

## Внутренняя энергия

ЗАДАЧА 1. («Курчатов», 2017, 11) Электронагреватель с сопротивлением 90 Ом помещён в баллон, в котором находится одноатомный идеальный газ под давлением  $3 \cdot 10^4$  Па. Электронагреватель на 5 минут подключают к источнику постоянного напряжения с ЭДС 100 В и внутренним сопротивлением 10 Ом, после чего давление в баллоне становится равным  $6 \cdot 10^4$  Па. Определите объём баллона. Газ не обменивается теплотой с окружающей средой.

1r 09

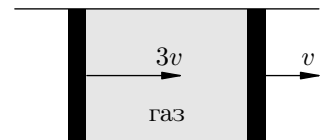
ЗАДАЧА 2. В двух теплоизолированных сосудах с объёмами  $V_1$  и  $V_2$  находятся одинаковые газы при давлениях  $p_1$  и  $p_2$  и температурах  $T_1$  и  $T_2$ . Найдите температуру, которая установится в сосудах после смешивания газов.

$$\frac{\nu_L \varepsilon_{\Lambda}^{\varepsilon d} + \varepsilon_L \nu_{\Lambda}^{\nu d}}{\varepsilon_{\Lambda}^{\varepsilon d} + \nu_{\Lambda}^{\nu d}} \varepsilon_L \nu_L = J$$

ЗАДАЧА 3. (МФТИ, 2004) В закреплённой длинной гладкой горизонтальной трубе расположены два поршня с массами  $m_1$  и  $m_2$ , между которыми в объёме  $V_0$  при давлении  $p_0$  находятся  $\nu$  молей идеального одноатомного газа, масса которого много меньше массы поршней. Наружное давление на поршни пренебрежимо мало. Первоначально удерживаемые поршни отпускают, и к некоторому моменту времени температура газа между поршнями становится равной  $T_1$ . Определить скорости поршней в этот момент времени, полагая, что газ между поршнями всё время остаётся равновесным. Теплопроводностью и теплоёмкостью поршней и трубы пренебречь.

$$\frac{(\varepsilon u + \nu u) \varepsilon u}{\nu_{\Lambda} \nu^{\nu-0} \varepsilon} \Lambda = \varepsilon a, \quad \frac{(\varepsilon u + \nu u) \nu u}{\nu_{\Lambda} \nu^{\nu-0} \varepsilon} \Lambda = \nu a$$

ЗАДАЧА 4. (МФТИ, 2004) В закреплённой длинной гладкой горизонтальной трубе между двумя поршнями массой  $m$  каждый находятся  $\nu$  молей идеального одноатомного газа. Наружное давление на поршни пренебрежимо мало. В начальный момент температура газа равна  $T_0$ , а скорости поршней направлены в одну сторону и равны  $3v$  и  $v$  (см. рисунок). В дальнейшем в некоторый момент времени один из поршней остановился. Полагая, что газ между поршнями всё время остаётся равновесным, определите температуру газа в этот момент. Масса газа мала по сравнению с массой поршней. Теплопроводностью и теплоёмкостью поршней и трубы пренебречь.

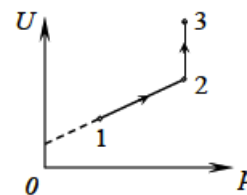


$$\frac{\nu a}{\varepsilon^{\nu} \nu^{\nu}} - 0L = J$$

ЗАДАЧА 5. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) Горизонтальный теплоизолированный сосуд цилиндрической формы массой  $m$  закрыт с торцов и перегороден подвижным поршнем массой  $M \gg m$ . Сосуд и поршень покоятся, с обеих сторон от поршня находится по  $\nu = 1$  молю идеального одноатомного газа. Сосуду коротким ударом сообщают скорость  $v$ , направленную вдоль оси сосуда. На какую величину  $\Delta T$  изменится температура газа после затуханий колебаний поршня? Трение между поршнем и стенками сосуда, теплоёмкость поршня и стенок не учитывать. Масса газа  $m_g \ll M$ . Универсальная газовая постоянная  $R$ .

$$\frac{\nu a g}{\varepsilon^{\nu} \nu^{\nu}} = J \nabla$$

Задача 6. (МОШ, 2017, 10) Внутренняя энергия и давление идеального одноатомного газа изменялись в соответствии с приведённым графиком. Определите, увеличивалась или уменьшалась плотность газа на участках 1–2 и 2–3.



Увеличивалась; уменьшалась

Задача 7. (МФТИ, 1998) Воздух состоит в основном из азота и кислорода. Концентрация молекул азота при этом в  $\alpha = 4$  раза больше концентрации молекул кислорода. Чему равна суммарная кинетическая энергия вращения всех молекул азота, содержащегося в комнате объёмом  $V = 60 \text{ м}^3$ ? Атмосферное давление  $p = 10^5 \text{ Па}$ .

Указание. Внутренняя энергия моля двухатомного газа равна  $\frac{5}{2}RT$  ( $R$  — газовая постоянная,  $T$  — температура), она возрастает по сравнению с энергией одноатомного газа за счёт кинетической энергии вращения молекул.

$$E = \frac{5}{2} p V \alpha = 4,8 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Задача 8. (МФТИ, 2001) Температура гелия в процессе  $pV^2 = \text{const}$  увеличивается в  $k = 1,5$  раза ( $p$  — давление газа,  $V$  — его объём). При этом внутренняя энергия газа изменилась на  $\Delta U = 300 \text{ Дж}$ . Найти:

- 1) минимальное давление  $p_{\min}$ ;
- 2) начальный объём газа  $V_1$ .

Максимальное давление, которое было у газа в этом процессе, составило  $p_{\max} = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

$$p_{\min} = \frac{\Delta U}{\frac{5}{2} V_1} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad V_1 = \frac{\Delta U}{\frac{5}{2} p_{\min}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Задача 9. (МФТИ, 2001) Температура гелия уменьшается в  $k = 2$  раза в процессе  $p^2V = \text{const}$  ( $p$  — давление,  $V$  — объём газа). Найти:

- 1) начальный объём газа  $V_1$ ;
- 2) изменение его внутренней энергии в процессе охлаждения.

Начальное давление газа  $p_1 = 10 \text{ Па}$ , а минимальный объём, который он занимал в процессе охлаждения, составил  $V_{\min} = 1 \text{ л}$ .

$$V_1 = \frac{V_{\min}}{k^2} = \frac{1}{4} \text{ л} = 0,25 \text{ л}; \quad \Delta U = \frac{5}{2} p_1^2 V_1 \left( \frac{1}{k^2} - 1 \right) = -1,25 \text{ Дж}$$

Задача 10. (МФТИ, 2005) В вертикально расположенном цилиндрическом сосуде под поршнем находится моль гелия при температуре  $T_1 = 300 \text{ К}$ . На поршень поставили гирию массой, равной массе поршня.

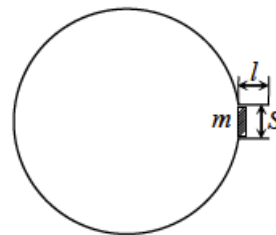
1) Во сколько раз изменился объём газа после установления нового положения равновесия в условиях отсутствия теплообмена газа с окружающей средой?

2) Какую работу должен совершить газ, чтобы в изобарическом процессе при наличии теплообмена вернуться в состояние с первоначальным объёмом?

Наружным давлением, трением между цилиндром и поршнем, теплоёмкостью поршня и цилиндра пренебречь.

$$V_2 = 2V_1 = 2 \text{ л}; \quad A = p(V_2 - V_1) = 10^5 \text{ Па} \cdot 1 \text{ л} = 10^2 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 11. (МОШ, 2016, 10) В колбе объемом  $V = 2$  л при комнатной температуре находится  $\nu = 0,1$  моля гелия. Горлышко колбы имеет длину  $l = 2$  см и сечение  $S = 10$  см<sup>2</sup>. Это горлышко закрыто цилиндрической пробкой массой  $m = 10$  г, могущей скользить по нему без трения. В начальный момент пробка удерживается у основания горлышка, и гелий не выходит наружу. Пробку отпускают, и она вылетает из горлышка со скоростью  $v = 10$  м/с. Найдите изменение  $\Delta T$  температуры гелия в колбе к моменту вылета пробки из горлышка. Давление воздуха в комнате равно  $p_0 = 1$  атм, теплообменом гелия в колбе с окружающими телами за время вылета пробки можно пренебречь.



$$\Delta T \approx \frac{\nu \mu \epsilon}{15^{0.4} \nu + \epsilon^{0.4} \nu} = \nu \Delta T$$

ЗАДАЧА 12. («Росатом», 2013, 10) Теплоизолированный сосуд заполнен одноатомным идеальным газом. Со временем половина атомов газа соединилась в двухатомные молекулы. При образовании двухатомной молекулы выделяется энергия  $E$ . Найти новую температуру в сосуде, если начальная температура равна  $T$ . При рассматриваемых температурах внутренняя энергия одного моля двухатомного газа равна  $\frac{5}{2}RT$ . Объем газа не менялся.

$$\left(\frac{\nu}{2} + \nu\right) \frac{11}{2} = \nu \mathcal{L}$$

ЗАДАЧА 13. («Росатом», 2012, 10) В вертикальном цилиндрическом сосуде под массивным поршнем находится одноатомный идеальный газ при температуре  $T_0$ , при этом поршень находится в равновесии. Температуру газа в сосуде мгновенно увеличивают в два раза. Какая температура установится в сосуде после того, как поршень перестанет двигаться? Теплоемкостью поршня и сосуда пренебречь, теплотери отсутствуют.

$$0 \mathcal{L} \frac{\epsilon}{8} = \nu \mathcal{L}$$

ЗАДАЧА 14. («Росатом», 2011, 11) В запаянном вертикальном цилиндрическом сосуде под массивным поршнем массой  $m$  находится одноатомный идеальный газ при температуре  $T$ . Над поршнем вакуум. Из-за неплотных контактов поршня со стенками газ медленно просачивается в верхнюю часть сосуда. Пренебрегая теплоемкостью поршня и сосуда, а также теплотерями, найти температуру газа, когда поршень опустится на дно сосуда.

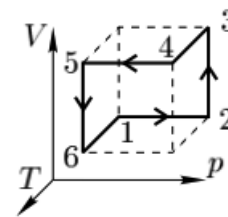


$$\mathcal{L} \frac{\epsilon}{8} = \nu \mathcal{L}$$

ЗАДАЧА 15. («Покори Воробьевы горы!», 2018, 10–11) Вертикальный цилиндрический теплоизолирующий гладкий сосуд разделён на две части лёгким горизонтальным поршнем. В нижней части сосуда находится гелий с температурой  $t_1 = 15$  °С, а верхняя часть вакуумирована, и в ней находится невесомая вертикальная пружина в недеформированном состоянии. Поршень удерживается в этом положении. Затем его отпускают. После установления равновесия оказалось, что объём, занятый гелием, увеличился на 50%. Найти новую температуру гелия.

$$1 \mathcal{L} 6'0 = \nu \mathcal{L}$$

ЗАДАЧА 16. (Всеросс., 2009, РЭ, 11) Над одноатомным идеальным газом производят сложный процесс, показанный на рисунке, который состоит из шести простых процессов. У точки 1 координаты  $(p, V, T)$ , а у точки 4 —  $(3p, 3V, 3T)$ . График каждого из простых процессов параллелен одной из координатных осей.



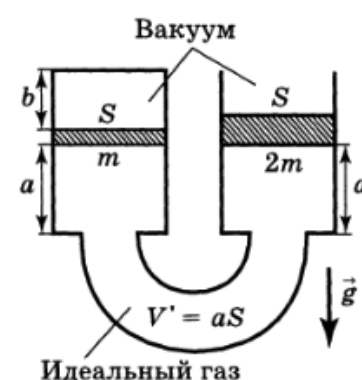
- 1) Среди простых процессов найдите все изотермические.
- 2) Определите в них изменение внутренней энергии газа.
- 3) Найдите все процессы, изменение внутренней энергии в которых равно нулю.

$$\int_1^2 p \, dV = \int_2^3 p \, dV = \int_3^4 p \, dV = \int_4^5 p \, dV = \int_5^6 p \, dV = \int_6^1 p \, dV$$

ЗАДАЧА 17. (Всеросс., 1996, ОЭ, 10) Горизонтально расположенный закрытый с обеих сторон цилиндр разделён поршнем на две равные части. Поршень может свободно (без трения) перемещаться. В первоначальном состоянии в обеих частях цилиндра находилось по одному молю одноатомного идеального газа при одинаковой температуре  $T_0$ . Разделяющий поршень может проводить тепло, причем тепловой поток через него линейно зависит от разности температур его стенок:  $q_{12} = \alpha(T_1 - T_2)$ . Одну часть цилиндра начинают нагревать, при этом газ получает тепло со скоростью  $q$ , а через время  $\tau$  с такой же скоростью начинают отбирать тепло от газа из другой части цилиндра. Определите коэффициент теплопроводности  $\alpha$ , если известно, что в стационарном состоянии (при  $t \gg \tau$ ) отношение объёмов разных частей цилиндра равно 2.

$$\frac{9R}{2} = \frac{2(3V_1 T_1 + p_1 V_1)}{9R} = \frac{2(3V_2 T_2 + p_2 V_2)}{9R}$$

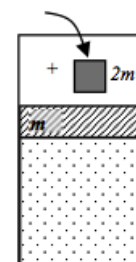
ЗАДАЧА 18. (Всеросс., 1997, ОЭ, 10) В двух вертикальных сообщающихся цилиндрах (рис.) под поршнями массами  $2m$  и  $m$  находится один моль идеального одноатомного газа. Над поршнями — вакуум. На рисунке показаны геометрические размеры:  $S$  — площадь поршня,  $V'$  — объём трубы, соединяющей сосуды. Поршень  $2m$  закреплён, а поршень  $m$  свободен. Затем поршень  $2m$  освобождают. Оба поршня начинают перемещаться без трения. Удар поршня  $m$  о верхнюю крышку цилиндра происходит абсолютно упруго. Найдите максимально большое отношение  $T_k/T_0$ , которого можно достигнуть, изменяя расстояние  $b$  ( $T_k$  — конечная равновесная температура газа, а  $T_0$  — начальная). Принять, что стенки цилиндров и поршни теплом с газом не обмениваются.



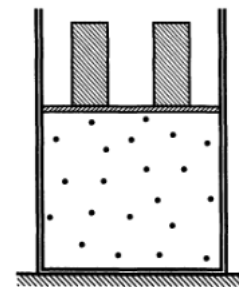
$$\frac{T_k}{T_0}$$

ЗАДАЧА 19. (Всеросс., 2018, ШЭ, 11) В вертикальном теплоизолированном цилиндре под тяжёлым подвижным поршнем находится одноатомный идеальный газ, занимающий объём  $V$ . На поршень ставят груз, имеющий массу вдвое большую, чем масса поршня. Найдите объём газа в новом положении равновесия. Давлением над поршнем и трением поршня о стенки цилиндра можно пренебречь.

$$A_{\text{г}} = A$$

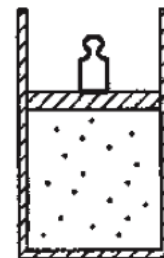


ЗАДАЧА 20. (Всеросс., 1992, ОЭ, 11) В теплоизолированном цилиндре, поршень которого удерживается в неподвижном состоянии двумя одинаковыми гирями (рис.), находится 1 моль одноатомного идеального газа. Начальная температура газа равна  $T_0$ . Давление воздуха вне цилиндра равно нулю. Как изменится температура газа, если одну из гирь снять, а затем через некоторое время поставить обратно? Поршень может скользить в цилиндре без трения.



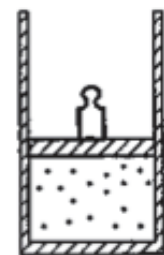
$$0L \frac{qz}{8z} = L$$

ЗАДАЧА 21. (Всеросс., 2005, финал, 10) В цилиндре с теплонепроницаемыми стенками под массивным теплонепроницаемым поршнем находится идеальный одноатомный газ. На поршень поставили гирию, масса которой равна массе поршня (рис.). После того как система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, гирию быстро сняли и вновь дождались наступления равновесного состояния. Определите, какая температура  $T$  газа установится в цилиндре после четырёх таких циклов, если первоначальная температура равнялась  $T_0 = 300$  К. Считайте, что трение между поршнем и стенками цилиндра пренебрежимо мало. Внешним давлением можно пренебречь.



$$K \approx 472 \text{ K} \left( \frac{25}{28} \right)^4 T_0 = L$$

ЗАДАЧА 22. (Всеросс., 2005, финал, 11) В состоянии равновесия идеальный двухатомный газ занимает ровно половину объёма теплоизолированного сосуда с массивным теплоизолированным поршнем. На поршень поставили гирию (рис.). Когда система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, оказалось, что давление газа возросло на 25%. Затем гирию быстро сняли и вновь дождались наступления равновесного состояния. Сколько таких циклов  $n$  установки и снятия гири можно совершить, пока поршень не вылетит из цилиндра при очередном удалении гири? Считайте, что трение между поршнем и стенками цилиндра пренебрежимо мало. Внешним давлением можно пренебречь.



$$89 = \left[ \frac{86}{66} \ln \frac{m}{2} \right] \geq u$$

ЗАДАЧА 23. («Росатом», 2018, 11) В вертикальном цилиндрическом сосуде площадью сечения  $S$  и длиной  $h$  находится очень лёгкий подвижный поршень, к которому с помощью длинного стержня прикреплена лёгкая чашка. В отсеках, на которые поршень делит сосуд, находится по одному молю идеального одноатомного газа под давлением  $p_0$ , а поршень в равновесии делит сосуд на равные части. На чашку кладут тело массой  $m$ , и поршень после нескольких колебаний приходит в новое положение равновесия. Найти смещение поршня относительно первоначального положения. Сосуд теплоизолирован, поршень хорошо проводит тепло, теплоёмкостью поршня и сосуда пренебречь. Каким будет смещение поршня при  $m \rightarrow \infty$  и почему?



$$\frac{q}{\varepsilon} \Lambda \leftarrow x \nabla : \left( \varepsilon - \frac{(S^0 d)}{b u u} \right) \varepsilon \Gamma + 6 \Lambda \left( \frac{b u u \varepsilon}{1 S^0 d} \right) = x \nabla$$