падая с высоты 120 м, если 70 % ее механической энергии пойдет на нагревание. Удельная теплоемкость воды $4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

1. $0,2^\circ\text{C}$;
2. 275°C ;
3. 20°C ;
4. 2°C .

17. При уменьшении объема одноатомного газа в три раза его давление увеличилась в четыре раза. Во сколько раз увеличилась внутренняя энергия газа?

1. 1,33;
2. 0,75;
3. 12;
4. 4.

18. Одноатомный идеальный газ в количестве 10,0 молей изобарно нагревается на $10,0^\circ\text{C}$. Определите количество теплоты, переданное газу.

1. 1250 Дж;
2. 580 кДж;
3. 4170 Дж;
4. 2080 Дж.

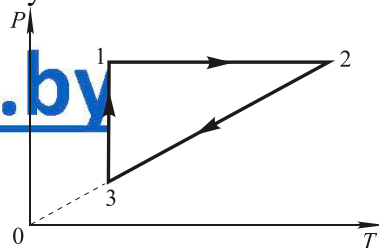
19. Определите удельную теплоемкость латуни, если для нагревания латунного бруска массой 200 г на $4,5^\circ\text{C}$ потребовалось количество теплоты 330 Дж.

1. 0,059
2. 5,9 Дж/(кг·K);
3. 367 Дж·K/кг;
4. 367 Дж/(кг·K).

20. При изобарном расширении 46 г кислорода от температуры 300 К его объем увеличился в 1,5 раза. Определите работу газа. Молярная масса кислорода 32 г/моль.

1. 5,4 кДж;
2. 1,8 кДж;
3. 540 кДж;
4. 2,8 кДж.

21. Идеальный газ совершает замкнутый процесс, изображенный на рисунке. На каком этапе процесса газ получил тепло?



1. $1 \rightarrow 2$;
2. $2 \rightarrow 3$;
3. $3 \rightarrow 1$;
4. $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$.

22. Температура нагревателя идеального теплового двигателя равна 227°C , а холодильника 27°C . От нагревателя взято количество теплоты 15 МДж. Какая работа совершена двигателем?

1. 13 МДж;
2. 6 МДж;
3. 9 МДж;
4. 2 МДж.

23. Смешивают 1 кг воды, имеющей температуру 20°C , и 2 кг воды при температуре 80°C . Определите температуру воды после установления теплового равновесия.

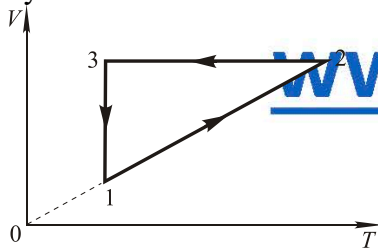
www.repet.by

1. 40°C ; 2. 50°C ;
3. 60°C ; 4. 80°C .

24. Изобарное нагревание 40 г гелия от 280 К проводили до тех пор, пока его объем не увеличился в 3 раза. Вычислите количество теплоты, переданное газу. Молярная масса гелия 4 г/моль.

1. 70 кДж; 2. 140 кДж;
3. 232 кДж; 4. 116 кДж.

25. Идеальный газ совершает замкнутый процесс, изображенный на рисунке. На каких этапах процесса газ получает тепло?



1. 1 → 2;
2. 2 → 3;

3. 3 → 1;
4. 1 → 2 → 3.

26. В идеальном тепловом двигателе газ отдает холодильнику 75% теплоты, полученной от нагревателя. Найдите температуру холодильника, если температура нагревателя 127°C .

1. 100 К; 2. 27°C ;
3. 95°C ; 4. 32°C .

27. Грузовой автомобиль массой 7,5 т при торможении остановился через 40 с после начала торможения. Какое количество теплоты выделилось при торможении, если модуль ускорения автомобиля 50 см/с^2 .

1. 3,0 МДж; 2. 15 МДж;
3. 1,5 МДж; 4. 30 МДж.

www.repet.by

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1	1	3	1	4	2	4	1	2
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4	2	2	4	1	1	4	4	2
21	22	23	24	25	26	27			
1	2	3	4	1	2	3			

www.repet.by

www.repet.by

www.repet.by