

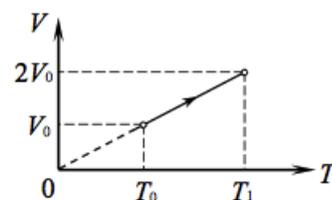
Первый закон термодинамики

Содержание

1	Всероссийская олимпиада школьников по физике	1
2	Московская олимпиада школьников по физике	8
3	МФТИ и «Физтех»	11
4	«Покори Воробьёвы горы!»	18
5	«Росатом»	19
6	«Курчатов»	20
7	APhO	20

1 Всероссийская олимпиада школьников по физике

ЗАДАЧА 1. (Всеросс., 2020, ШЭ, 11) Над одним молем идеального одноатомного газа проводят процесс, показанный на рисунке. Начальная температура газа $T_0 = 200$ К. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).



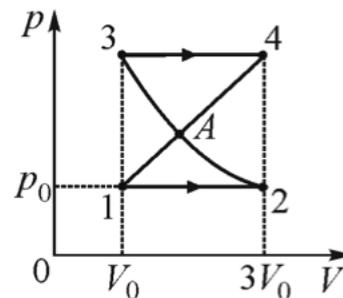
1. Чему равна температура T_1 ? Ответ укажите в градусах Кельвина, округлив до целого числа.
2. Найдите работу, совершённую газом в этом процессе. Ответ укажите в кДж, округлив до десятых долей.
3. Найдите количество теплоты, полученное газом в этом процессе. Ответ укажите в кДж, округлив до десятых долей.

1) 400; 2) 1,7; 3) 4,2

ЗАДАЧА 2. (Всеросс., 2019, МЭ, 11) При нагревании трёх молей гелия давление p газа изменялось прямо пропорционально его объёму V ($p = \alpha V$, где α — некоторая неизвестная константа). На сколько градусов поднялась температура гелия, если газу передали количество теплоты $Q = 300$ Дж?

$\Delta T = \frac{3Q}{2\nu R} \approx 6,9$ К

ЗАДАЧА 3. (Всеросс., 2014, МЭ, 11) Над идеальным одноатомным газом проводят процесс, изображённый на рисунке. Участки 1–2 и 3–4 — изобары, участок 2–3 — изотерма, а участок 1–4 — прямая. Точки 1 и 3, а также 2 и 4 лежат на одной изохоре. Начальный объём газа $V_0 = 1$ л, начальное давление $p_0 = 10^5$ Па, а максимальный объём за весь процесс равен $3V_0$. Найдите полученное газом на участке 1–4 количество теплоты, теплоёмкость одного моля газа в процессе 1–4, а также координаты точки A самопересечения на pV -диаграмме. Универсальная газовая постоянная $R = 8,3$ Дж/(моль · К).

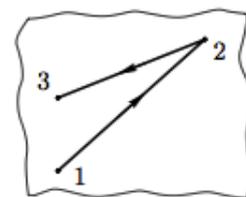


$$Q_{14} = \nu C_{p,m} \Delta T_{14} = \nu C_{p,m} (p_0 \cdot 3V_0 - p_0 V_0) = 2\nu R \Delta T_{14} = 2\nu R (3V_0 - V_0) p_0 = 4\nu R p_0 V_0 = 4\nu R p_0 V_0 = 4\nu R p_0 V_0 = 4\nu R p_0 V_0$$

ЗАДАЧА 4. (Всеросс., 2012, РЭ, 10) Для нагревания 100 г некоторого газа на 4°C в процессе с прямой пропорциональной зависимостью давления от объёма требуется тепла на 831 Дж больше, чем для такого же нагревания при постоянном объёме. Что это за газ?

Решение

ЗАДАЧА 5. (Всеросс., 2011, РЭ, 10) Говорят, что в архиве лорда Кельвина нашли рукопись, на которой был изображён процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, совершённый над одним молем гелия (см. рисунок). От времени чернила выцвели, и стало невозможно разглядеть, где находятся оси p (давления) и V (объёма).

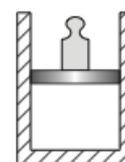


Однако из текста следовало, что состояния 1 и 3 лежат на одной изохоре, соответствующей объёму V_1 . Кроме того, было сказано, что количество теплоты, подведённое к газу в процессе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, равно нулю.

Определите объём V_2 .

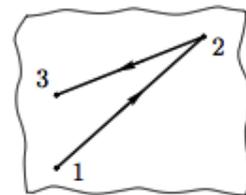
$$V_2 = 2V_1$$

ЗАДАЧА 6. (Всеросс., 2007, ОЭ, 10) Гелий в количестве ν молей находится в теплоизолированном вертикальном сосуде под поршнем, на котором стоит гиря, масса которой в α раз больше массы поршня (рис.). Над поршнем вакуум. Если к гелию медленно подвести теплоту Q , объём гелия увеличится на такую же величину, как если бы вместо подведения тепла гирю быстро сняли. Найдите изменение ΔT_2 температуры гелия во втором процессе. Гелий можно считать идеальным газом.



$$\Delta T_2 = \frac{Q}{\nu C_{v,m} (1 + \alpha)}$$

ЗАДАЧА 7. (Всеросс., 2011, РЭ, 11) Говорят, что в архиве лорда Кельвина нашли рукопись, на которой был изображён процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, совершённый над одним молем азота (см. рисунок). От времени чернила выцвели, и стало невозможно разглядеть, где находятся оси p (давления) и V (объёма). Однако из текста следовало, что состояния 1 и 3 лежат на одной изохоре, а также то, что в процессах $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$ объём газа изменяется на ΔV . Кроме того, было сказано, что количество теплоты, подведённой в процессе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ к N_2 , равно нулю.



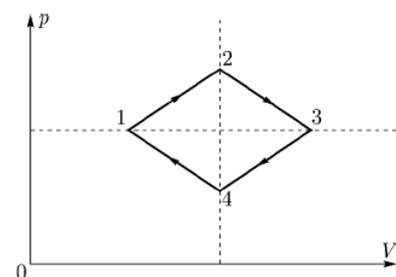
Определите, на каком расстоянии (в единицах объёма) от оси p (давлений) находится изохора, проходящая через точки 1 и 3.

$$\Delta \nabla \frac{Q}{T} = \frac{1}{A}$$

ЗАДАЧА 8. (Всеросс., 1996, ОЭ, 11) В вертикально расположенном цилиндре под поршнем находится идеальный газ. Сила трения цилиндра при перемещении поршня превышает сумму его веса и силы внешнего атмосферного давления на поршень. Газ начинают медленно нагревать, причём за время расширения газ получил количество теплоты Q как за счёт нагрева, так и за счёт части выделившегося тепла при трении поршня. Затем газ охладили, отобрав от него такое же количество теплоты Q . Во сколько раз изменилось давление газа в цилиндре за время от начала расширения до завершения охлаждения газа, если его объём за то же время увеличился в два раза?

$$\text{Уменьшилось в } 6 \text{ раз}$$

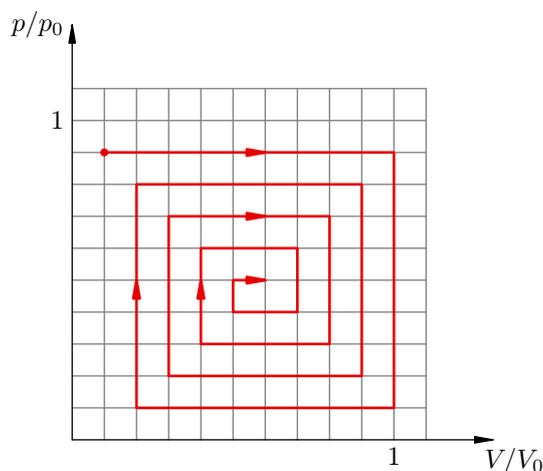
ЗАДАЧА 9. (Всеросс., 2016, РЭ, 11) Циклический процесс, совершаемый над идеальным газом, на (p, V) -плоскости представляет собой ромб (см. качественный рисунок). Вершины (1) и (3) лежат на одной изобаре, а вершины (2) и (4) — на одной изохоре. За цикл газ совершил работу A .



Насколько отличается количество теплоты Q_{12} , подведённое к газу на участке 1–2, от количества теплоты $|Q_{34}|$, отведённой от газа на участке 3–4?

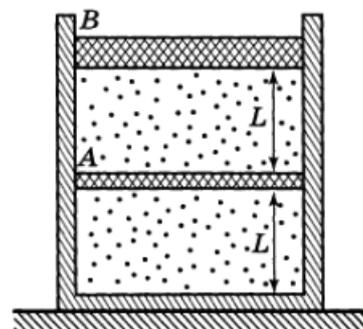
$$\frac{7}{4} A/2$$

ЗАДАЧА 10. (Всеросс., 2010, РЭ, 11) Над одним молем метана (CH_4) совершается процесс, график которого изображён на рисунке. Перенесите график процесса в тетрадь и выделите на нём участки, на которых к газу подводится теплота. Какое количество теплоты было подведено к газу в этом процессе? Величины p_0 и V_0 считать известными.



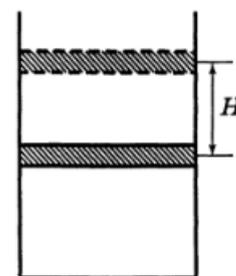
$$Q_{10d81'6} = Q$$

ЗАДАЧА 11. (Всеросс., 1993, ОЭ, 11) Лёгкий теплопроводящий поршень A и тяжёлый теплонепроводящий поршень B делят вертикально расположенный цилиндр на два отсека (рис.). Высота каждого отсека $L = 40$ см, и в каждом из них находится 1 моль идеального одноатомного газа. Первоначально система находится в тепловом равновесии. Затем газ медленно нагревают, сообщая ему количество теплоты $Q = 200$ Дж. Определите наименьшую силу трения между поршнем A и стенками сосуда, при которой поршень A ещё останется неподвижным. Поршень B может перемещаться без трения.



$$H_{21} = \frac{7V}{8} = J$$

ЗАДАЧА 12. (Межреспубл., 1992, финал, 10) В вертикальном сосуде под тяжёлым поршнем и при температуре окружающей среды находится воздух (рис.). Поршень медленно смещают из положения равновесия, поднимая его на высоту H . Затем дожидаются, пока температура воздуха в сосуде снова станет равной температуре окружающей среды. После этого сосуд теплоизолируют и поршень отпускают. На какое расстояние опустится поршень к тому времени, когда его колебания прекратятся? Теплоёмкостями сосуда и поршня можно пренебречь. Давление воздуха снаружи считать малым.



$$H_{\frac{1}{6}} = \frac{\Delta Q}{H} + 1 = \eta$$

ЗАДАЧА 13. (Всеросс., 2002, ОЭ, 10) Вещества X , Y и Z могут участвовать в следующей химической реакции:

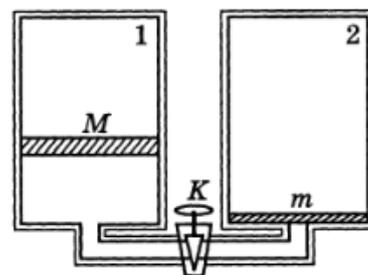


Температуры плавления и кипения этих веществ таковы, что $T_x^{\text{пл}} < T_y^{\text{пл}} < T_z^{\text{пл}} = 10^\circ\text{C}$, $T_x^{\text{кип}} > T_y^{\text{кип}} > T_z^{\text{кип}} = 190^\circ\text{C}$. В первом опыте вещества X и Y , взятые при температуре $T_z^{\text{пл}}$, поместили в герметичный теплоизолированный сосуд. Через некоторое время в сосуде осталось только вещество Z , причем половина его была в твёрдом состоянии, а половина — в жидком. Во втором опыте вещества X и Y снова поместили в герметичный теплоизолированный сосуд, но на этот раз при температуре $T_z^{\text{кип}}$. Через некоторое время в сосуде осталось только вещество Z , причём одна половина его была в жидком состоянии, а другая — в газообразном. Найдите молярную теплоёмкость вещества Z в жидком состоянии. Молярные теплоёмкости веществ X и Y в жидком состоянии $C_x = 55$ кДж/(кмоль · К), $C_y = 80$ кДж/(кмоль · К); для вещества Z молярная теплота плавления $\lambda_z = 5$ МДж/кмоль, теплота парообразования $r_z = 40$ МДж/кмоль.

Примечание. Считать, что теплоёмкости веществ не зависят от температуры. Давление в сосуде в обоих опытах поддерживалось постоянным и одинаковым.

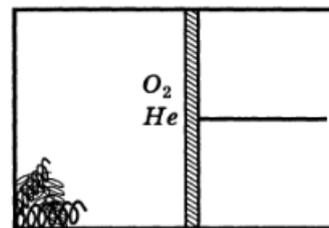
$$C_z = 3C_x + 2C_y + \lambda_z + r_z = 200 \text{ кДж/кмоль}$$

ЗАДАЧА 14. (Всеросс., 1993, финал, 10) Два одинаковых теплоизолированных сосуда соединены друг с другом тонкой короткой теплоизолированной трубкой с краном K , закрытым в начальный момент (рис.). В первом сосуде под поршнем, масса которого равна M , при температуре T_0 находится идеальный одноатомный газ, молярная масса которого равна μ . Во втором сосуде газа нет, и поршень, масса которого равна $m = M/2$, лежит на дне сосуда. Объём между поршнем и верхней крышкой в каждом сосуде вакуумирован. Кран открывают, газ из первого сосуда устремляется под поршень второго, и тот начинает подниматься вверх. Вычислите температуру газа после установления равновесия в сосудах. При равновесии между поршнем и крышкой во втором сосуде остается свободное пространство. Можно считать, что $\nu\mu/M = 0,1$, где ν — число молей газа. Трением можно пренебречь.



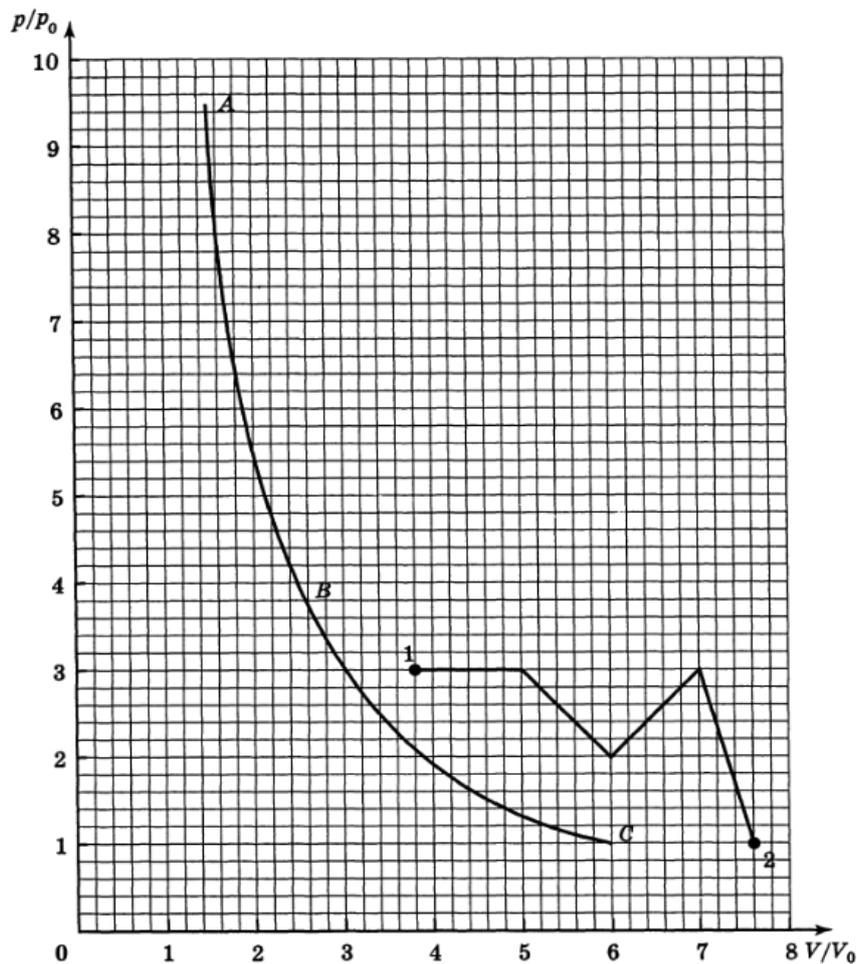
$$0,1L86^\circ = \frac{\frac{\nu\mu}{M} + 1}{\frac{\nu\mu}{M} + 1} 0L = L$$

ЗАДАЧА 15. (Всеросс., 1997, финал, 10) В горизонтально расположенном цилиндре под поршнем, который может перемещаться без трения, находится смесь из 75% кислорода и 25% гелия по массе (рис.). В результате окисления железной стружки, находящейся в цилиндре, весь кислород вступил в реакцию с железом, при этом образовалось 2 моля твердого оксида Fe_2O_3 и через стенки цилиндра выделилось количество теплоты $Q = 1,642$ МДж. Во время процесса окисления в цилиндре поддерживалась постоянная температура 25°C , а внешнее давление было равно нормальному атмосферному давлению. На сколько процентов значение Q больше, чем модуль изменения внутренней энергии системы (т. е. вещества внутри цилиндра)? Во сколько раз изменилась плотность газа в цилиндре?



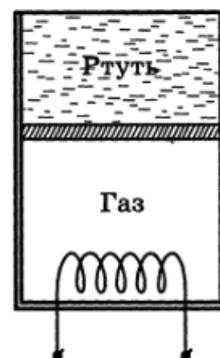
$$Q = 0,45\% \frac{Q}{L} = \frac{11}{32}$$

ЗАДАЧА 20. (Всеросс., 2000, финал, 10–11) Кривая ABC (рис.) является адиабатой для некоторого вещества, у которого внутренняя энергия зависит от произведения pV , т. е. $U = U(pV)$. Найдите полное количество теплоты, которое тело получило в процессе 1–2, изображённом на рисунке.



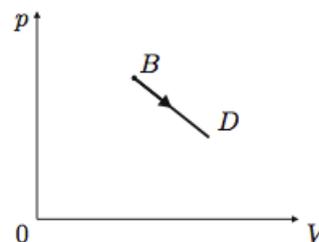
$$Q_{12} = \int_1^2 p dV = \int_1^2 p_0 \frac{V_0}{V} dV = p_0 V_0 \ln \frac{V_2}{V_1} = 10 \cdot 1 \cdot \ln \frac{7.5}{4} \approx 2.5 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 21. (Всеросс., 1998, ОЭ, 11) В теплоизолированном цилиндре, расположенном вертикально, под невесомым не проводящим тепло свободно перемещающимся поршнем находится $\nu = 1$ моль идеального одноатомного газа при температуре $T_1 = 300$ К (рис.). Сверху над поршнем находится ртуть, заполняющая цилиндр до открытого верхнего края. Объём газа в два раза больше объёма ртути, давление в газе вдвое превышает внешнее атмосферное давление. Система находится в состоянии равновесия. Какое минимальное количество теплоты нужно подвести к газу, чтобы вытеснить из сосуда всю ртуть?



$$Q_{\min} = \nu R T_1 \ln 2 = 1 \cdot 8.31 \cdot 300 \cdot \ln 2 \approx 1720 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 22. (Всеросс., 2012, финал, 11) Один моль идеального многоатомного газа переводят из состояния B , в котором температура равна $t_B = 217^\circ\text{C}$, в состояние D так, что давление линейно зависит от объёма, температура монотонно убывает, а к газу на протяжении всего процесса подводят тепло (рис.). Найдите максимально возможную работу A_m , которую может совершить этот газ в таком процессе.



$$A_m \approx 1.8 \text{ Дж} = 1.8 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 23. (Всеросс., 2015, финал, 11) В середине длинной трубки, открытой с обоих концов, перпендикулярно к её оси закреплён нагреватель в виде тонкой вольфрамовой сеточки. Система находится в воздухе при температуре $t = 20^\circ\text{C}$, её общая масса $M = 17$ г. В начальный момент трубке сообщается скорость $v_0 = 1$ см/с вдоль её оси, к нагревателю начинает подводиться мощность $q = 20$ Вт, и трубка начинает разгоняться. Какой скорости достигнет трубка на пути разгона $S = 20$ м? Сопротивлением воздуха пренебрегите. Давление внутри трубки считайте одинаковым, силу тяжести и теплообмен через стенку трубки не учитывайте. Считайте, что изменение кинетической энергии потока воздуха при пересечении сеточки мало по сравнению с изменением его внутренней энергии. Считайте воздух двухатомным газом с молярной массой $\mu = 29$ г/моль.

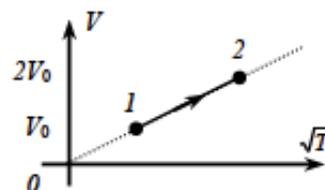
$$v \approx 1.5 \text{ м/с} = 1.5 \text{ м/с}$$

2 Московская олимпиада школьников по физике

ЗАДАЧА 24. (МОШ, 2018, 11) Над одним молем идеального одноатомного газа проводят процесс $p = \alpha V$, где $\alpha = 273$ Па/м³. При этом оказалось, что сумма увеличения ΔU внутренней энергии газа и полученной теплоты Q равна $\Delta U + Q = 70$ Дж. Найдите Q .

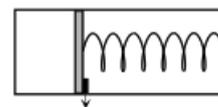
$$Q = 40 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 25. (МОШ, 2017, 11) Один моль гелия нагревают в процессе, показанном на диаграмме (V — объём, T — абсолютная температура), увеличивая его объём в два раза. Найдите работу, совершённую газом, и подведённое к нему количество теплоты, если начальная температура гелия $T_0 = 300$ К.



$$A \approx 1.5 \text{ Дж} = 1.5 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 26. (МОШ, 2019, 11) В теплоизолированном цилиндре слева от поршня находится один моль идеального одноатомного газа, справа — вакуум. В начальный момент поршень закреплён и пружина недеформирована. Затем поршень отпускают, и газ занимает объём, вдвое больший первоначального. Во сколько раз изменятся температура и давление газа в новом состоянии равновесия? Теплоёмкостями поршня и цилиндра пренебречь.



$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{2}, \frac{p}{p_0} = \frac{1}{2}$$

ЗАДАЧА 27. (МОШ, 2019, 11) Девочка шла по улице зимой с воздушным шариком, надутым гелием. Температура воздуха на улице была равна $t_1 = -13^\circ\text{C}$, а шарик имел при этом объём $V_1 = 5$ л. Девочка пришла домой, где температура воздуха равна $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Гелий — одноатомный газ, который в данной задаче можно считать идеальным. Атмосферное давление равно 1 атм. Упругостью оболочки можно пренебречь.

1. Какой объём примет шарик? Ответ выразите в литрах и округлите до сотых.
2. Какое количество теплоты получит гелий из окружающей среды? Ответ выразите в Дж и округлите до целых.

$$A_{\text{max}} = 120 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 28. (МОШ, 2008, 10) Порция гелия объёмом $V_0 = 1$ л находится под давлением $p_0 = 1$ атм при температуре 0°C . Гелий расширяют в равновесном процессе таким образом, что отданное им в окружающую среду количество теплоты Q в четыре раза меньше совершенной гелием работы A . Найдите максимально возможное значение работы A газа в таком процессе.

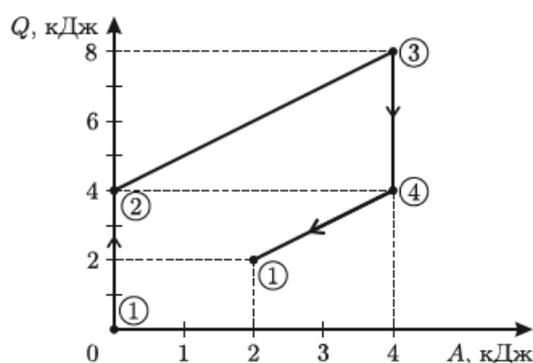
$$A_{\text{max}} = 120 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 29. (МОШ, 2018, 10) В цилиндрическом сосуде с площадью основания S находится ν молей идеального одноатомного газа, отделённого от окружающей среды невесомым поршнем. Коэффициент трения между поршнем и стенками сосуда равен μ . В начальном состоянии газ имеет объём V_0 , температуру T_0 и давление, равное давлению окружающей среды. При медленном нагревании газа поршень начинает смещаться, когда температура газа возрастает до значения $1,2T_0$. После достижения температуры $2T_0$ нагрев прекращают, и газ остывает до исходной температуры T_0 . Найдите

- 1) конечный объём газа;
- 2) количество теплоты, которое было подведено к газу в процессе его нагревания;
- 3) модуль силы реакции, действующей со стороны стенок сосуда на поршень.

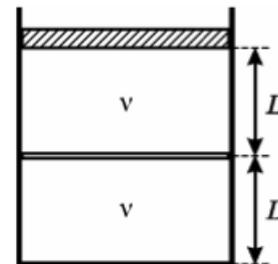
$$\frac{Q}{S} = N \left(\frac{Q}{S} \right) = \dots$$

ЗАДАЧА 30. (МОШ, 2009, 10) На рисунке изображён график циклического равновесного процесса, проводимого над одним молем идеального одноатомного газа. По горизонтали отложена работа, совершенная газом с момента начала процесса, по вертикали — количество теплоты, полученное газом. Изобразите график процесса в (pV) -координатах и определите отношение максимальной температуры газа к его минимальной температуре.



$$\tau = \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{min}}}$$

Задача 31. (МОШ, 2007, 10) На столе стоит вертикальный теплоизолированный цилиндрический сосуд. В него вставлены два поршня (см. рисунок). Верхний поршень — тяжёлый, теплонепроницаемый и может двигаться в цилиндре без трения. Нижний поршень — лёгкий и теплопроводящий, но между ним и стенками сосуда существует трение. В каждой из частей сосуда находится по ν молей идеального одноатомного газа. Вначале система находилась в тепловом равновесии, а обе части сосуда имели высоту L . Потом систему медленно нагрели, сообщив ей количество теплоты ΔQ . На какую величину ΔT изменилась температура газов, если нижний поршень при этом не сдвинулся с места? При каком наименьшем значении F силы трения между нижним поршнем и стенками это возможно? Какова теплоёмкость C системы в этом процессе? Теплоёмкостью стенок сосуда и поршней пренебречь.



$$\Delta T = C \frac{\Delta Q}{\nu} = \frac{5}{2} \nu R \Delta T = \Delta Q$$

Задача 32. (МОШ, 2017, 11) В цилиндрическом теплоизолированном сосуде объёмом $V = 33,6 \text{ дм}^3$ под поршнем находится $\nu = 2,0$ моль гелия при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$. В сосуд добавляют ещё $m = 4,0 \text{ г}$ гелия при температуре $T_2 = 500 \text{ К}$, и после выравнивания температур содержимое адиабатически сжимают, совершая над ним работу $A = 2,0 \text{ кДж}$. Какая температура T установится в сосуде в конечном состоянии? Найдите давление в сосуде перед началом адиабатического сжатия. $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

$$T = \left(\frac{5}{2} \nu R T_1 + \frac{5}{2} \nu R T_2 + A \right) \frac{2}{5} = 420 \text{ К}$$

Задача 33. (МОШ, 2017, 11) В горизонтальной трубе сечением S , закрытой с торцов, находится одноатомный газ, разделённый на две части теплонепроницаемым поршнем, который может свободно перемещаться в трубе. Начальное давление газа равно p . На сколько сместится поршень, если через левый торец к газу подвести количество теплоты Q , а через правый — такое же количество теплоты отвести? Боковые стенки теплоту не пропускают. Процесс считать квазистатическим.

$$\frac{dQ}{dx} = x$$

Задача 34. (МОШ, 2014, 11) В вертикальном цилиндре находится под невесомым поршнем один моль идеального одноатомного газа. Цилиндр располагается в вакууме. На поршне находится груз массой 16 кг . Газу сообщили количество теплоты 100 Дж . Универсальная газовая постоянная $8,3 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Ускорение свободного падения составляет 10 м/с^2 .

А) На какую высоту поднялся груз? Ответ представьте в сантиметрах и округлите до целых.

В) На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Ответ представьте в джоулях и округлите до целых.

С) На сколько изменилась температура газа? Ответ представьте в кельвинах и округлите до десятых.

$$\text{A) } 25; \text{ B) } 60; \text{ C) } 4,8$$

3 МФТИ и «Физтех»

ЗАДАЧА 35. (МФТИ, 2006) Средняя молярная масса некоторой смеси идеальных газов равна $\mu = 50$ г/моль. С порцией смеси провели циклический процесс 1–2–3–1, состоящий из изотермического расширения 1–2, изобарического сжатия 2–3 до начального объёма и изохорического нагревания 3–1 до первоначальной температуры. Оказалось, что в процессе 2–3–1 от газа отвели $Q = 1$ кДж тепла, а разность максимальной и минимальной температур в цикле составила $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. Найдите массу порции.

$$\mu = 50 \text{ г/моль} = m$$

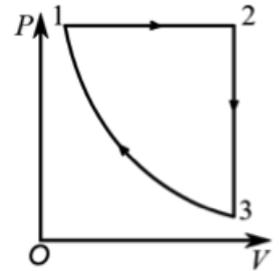
ЗАДАЧА 36. («Физтех», 2021, 10) У идеального одноатомного газа в некотором процессе давление увеличилось на 2%, а объём уменьшился на 1%. В этом процессе относительные изменения давления, объёма и температуры считать намного меньше единицы.

1. Как и на сколько процентов изменилась температура газа?
2. Найти в этом процессе отношение полученной газом теплоты к работе газа.

$$\frac{\Delta T}{T} = 2\% ; \frac{\Delta V}{V} = 1\% ; \frac{\Delta P}{P} = 2\%$$

ЗАДАЧА 37. («Физтех», 2018, 10) Одноатомный идеальный газ расширяется в изобарическом процессе 1–2, затем охлаждается в изохорическом процессе 2–3 и сжимается в адиабатическом процессе 3–1 (см. рис.). Отношение работы над газом A_{31} ($A_{31} > 0$) в процессе 3–1 к количеству теплоты Q_{12} , полученной газом в процессе 1–2, равно

$$\frac{A_{31}}{Q_{12}} = \frac{9}{140}.$$

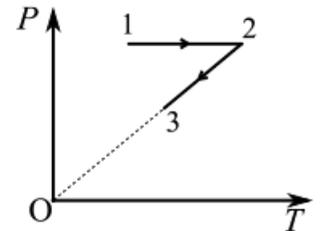


В процессе расширения объём газа увеличивается в 8 раз.

- 1) Найти отношение температур T_1/T_3 в состояниях 1 и 3.
- 2) Найти отношение количества теплоты Q_{12} , подведённой к газу в процессе 1–2, к количеству теплоты Q_{23} ($Q_{23} > 0$), отведённой от газа в процессе 2–3.

$$\frac{Q_{23}}{Q_{12}} = 4 ; \frac{T_1}{T_3} = \frac{93}{140}$$

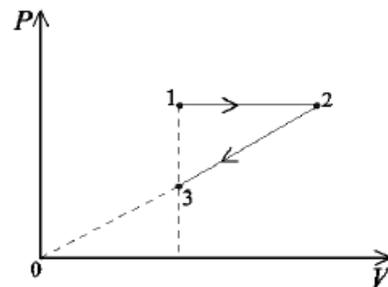
ЗАДАЧА 38. («Физтех», 2017, 10) На диаграмме зависимости давления P газа от температуры T для гелия в количестве $\nu = 3/2$ моль показано, что сначала газ нагревался в изобарном процессе 1–2, а затем охлаждался в процессе 2–3 прямо пропорциональной зависимости давления от температуры. Температуры газа в состояниях 1, 2 и 3 $T_1 = 150$ К, $T_2 = 3T_1$, $T_3 = 2T_1$. Отношение давлений в состояниях 1 и 3 равно $3/2$.



- 1) Найти работу газа в процессе 1–2–3.
- 2) Найти отношение количества теплоты, подведённого к газу в процессе 1–2, к количеству теплоты, отведённому от газа в процессе 2–3.

$$A = 3740 \text{ Дж} ; \frac{Q_{23}}{Q_{12}} = 10/3$$

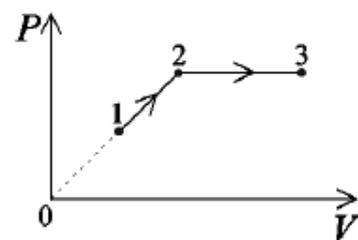
ЗАДАЧА 43. («Физтех», 2016, 10–11) Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 в изобарическом процессе 1–2, а затем сжимается в процессе 2–3 с прямо пропорциональной зависимостью давления p от объёма V , возвращаясь к начальному объёму (см. рисунок). Отношение объёмов $V_2/V_1 = 2$.



- 1) Найти температуры в состояниях 2 и 3.
- 2) Найти работу, совершённую газом в процессе 1–2–3.
- 3) Найти суммарное количество теплоты, полученное газом в процессе 1–2–3.

$$\nu R \ln 2 = \nu C_p \ln 2 + \nu C_v \ln 2 = \nu C_p \ln 2 + \nu C_v \ln 2 = \nu C_p \ln 2 + \nu C_v \ln 2 \quad (1)$$

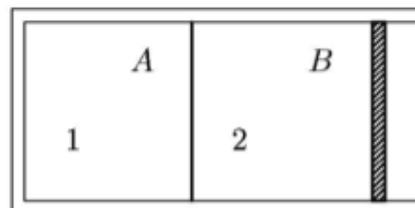
ЗАДАЧА 44. («Физтех», 2016, 11) Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 процессе 1–2 с прямо пропорциональной зависимостью давления p от объёма V , а затем в изобарическом процессе 2–3 (см. рисунок). Отношение объёмов $V_2/V_1 = V_3/V_2 = 3/2$.



- 1) Найти температуры в состояниях 2 и 3.
- 2) Найти работу, совершённую газом в процессе 1–2–3.
- 3) Найти суммарное количество теплоты, полученное газом в процессе 1–2–3.

$$\nu R \ln \frac{3}{2} = \nu C_p \ln \frac{3}{2} + \nu C_v \ln \frac{3}{2} = \nu C_p \ln \frac{3}{2} + \nu C_v \ln \frac{3}{2} = \nu C_p \ln \frac{3}{2} + \nu C_v \ln \frac{3}{2} \quad (1)$$

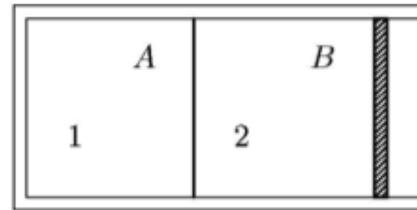
ЗАДАЧА 45. («Физтех», 2015, 10) Неподвижная теплопроводящая перегородка A делит объём теплоизолированного цилиндра на два отсека, в которых находится по ν моль гелия. Во втором отсеке газ удерживается подвижным теплоизолированным поршнем B . Наружное атмосферное давление равно p_0 . В начальном состоянии температура гелия в первом отсеке равна T_1 , что больше температуры во втором отсеке. В результате медленного процесса теплообмена через перегородку температура в отсеках начинает выравниваться, а поршень перемещается. По окончании процесса теплообмена в отсеках устанавливается температура T_0 . Трением поршня о цилиндр, теплоёмкостью стенок цилиндра и поршня пренебречь.



- 1) Найдите начальную температуру во втором отсеке.
- 2) Найдите изменение объёма гелия во втором отсеке.

$$\nu C_p \ln \frac{T_0}{T_1} + \nu C_v \ln \frac{T_0}{T_1} = \nu C_p \ln \frac{T_0}{T_1} + \nu C_v \ln \frac{T_0}{T_1} = \nu C_p \ln \frac{T_0}{T_1} + \nu C_v \ln \frac{T_0}{T_1} \quad (1)$$

ЗАДАЧА 46. («Физтех», 2015, 11) Неподвижная теплопроводящая перегородка A делит объём теплоизолированного цилиндра на два отсека, в которых находится по ν моль гелия. Во втором отсеке газ удерживается подвижным теплоизолированным поршнем B . Наружное атмосферное давление равно p_0 . В начальном состоянии температура гелия в первом отсеке больше, чем во втором. В результате медленного процесса теплообмена через перегородку температура в отсеках начинает выравниваться, а поршень перемещается. По окончании процесса теплообмена объём гелия во втором отсеке увеличивается на ΔV . Трением поршня о цилиндр, теплоёмкостью стенок цилиндра и поршня пренебречь.



1) Найдите отношение модулей изменения температуры в первом и втором отсеках после окончания теплообмена.

2) Найдите изменение температуры в первом отсеке.

$$\frac{\nu \alpha}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\nu} = \nu \Delta T \left(\alpha \frac{\Delta T}{\nu} = \frac{\nu \Delta T}{|\Delta V|} \right) \quad (1)$$

ЗАДАЧА 47. (МФТИ, 2007) Идеальный одноатомный газ совершает циклический процесс, состоящий из адиабатического расширения, изобарического расширения и изотермического сжатия. Какую работу совершил газ в адиабатическом процессе, если в изобарическом процессе газ получил $Q = 50$ Дж тепла?

$$A_{23} = \nu \frac{5}{2} A = 30 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 48. (МФТИ, 2007) Идеальный одноатомный газ совершает циклический процесс, состоящий из изобарического расширения, адиабатического расширения и изотермического сжатия. Какую работу совершил газ в адиабатическом процессе, если в изобарическом процессе была совершена работа $A = 20$ Дж?

$$A_{23} = \nu \frac{5}{2} A = 30 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 49. («Физтех», 2010) Газообразный гелий из начального состояния 1 расширяется в изобарическом процессе 1–2, а затем продолжает расширяться в адиабатическом процессе 2–3. Температуры в состояниях 1 и 3 равны. Найдите работу, совершённую газом в изобарическом процессе, если в адиабатическом процессе газ совершил работу $A = 750$ Дж.

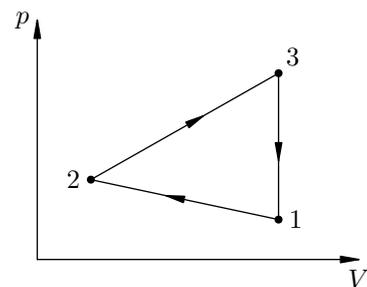
$$A_{12} = \nu \frac{3}{2} A = 500 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 50. («Физтех», 2010) Газообразный гелий из начального состояния 1 сжимают в изобарическом процессе 1–2, а затем газ продолжают сжимать в адиабатическом процессе 2–3. Температуры в состояниях 1 и 3 равны. Найдите работу, совершённую над газом в адиабатическом процессе, если в изобарическом процессе от газа пришлось отвести $Q = 1500$ Дж тепла.

$$A_{23} = \nu \frac{5}{2} Q = 1500 \text{ Дж}$$

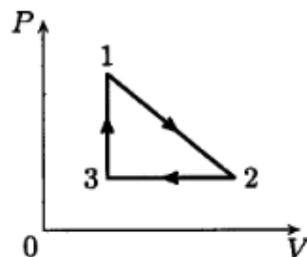
ЗАДАЧА 51. («Физтех», 2008) С газообразным гелием проводится циклический процесс, состоящий из процессов 1–2 и 2–3 с линейной зависимостью давления от объёма и изохоры 3–1 (см. рисунок). Найти отношение объёмов в состояниях 1 и 2, если в цикле 1–2–3–1 газ совершил работу $A = 400$ Дж, а в изохорическом процессе 3–1 от газа отвели количество теплоты $Q = 1800$ Дж.

$$\varepsilon = \frac{V\varepsilon - \partial}{\partial} = \frac{\varepsilon_A}{V_A}$$



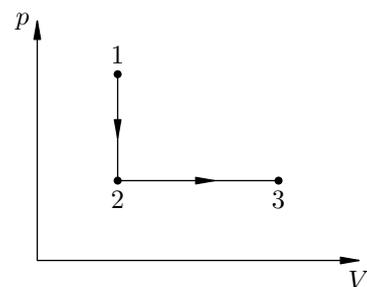
ЗАДАЧА 52. («Физтех», 2008) С газообразным гелием проводится циклический процесс, состоящий из процесса 1–2 с линейной зависимостью давления от объёма, изобарического сжатия 2–3 и изохорического нагревания 3–1 (см. рисунок). Известно, что объём в состоянии 2 в три раза больше, чем в состоянии 1. Найдите отношение работы газа в цикле 1–2–3–1 к количеству теплоты, подведённой к газу в изохорическом процессе 3–1.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1\varepsilon\partial}{V}$$

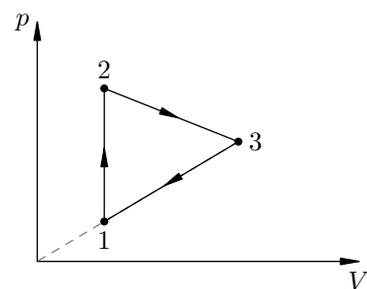


ЗАДАЧА 53. (МФТИ, 1994) Один моль одноатомного идеального газа переводится из состояния 1 в состояние 3 путём изохорического охлаждения 1–2, а затем изобарического нагрева 2–3 (см. рисунок). На участке 1–2 температура газа уменьшается на $\Delta T = 100$ К, а в процессе 1–2–3 газ получает суммарное (алгебраическая сумма) количество теплоты $Q = 1870$ Дж. Какую по величине работу совершил газ в процессе изобарического нагрева?

$$A = \int p dV = \int p \nu \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \partial \frac{\varepsilon}{\varepsilon} = V$$



ЗАДАЧА 54. (МФТИ, 1996) Цикл для ν молей гелия состоит из двух участков линейной зависимости давления p от объёма V и изохоры (см. рисунок). В изохорическом 1–2 процессе газу сообщили количество теплоты Q , и его температура увеличилась в 4 раза. Температуры в состояниях 2 и 3 равны. Точки 1 и 3 на диаграмме pV лежат на прямой, проходящей через начало координат.

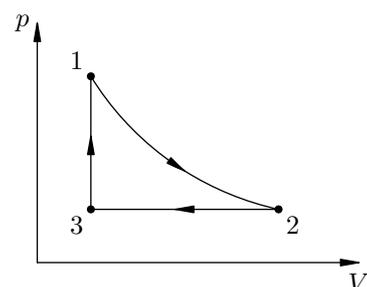


- 1) Найти температуру T_1 в точке 1.
- 2) Найти работу газа за цикл.

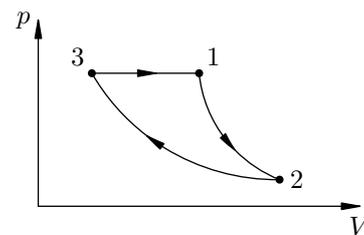
$$\frac{\varepsilon}{\partial} = V \left(\frac{\nu \nu}{\partial^2} = L \right)$$

ЗАДАЧА 55. (МФТИ, 1998) Найти величину работы A , которую совершает моль гелия в замкнутом цикле, состоящем из адиабатического процесса 1–2, изобары 2–3 и изохоры 3–1 (см. рисунок). В адиабатическом процессе разность максимальной и минимальной температур газа равна ΔT . В изобарическом процессе от газа отвели количество тепла Q .

$$A = \frac{\partial \varepsilon}{\partial} - \int p \nu \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = V$$

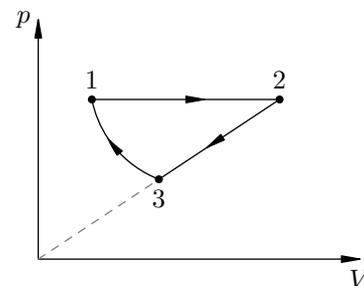


Задача 56. (МФТИ, 1998) Моль гелия совершает работу величиной A в замкнутом цикле (см. рисунок), состоящем из адиабаты 1–2, изотермы 2–3 и изобары 3–1. Найти величину работы, совершённой в изотермическом процессе, если разность максимальной и минимальной температур газа в цикле равна ΔT .



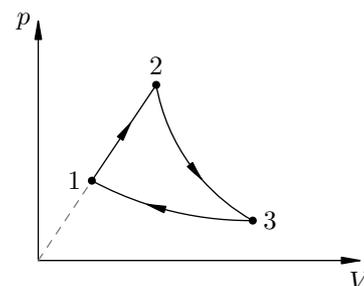
$$A_{23} = \frac{2}{5} A$$

Задача 57. (МФТИ, 2000) Газообразный гелий находится в цилиндре под подвижным поршнем. Газ нагревают при постоянном давлении, переводя его из состояния 1 в состояние 2 (см. рисунок). При этом газ совершает работу A_{12} . Затем газ сжимается в процессе 2–3, когда его давление p прямо пропорционально объёму V . При этом над газом совершается работа A_{23} ($A_{23} > 0$). Наконец, газ сжимается в адиабатическом процессе 3–1, возвращаясь в первоначальное состояние. Найти работу сжатия A_{31} , совершённую над газом в адиабатическом процессе.



$$A_{31} = 3A_{23} - A_{12}$$

Задача 58. (МФТИ, 2000) Газообразный гелий находится в цилиндре под подвижным поршнем. Газ расширяется в процессе 1–2, когда его давление p прямо пропорционально объёму V (см. рисунок). Затем газ расширяется в адиабатическом процессе 2–3, совершая работу A_{23} . Наконец, газ сжимается в изотермическом процессе 3–1, при этом от него отводится количество теплоты Q_{31} ($Q_{31} > 0$). Какую работу совершил газ во всём замкнутом цикле 1–2–3–1?



$$A = Q_{31} - \frac{5}{4} A_{23}$$

Задача 59. (МФТИ, 1992) Равные массы гелия He и водорода H₂ находятся в теплоизолированном цилиндре под поршнем. Объём цилиндра $V_0 = 1$ л, давление в нём $p_0 = 9$ атм. При адиабатическом расширении смесь газов совершает работу $A = 650$ Дж. Найти относительное изменение температуры смеси. Внутренняя энергия моля гелия равна $\frac{3}{2}RT$, водорода — $\frac{5}{2}RT$ (T — абсолютная температура, R — газовая постоянная). Молярные массы гелия и водорода равны соответственно $\mu_1 = 4$ г/моль и $\mu_2 = 2$ г/моль.

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{0.104}{V} \frac{2n_1 + 1n_2}{(2n_1 + 1n_2) \frac{5}{2}} = \frac{0.1}{V}$$

Задача 60. (МФТИ, 1992) В цилиндре под давлением $p = 2$ атм находится смесь гелия He и водорода H₂. Изобарический нагрев смеси газов приводит к увеличению объёма цилиндра на $\Delta V = 1$ л. На сколько изменилась при этом внутренняя энергия смеси газов? Масса водорода в 1,5 раза больше массы гелия. Внутренняя энергия моля гелия равна $\frac{3}{2}RT$, водорода — $\frac{5}{2}RT$ (T — абсолютная температура, R — газовая постоянная). Молярные массы гелия и водорода равны соответственно $\mu_1 = 4$ г/моль и $\mu_2 = 2$ г/моль.

$$\Delta U = \Delta \left(\frac{3}{2} n_1 R T + \frac{5}{2} n_2 R T \right) \approx 460 \text{ Дж}$$

Задача 61. (МФТИ, 1992) В сосуде объёмом $V = 1$ л находится смесь гелия He и водорода H_2 . При изохорическом нагреве смеси к ней подвели количество теплоты $Q = 220$ Дж. При этом давление в сосуде возросло на $\Delta p = 1$ атм. Найти отношение числа молей водорода к числу молей гелия в сосуде. Внутренняя энергия моля гелия равна $\frac{3}{2}RT$, а водорода — $\frac{5}{2}RT$, где T — абсолютная температура, R — газовая постоянная.

$$\frac{\varepsilon}{V} = \frac{\partial \varepsilon - d \nabla \Lambda \varepsilon}{d \nabla \Lambda \varepsilon - \partial \varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}$$

Задача 62. (МФТИ, 2005) В вертикально расположенном цилиндрическом сосуде под поршнем находится моль гелия при температуре $T_1 = 300$ К. На поршне стоит гиря массой, равной массе поршня. Гирию снимают.

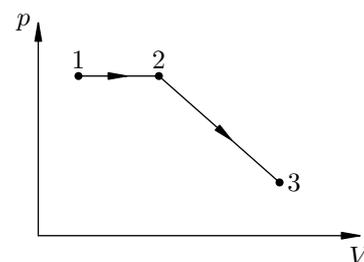
1) Во сколько раз изменится температура газа после установления нового положения равновесия в условиях отсутствия теплообмена газа с окружающей средой?

2) Какое количество теплоты необходимо подвести к газу в изобарическом процессе, чтобы вернуть газ в состояние с первоначальной температурой?

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

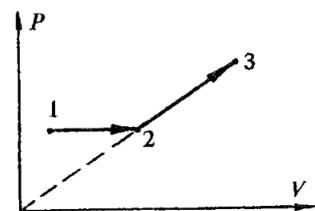
$$\text{ж} \text{Д} \text{к} \text{с} \text{т} \approx 1,25 \text{ кДж} \quad \text{1) } \Delta T \approx 1,25 T_1 \quad \text{2) } Q \approx 1,25 RT_1$$

Задача 63. (МФТИ, 1991) Моль идеального одноатомного газа из начального состояния 1 расширяется сначала изобарически, а затем в процессе с линейной зависимостью давления от объёма (см. рисунок). Известно, что $V_3/V_2 = V_2/V_1$ и $T_2 = T_3$. Найти отношение V_2/V_1 , если количество теплоты, подведённое к газу на участке 1–2, в два раза больше величины работы, совершённой газом на участке 2–3.



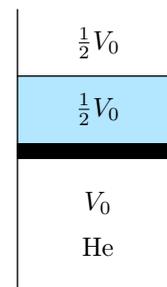
$$\frac{3}{2} \varepsilon$$

Задача 64. (МФТИ, 1991) Моль идеального одноатомного газа расширяется сначала изобарически, а затем в процессе с линейной зависимостью давления от объёма (см. рисунок). Известно, что $V_2/V_1 = V_3/V_2$, а прямая 2–3 проходит через начало координат. Найти отношение объёмов V_2/V_1 , если количество теплоты Q_{12} , подведённое к газу на участке 1–2, в четыре раза меньше величины работы A_{23} , совершённой газом на участке 2–3.



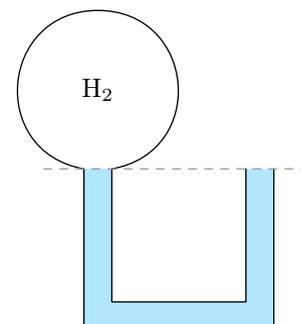
$$4$$

Задача 65. (МФТИ, 2004) В вертикально расположенной, открытой с одного конца в атмосферу трубке лёгкий теплонепроницаемый поршень отделяет гелий He от жидкости, налитой поверх поршня (см. рисунок). Объёмы, занятые в трубке гелием, жидкостью и атмосферным воздухом, равны соответственно V_0 , $V_0/2$, $V_0/2$. Атмосферное давление $p_0 = 10^5$ Па, $V_0 = 0,5$ л. Добавочное давление, создаваемое столбом жидкости, первоначально налитой в трубку, равно $p_0/8$. Гелий медленно нагревают, и поршень, медленно двигаясь, вытесняет всю жидкость из трубки. Какое количество теплоты получил гелий к моменту, когда вся жидкость вытекла из трубки? Трением поршня о трубку пренебречь.



$$Q_{23} \approx \frac{1}{2} p_0 V_0 = 0,25 \text{ Дж}$$

Задача 66. (МФТИ, 2004) U-образная трубка состоит из трёх одинаковых колен, расположена вертикально и заполнена жидкостью. Один конец трубки соединён с баллоном, заполненным водородом, другой конец трубки открыт в атмосферу (см. рисунок). Водород в баллоне медленно нагревают, и он медленно вытесняет жидкость из трубки. К моменту, когда из трубки вылилось $2/3$ всей массы жидкости, водород получил количество теплоты $Q = 30$ Дж. Найти объём баллона, заполненного вначале водородом. Известно, что объём всей трубки равен объёму баллона. Атмосферное давление $p_0 = 10^5$ Па, а добавочное давление, создаваемое столбом жидкости в вертикальном колене трубки, равно $p_0/9$.



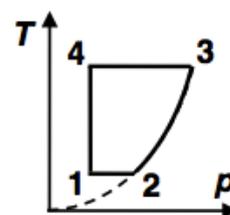
$$Q_{23} \approx \frac{1}{2} p_0 V_0 = 0,25 \text{ Дж}$$

4 «Покори Воробьёвы горы!»

Задача 67. («Покори Воробьёвы горы!», 2015, 10–11) Некоторое количество азота охлаждают так, что его давление меняется пропорционально его объёму. Затем его нагревают при постоянном объёме до начальной температуры. Найдите отношение количества теплоты, отданного газом, к количеству теплоты, полученному им. Азот при рассматриваемых температурах можно считать идеальным газом.

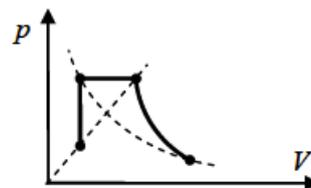
$$\frac{Q_{23}}{Q_{12}}$$

Задача 68. («Покори Воробьёвы горы!», 2019, 10–11) Постоянное количество неона участвует в циклическом процессе, диаграмма которого в координатах «давление — температура» показана на рисунке. Процессы 1 – 2 и 3 – 4 — изотермические, при изобарном сжатии над газом совершают работу $A = 2,5$ кДж. Диаграмма процесса 2 – 3 — участок параболы, проходящей через начало координат. Найти количество теплоты, подведенное к газу в процессе 2 – 3.



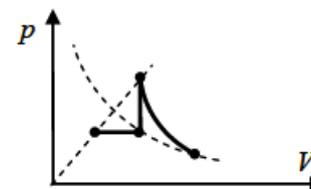
$$Q_{23} = 2A = 5 \text{ кДж}$$

ЗАДАЧА 69. («Покори Воробьёвы горы!», 2016, 10–11) Постоянное количество идеального газа участвует в процессе, диаграмма которого показана на рисунке в координатах давление–объём. Известно, что при изохорном нагревании газ получает количество теплоты, равное $Q = 60$ кДж, а после изобарного расширения температура газа становится в $n = 9$ раз больше наименьшей (для всего процесса). Найдите работу газа при адиабатическом расширении. Линии, показанные пунктиром — прямая, проходящая через начало координат, и изотерма.



$$\mu \gamma \ln 181 = \frac{u}{\gamma} \Delta \varnothing = \nu \varepsilon_V$$

ЗАДАЧА 70. («Покори Воробьёвы горы!», 2016, 10–11) Постоянное количество идеального газа участвует в процессе, диаграмма которого показана на рисунке в координатах давление–объём. Известно, что при изобарном нагревании газ получает количество теплоты, равное $Q = 75$ кДж, а в ходе изохорного нагревания температура газа увеличивается в $n = 2$ раза. Найдите работу газа при адиабатическом расширении. Линии, показанные пунктиром — прямая, проходящая через начало координат, и изотерма.



$$\Delta u \frac{\gamma+1}{\gamma} = \nu \varepsilon_V$$

ЗАДАЧА 71. («Покори Воробьёвы горы!», 2016, 10–11) Давление одного моля одноатомного идеального газа изохорически изменили от начального до некоторого значения. Затем изобарически уменьшили объём газа в $n = 3$ раза. После этого газ изохорически перевели в конечное состояние. Зная, что температура газа в конечном состоянии в $k = 1,2$ раза превышает его температуру в начальном состоянии и что полное количество теплоты, которым обменялся газ с внешними телами, равно нулю, найти отношение максимального давления газа к минимальному в этом процессе.

$$8 = \frac{(1-\gamma)\varepsilon}{(1-\gamma)\frac{2}{3}k(n-1)} = \frac{\mu \ln p_{\max}}{\mu \ln p_{\min}}$$

5 «Росатом»

ЗАДАЧА 72. («Росатом», 2012, 11) ν молей одноатомного идеального газа, имеющего абсолютную температуру T , сначала охлаждаются изохорически так, что давление газа уменьшается в 2 раза. Затем газ нагревается изобарически до температуры, в 3 раза превосходящей первоначальную. Определить количество тепла, полученное газом во всем этом процессе.

$$\mu \gamma \ln \frac{\gamma}{1-\gamma} = \Delta \varnothing$$

6 «Курчатов»

ЗАДАЧА 73. («Курчатов», 2016, 11) Один моль жидкой воды при температуре $t_1 = 0^\circ\text{C}$ находится в длинном горизонтальном цилиндре, закрытом поршнем. Эту воду можно перевести в пар при температуре $t_2 = 100^\circ\text{C}$ двумя путями. Первый путь: сначала этому количеству воды предоставляют при 0°C такой объём, что вся вода переходит в пар, то есть проводят изотермическое расширение, а затем проводят изохорный процесс, при котором водяной пар нагревают до 100°C . Второй путь: сначала проводят изохорное нагревание воды до 100°C , а затем изотермически увеличивают объём до тех пор, пока вся вода не превратится в пар. Найдите количества теплоты, которые нужно подвести к воде в первом и во втором случае.

При решении задачи можно считать, что молярная теплота испарения воды при атмосферном давлении равна $L = 40,7$ кДж/моль и не зависит от температуры. Молярная теплоёмкость жидкой воды $C = 75,7$ Дж/(моль · К). Давление насыщенного пара воды при 0°C равно $p_1 = 0,6$ кПа, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$Q_1 = 47,4 \text{ кДж}; Q_2 = 48,3 \text{ кДж}$$

ЗАДАЧА 74. («Курчатов», 2019, 11) Длинный горизонтальный цилиндр с одной стороны наглухо закрыт, а с другой открыт в окружающую среду. В цилиндре может двигаться без трения тяжёлый поршень. Между поршнем и закрытым торцом цилиндра находится идеальный одноатомный газ, занимающий объём $V_0 = 1,5$ л при внешнем давлении P_0 . Внешнее давление мгновенно уменьшают до значения $P_1 = (1 - \alpha)P_0$, где $\alpha = 0,2$, и поддерживают его постоянным до полной остановки поршня и перехода газа в новое состояние равновесия с давлением P_1 . Далее внешнее давление скачком увеличивают до начального значения P_0 и поддерживают его постоянным до перехода газа в конечное равновесное состояние, в котором газ занимает некоторый объём V_K при давлении P_0 . Считая, что стенки цилиндра и поршень не проводят тепло, найдите разность объёмов $\Delta V = V_K - V_0$. Числовой ответ выразите в кубических сантиметрах.

$$\Delta V = \frac{(\alpha-1)V_0}{2} = 18 \text{ см}^3$$

7 APhO

ЗАДАЧА 75. (APhO, 2006)¹ Лёгкий подвижный поршень разделяет теплоизолированный сосуд на две части. В одной находится $m_1 = 3$ г водорода при температуре $T_{10} = 300$ К, а в другой — $m_2 = 16$ г кислорода при температуре $T_{20} = 400$ К. Молярные массы водорода и кислорода равны $\mu_1 = 2$ кг/кмоль и $\mu_2 = 32$ кг/кмоль, $R = 8,31$ Дж/(моль · К). Поршень слабо проводит тепло, и температура в сосуде постепенно выравнивается; все процессы происходят квазистатически.

- 1) Чему равна равновесная температура T системы?
- 2) Чему равно отношение конечного давления p_f к начальному давлению p_i ?
- 3) Чему равно количество теплоты Q , которое отдаст кислород водороду к моменту, когда поршень перестанет двигаться?

$$Q = (n_2 - n_1) L = \frac{m_2}{\mu_2} L - \frac{m_1}{\mu_1} L = \frac{16}{32} L - \frac{3}{2} L = -\frac{1}{2} L = -16,5 \text{ Дж}$$

¹Третье задание на APhO-2006 состояло из четырёх независимых задач, и это — одна из них.