

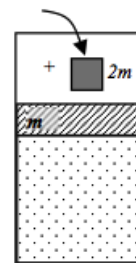
Первый закон термодинамики

Содержание

1	Всероссийская олимпиада школьников по физике	1
2	Московская олимпиада школьников по физике	8
3	МФТИ и «Физтех»	10
4	«Покори Воробьёвы горы!»	18
5	«Росатом»	19
6	«Курчатов»	19

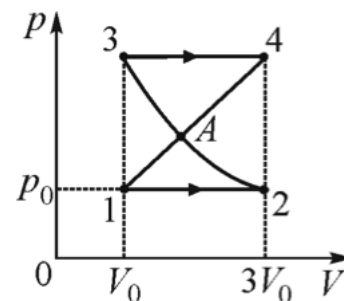
1 Всероссийская олимпиада школьников по физике

ЗАДАЧА 1. (*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.



$$\Delta \frac{q}{\tau} = \Delta$$

ЗАДАЧА 2. (*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).



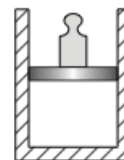
$$Q_{14} = \int_{V_0}^{3V_0} p \, dV = \int_{V_0}^{3V_0} \left(p_0 + \frac{p_3 - p_0}{2V_0} V \right) dV = p_0 V_0 + \frac{p_3 - p_0}{4} V_0 = 1,73 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 3. (*Всеросс., 2004, ОЭ, 10*) Для описания некоторых систем используется модель идеального бозе-газа. При температурах ниже определённой (называемой температурой бозе-эйнштейновской конденсации) внутренняя энергия моля такого газа определяется выражением $U = \frac{3}{2} AVT^{5/2}$, а давление не зависит от объёма и равно $p = AT^{5/2}$, где A — некоторая константа. В этих условиях над газом совершают такой процесс расширения, что $T V^\lambda = \text{const}$, где λ — заданное число. Поглощается или отдается теплота газом в этом процессе?

Примечание. При $\mu x \ll 1$ справедлива формула $(1 + x)^\mu = 1 + \mu x$.

$$\Delta p \left(\frac{\tau}{V^\lambda} - 1 \right) \tau / \tau LV \frac{\tau}{\tau} = \partial q$$

ЗАДАЧА 4. (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.

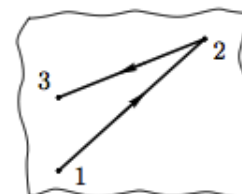


$$\frac{\nu \alpha (1 + \alpha) g l}{\partial p} = \tau L \Delta V$$

ЗАДАЧА 5. (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?

Вопрос

ЗАДАЧА 6. (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).

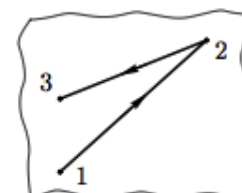


Однако из текста следовало, что состояния 1 и 3 лежат на одной изохоре, соответствующей объёму V_1 . Кроме того, было сказано, что количество теплоты, подведённое к газу в процессе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, равно нулю.

Определите объём V_2 .

$$\tau L \Delta V = \tau L$$

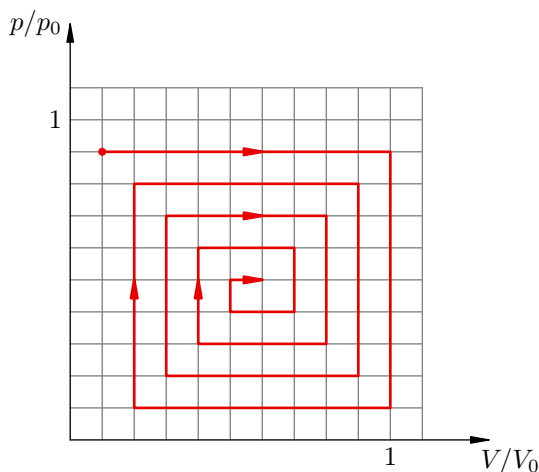
ЗАДАЧА 7. (Всеросс., 2011, РЭ, 11) Говорят, что в архиве лорда Кельвина нашли рукопись, на которой был изображён процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, совершённый над одним молем азота (см. рисунок). От времени чернила выцвели, и стало невозможно разглядеть, где находятся оси p (давления) и V (объёма). 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.

$$L \Delta V \frac{5}{2} = \tau L$$

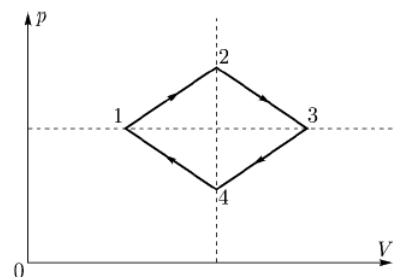
ЗАДАЧА 8. (Всеросс., 2010, РЭ, 11) Над одним молем метана (CH_4) совершается процесс, график которого изображён на рисунке. Перенесите график процесса в тетрадь и выделите на нём участки, на которых к газу подводится теплота. Какое количество теплоты было подведено к газу в этом процессе? Величины p_0 и V_0 считать известными.



0A0d8Г'6 = 0

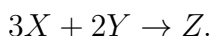
ЗАДАЧА 9. (Всеросс., 2016, РЭ, 11) Циклический процесс, совершаемый над идеальным газом, на (p, V) -плоскости представляет собой ромб (см. качественный рисунок). Вершины (1) и (3) лежат на одной изобаре, а вершины (2) и (4) — на одной изохоре. За цикл газ совершил работу A .

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?



z/v aH

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

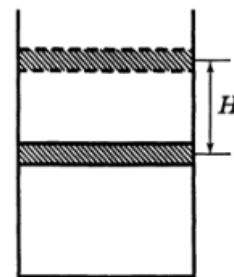


Температуры плавления и кипения этих веществ таковы, что $T_x^{\text{пл}} < T_y^{\text{пл}} < T_z^{\text{пл}} = 10^\circ\text{C}$, $T_x^{\text{кип}} > T_y^{\text{кип}} > T_z^{\text{кип}} = 190^\circ\text{C}$. В первом опыте вещества X и Y , взятые при температуре $T_z^{\text{пл}}$, поместили в герметичный 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.

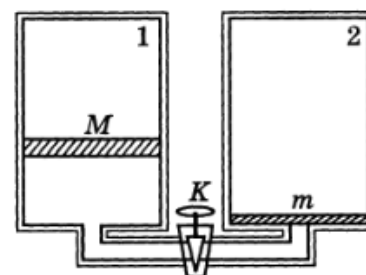
3Cz + 2Cz + 200 = (Lz + rz) / (Tz - Tz) - rz + rz = zC

ЗАДАЧА 11. (*Межреспублик., 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 ждут, 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.



$$H \frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda_0}{H} + 1 = \eta$$

ЗАДАЧА 12. (*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.

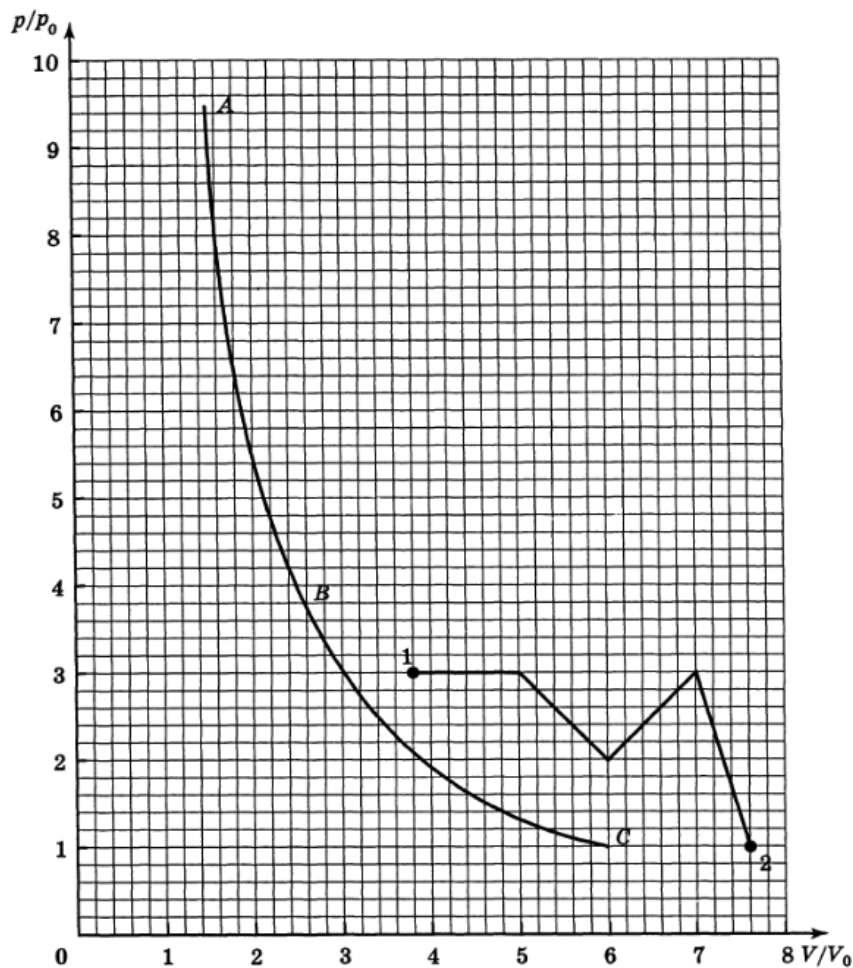


$$0L86'0 = \frac{\frac{\nu c}{\mu \alpha} + 1}{\frac{\nu c}{\mu \alpha} + 1} 0L = \mathcal{L}$$

ЗАДАЧА 13. (*Всеросс., 1993, финал, 10*) Неидеальный газ, находившийся изначально в некотором исходном состоянии, адиабатически расширился, совершив при этом работу. Далее этот газ изохорически перевели в состояние с первоначальной температурой, а затем изотермическим процессом перевели в исходное состояние. Найдите работу $A_{ад}$, совершённую газом при адиабатическом расширении, если в изохорическом процессе к нему было подведено количество теплоты Q , а в изотермическом процессе газом была совершена работа A . Внутренняя энергия U и давление p неидеального газа заданы следующими выражениями: $U = \rho(T)V$ и $p = \frac{1}{3}\rho(T)$, где $\rho(T)$ является функцией только температуры, V — объём газа.

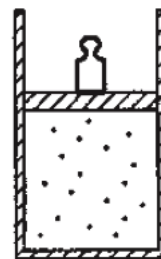
$$\forall \mathcal{E} + \dot{\mathcal{O}} = \text{tr} \mathcal{V}$$

ЗАДАЧА 16. (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.



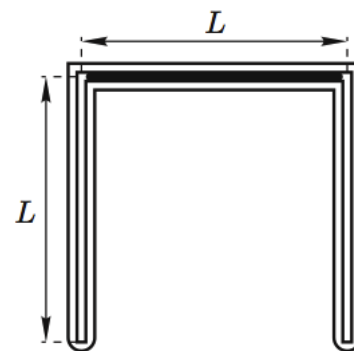
$$\int_{V_0}^{2V_0} \frac{dV}{V} = \ln 2$$

ЗАДАЧА 17. (Всеросс., 2005, финал, 10) В цилиндре с теплопроницаемыми стенками под массивным теплопроницаемым поршнем находится идеальный одноатомный газ. На поршень поставили гирю, масса которой равна массе поршня (рис.). После того как система пришла в новое состояние термодинамического равновесия, гирю 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.



$$T = T_0 \left(\frac{25}{28}\right)^4 \approx 172 \text{ K}$$

ЗАДАЧА 18. (Всеросс., 2006, финал, 10) В горизонтальном колене запаянной теплоизолированной П-образной трубки небольшого постоянного поперечного сечения S с длиной колена L расположена жидкость плотностью ρ (рис.). Теплоёмкость всей жидкости в трубке равна C . В вертикальных коленах находится по ν молей гелия под давлением p_0 . Из-за слабого толчка равновесие нарушилось. Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, найдите расстояние x , на которое сместится столбик жидкости к моменту установления термодинамического равновесия. Поперечное сечение трубки столь мало, что пузырьки газа не «пробулькивают» сквозь жидкость, сместившись в вертикальное колено.



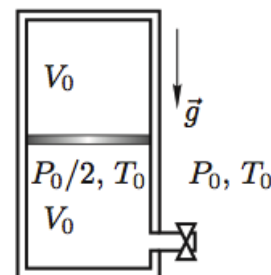
$$\left(\frac{\gamma^{\beta d}}{\sigma d^2} - 1\right) \frac{\nu \nu \gamma + C}{\nu \nu \gamma + C} \sqrt{\nu} T = x$$

ЗАДАЧА 19. (Всеросс., 2013, финал, 10) Горизонтально расположенный теплоизолированный цилиндрический сосуд разделён на два отсека неподвижной теплопроводящей перегородкой. Второй отсек отделён от атмосферы подвижным не проводящим тепло поршнем. Оба отсека наполнены азотом; система находится в равновесии. Газ в первом отсеке быстро нагревают. Известно, что с момента сразу после нагрева до восстановления теплового равновесия суммарная внутренняя энергия газа изменилась на ΔU . Найдите изменение внутренней энергии ΔU_1 азота в первом отсеке за тот же промежуток времени. Теплоёмкостью сосуда и поршней можно пренебречь.

$$\rho \nabla \frac{\xi}{\tau} = \nu \rho \nabla$$

ЗАДАЧА 20. (Всеросс., 2011, финал, 10) В цилиндрическом сосуде объёма $2V_0$ под тяжёлым поршнем находится одноатомный идеальный газ при температуре T_0 и давлении $P_0/2$, занимающий объём V_0 (рис.). Над поршнем вакуум. Внизу в сосуде имеется небольшое отверстие, перекрытое краном. Снаружи пространство заполнено тем же газом при давлении P_0 и температуре T_0 . Сосуд теплоизолирован.

Кран приоткрывают так, что поршень медленно поднимается вверх, и после того как давление внутри и снаружи выравняется, кран закрывают. Определите температуру газа после закрытия крана.



$${}^0 L \frac{\nu}{\xi} = L$$

ЗАДАЧА 21. (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.

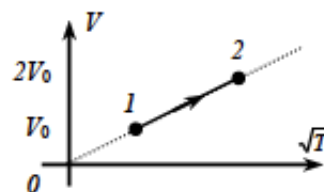
$$c/mo\ 6 = \frac{v^2}{2} + 0a = a$$

2 Московская олимпиада школьников по физике

ЗАДАЧА 22. (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 .

$$*T\ 0\ 4 = 0$$

ЗАДАЧА 23. (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.

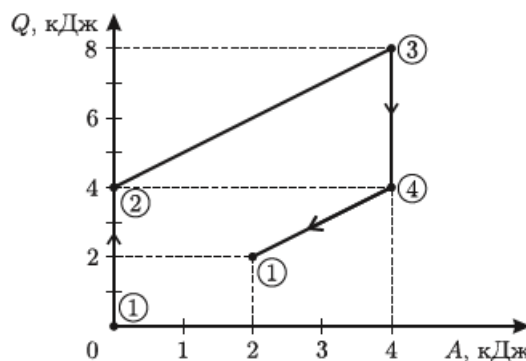


$$*T\ 0\ 1 = 0LH\ 9 = 0 : *T\ 4\ 1L\ 3 = 0LH\ 1\ 3 = V$$

ЗАДАЧА 24. (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 совершённой гелием работы A . Найдите максимально возможное значение работы A газа в таком процессе.

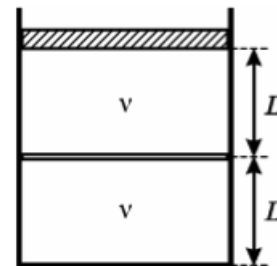
$$*T\ 0\ 1 = 0L\ 0\ 5\ 9 = 120\ 1L\ 3$$

ЗАДАЧА 25. (МОШ, 2009, 10) На рисунке изображён график циклического равновесного процесса, проводимого над одним молем идеального одноатомного газа. По горизонтали отложена работа, совершённая 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.



$$z = \frac{T_{max}}{T_{min}}$$

Задача 26. (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.



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

Задача 27. (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 28. (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.

$$\frac{S \Delta x}{V} = x$$

Задача 29. (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.

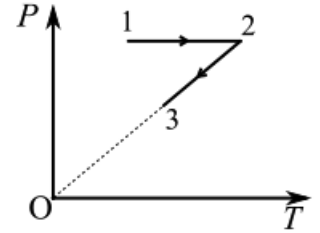
$$\text{A) } 25; \text{ B) } 60; \text{ C) } 4,8$$

3 МФТИ и «Физтех»

ЗАДАЧА 30. (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.

$$\mu = 50 \text{ г/моль}$$

ЗАДАЧА 31. («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.

$$T_1 = 150 \text{ К}, T_2 = 3T_1, T_3 = 2T_1$$

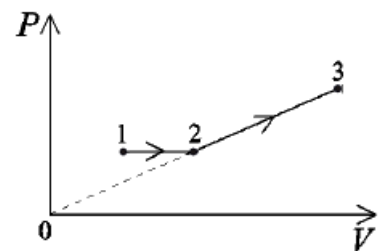
ЗАДАЧА 32. («Физтех», 2012) С ν молями идеального одноатомного газа проводят прямой циклический процесс, состоящий из двух изохор и двух адиабат. В процессе адиабатического расширения температура газа уменьшается на ΔT_1 ($\Delta T_1 > 0$), а в процессе адиабатического сжатия изменение температуры вдвое меньше. Сколько тепла подводится к газу при изохорическом нагревании, если при изохорическом охлаждении температура уменьшается на ΔT_2 ($\Delta T_2 > 0$)?

$$\Delta T_1 = 2\Delta T_2$$

ЗАДАЧА 33. (МФТИ, 1994) В процессе расширения к одноатомному идеальному газу было подведено количество теплоты, в 4 раза превышающее величину его внутренней энергии в начальном состоянии. Во сколько раз увеличился объём газа, если в процессе расширения он изменялся прямо пропорционально давлению ($V \sim p$)? Под внутренней энергией газа понимается сумма кинетических энергий всех молекул.

$$Q = 4U$$

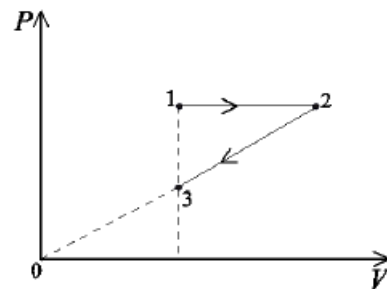
ЗАДАЧА 34. («Физтех», 2016, 10–11) Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 в изобарическом процессе 1–2, а затем в процессе 2–3 с прямо пропорциональной зависимостью давления p от объёма V (см. рисунок). Отношение объёмов $V_2/V_1 = V_3/V_2 = 3/2$.



- 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.

$$V_2/V_1 = V_3/V_2 = 3/2$$

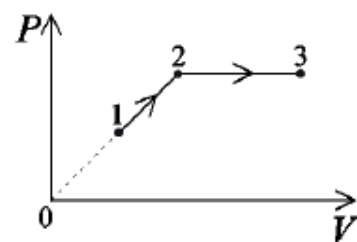
ЗАДАЧА 35. («Физтех», 2016, 10–11) Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 в изобарическом процессе 1–2, а затем сжимается в процессе 2–3 с прямо пропорциональной зависимостью давления p от объёма V , возвращаясь к начальному объёму (см. рисунок). Отношение объёмов $V_2/V_1 = 2$.



- 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.

$$\nu R \ln 2 = \nu R \ln 2 + \nu R \ln 2 = \nu R \ln 4 = \nu R \ln 4$$

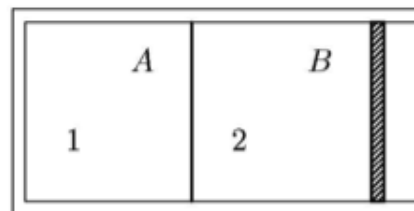
ЗАДАЧА 36. («Физтех», 2016, 11) Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 в процессе 1–2 с прямо пропорциональной зависимостью давления p от объёма V , а затем в изобарическом процессе 2–3 (см. рисунок). Отношение объёмов $V_2/V_1 = V_3/V_2 = 3/2$.



- 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.

$$\nu R \ln \frac{3}{2} = \nu R \ln \frac{3}{2} + \nu R \ln \frac{3}{2} = \nu R \ln \frac{9}{4} = \nu R \ln \frac{9}{4}$$

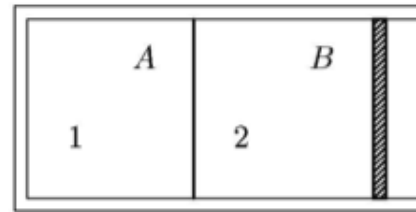
ЗАДАЧА 37. («Физтех», 2015, 10) Неподвижная теплопроводящая перегородка A делит объём теплоизолированного цилиндра на два отсека, в которых находится по ν моль гелия. Во втором отсеке газ удерживается подвижным теплоизолированным поршнем B . Наружное атмосферное давление равно p_0 . В начальном состоянии 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.

$$\nu R \ln \frac{T_0}{T_1} = \nu R \ln \frac{T_0}{T_1} + \nu R \ln \frac{T_0}{T_2} = \nu R \ln \frac{T_0^2}{T_1 T_2} = \nu R \ln \frac{T_0^2}{T_1 T_2}$$

ЗАДАЧА 38. («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.

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

ЗАДАЧА 39. (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?

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

ЗАДАЧА 40. (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 41. («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.

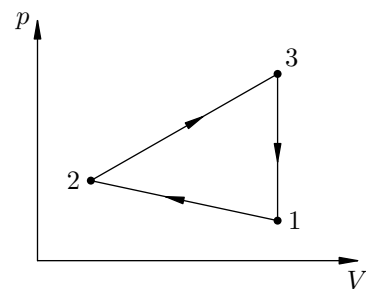
$$A_{12} = \nu \frac{5}{2} A = 500 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 42. («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.

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

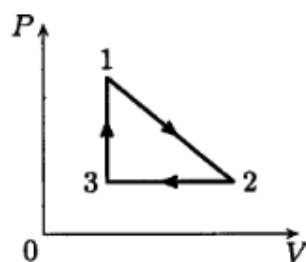
ЗАДАЧА 43. («Физтех», 2008) С газообразным гелием проводится циклический процесс, состоящий из процессов 1–2 и 2–3 с линейной зависимостью давления от объёма и изохоры 3–1 (см. рисунок). Найти отношение объёмов в состояниях 1 и 2, если в цикле 1–2–3–1 газ совершил работу $A = 400$ Дж, а в изохорическом процессе 3–1 от газа отвели количество теплоты $Q = 1800$ Дж.

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



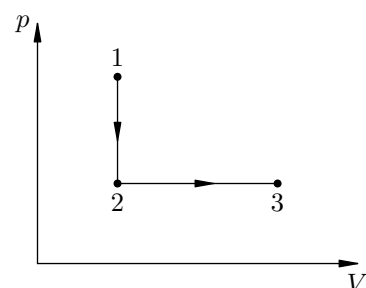
ЗАДАЧА 44. («Физтех», 2008) С газообразным гелием проводится циклический процесс, состоящий из процесса 1–2 с линейной зависимостью давления от объёма, изобарического сжатия 2–3 и изохорического нагревания 3–1 (см. рисунок). Известно, что объём в состоянии 2 в три раза больше, чем в состоянии 1. Найдите отношение работы газа в цикле 1–2–3–1 к количеству теплоты, подведённой к газу в изохорическом процессе 3–1.

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

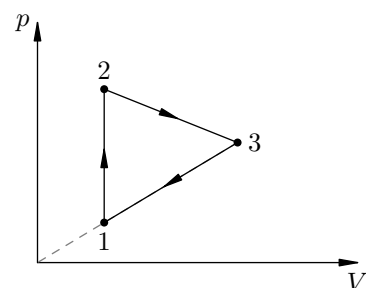


ЗАДАЧА 45. (МФТИ, 1994) Один моль одноатомного идеального газа переводится из состояния 1 в состояние 3 путём изохорического охлаждения 1–2, а затем изобарического нагрева 2–3 (см. рисунок). На участке 1–2 температура газа уменьшается на $\Delta T = 100$ К, а в процессе 1–2–3 газ получает суммарное (алгебраическая сумма) количество теплоты $Q = 1870$ Дж. Какую по величине работу совершил газ в процессе изобарического нагрева?

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



ЗАДАЧА 46. (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.

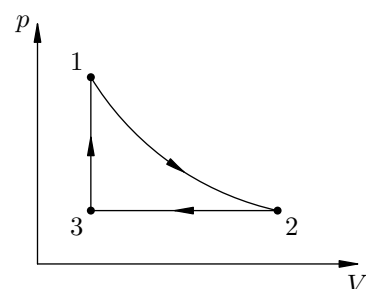


- 1) Найти температуру T_1 в точке 1.
- 2) Найти работу газа за цикл.

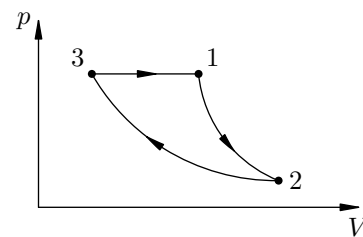
$$\frac{\varepsilon}{\partial} = V \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \varepsilon} = L \right)$$

ЗАДАЧА 47. (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 .

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

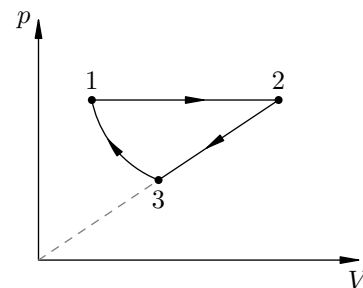


Задача 48. (МФТИ, 1998) Моль гелия совершает работу величиной A в замкнутом цикле (см. рисунок), состоящем из адиабаты 1–2, изотермы 2–3 и изобары 3–1. Найти величину работы, совершённой в изотермическом процессе, если разность максимальной и минимальной температур газа в цикле равна ΔT .



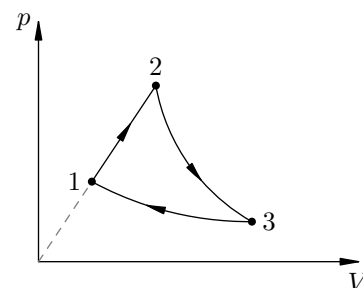
$$A_{23} \frac{2}{\gamma} - A = \varepsilon_{23} V$$

Задача 49. (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.



$$A_{31} \frac{2}{\gamma} - \varepsilon_{23} V = A_{12}$$

Задача 50. (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?



$$A_{23} \frac{2}{\gamma} - Q_{31} = A$$

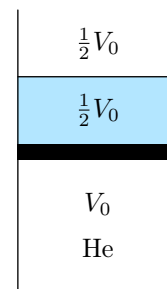
Задача 51. (МФТИ, 1992) Равные массы гелия He и водорода H_2 находятся в теплоизолированном цилиндре под поршнем. Объём цилиндра $V_0 = 1$ л, давление в нём $p_0 = 9$ атм. При адиабатическом расширении смесь газов совершает работу $A = 650$ Дж. Найти относительное изменение температуры смеси. Внутренняя 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.

$$\frac{\varepsilon}{V} = \frac{0.1 \text{ Дж}}{V} \frac{\nu_1 \varepsilon_1 + \nu_2 \varepsilon_2}{(\nu_1 + \nu_2) \bar{\varepsilon}} = \frac{0.1}{V \bar{\varepsilon}}$$

Задача 52. (МФТИ, 1992) В цилиндре под давлением $p = 2$ атм находится смесь гелия He и водорода H_2 . 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.

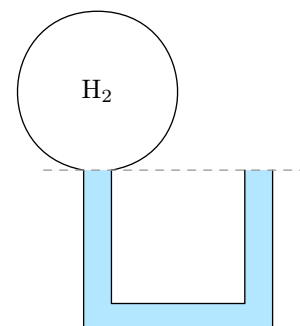
$$\Delta U \approx \Delta V p \frac{\nu_1 \varepsilon_1 + \nu_2 \varepsilon_2}{(\nu_1 + \nu_2) \bar{\varepsilon}} = \Delta V p \frac{3}{2}$$

Задача 57. (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.



$$\int_{V_0}^{3V_0} p dV \approx \int_{V_0}^{3V_0} p_0 dV = 2p_0 V_0$$

Задача 58. (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 $p_0/9$.



$$\int_{V_0}^{2V_0} p dV \approx \int_{V_0}^{2V_0} p_0 dV = p_0 V_0$$

Задача 59. (МФТИ, 2004) Внутренняя энергия U некоторой массы неидеального газа зависит от температуры T и объёма V по формуле $U = cT - a/V$, где c и a — известные константы. Такой газ из начального состояния с давлением p_1 и объёмом V_1 расширяется сначала в изобарическом процессе, а затем в изохорическом процессе переводится в конечное состояние, в котором его объём в k раз ($k > 1$) больше начального. В результате всего процесса температура газа уменьшилась на ΔT ($\Delta T > 0$), а его внутренняя энергия не изменилась.

- 1) Найти ΔT .
- 2) Какое суммарное количество теплоты сообщили газу во всём процессе?

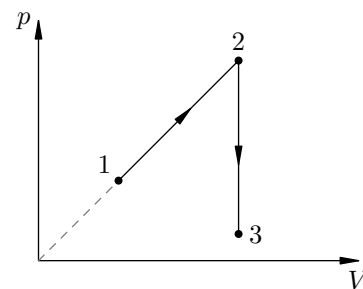
$$\int_{V_1}^{kV_1} p dV = \int_{V_1}^{kV_1} \left(\frac{c}{V} - \frac{a}{V^2} \right) dV = c \ln k + \frac{a}{V_1} \left(\frac{1}{k} - 1 \right)$$

Задача 60. (МФТИ, 2004) Внутренняя энергия U некоторой массы неидеального газа зависит от температуры T и объёма V по формуле $U = cT - a/V$, где c и a — известные константы. Такой газ нагревается сначала в изохорическом процессе, а затем охлаждается в изобарическом процессе до первоначальной температуры. Объём газа в конечном состоянии в k раз ($k > 1$) меньше начального, а внутренняя энергия в конечном состоянии меньше, чем в начальном, на величину ΔU ($\Delta U > 0$). В результате всего процесса от газа отвели суммарное количество теплоты Q ($Q > 0$).

- 1) Найти начальный объём газа.
- 2) Найти конечное давление газа.

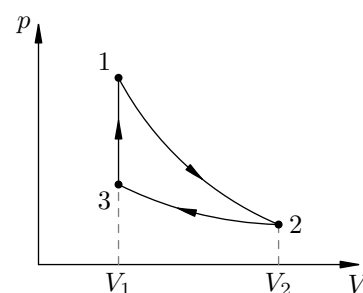
$$\int_{V_1}^{V_1/k} p dV = \int_{V_1}^{V_1/k} \left(\frac{c}{V} - \frac{a}{V^2} \right) dV = c \ln \frac{1}{k} + \frac{a}{V_1} \left(\frac{1}{k} - 1 \right)$$

Задача 61. (МФТИ, 1993) Внутренняя энергия U идеального газа зависит от температуры T и объёма V по формуле $U = cT - a/V$, где c и a — известные константы. Такой газ, расширяясь в процессе 1–2: $p = \beta V$ (см. рисунок; p — давление, β — заданная константа), совершает работу величиной A . В процессе изохорического охлаждения газа 2–3 до первоначальной температуры от него пришлось отвести количество теплоты Q . Сколько теплоты было подведено к газу в процессе расширения 1–2, если его объём увеличился при этом в α раз?



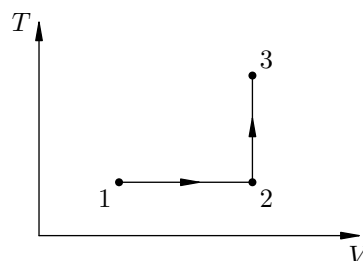
$$\frac{V\tau}{g(1-\tau^g)} \wedge \frac{v}{(1-v)^g} + \partial + V = \tau^g \partial$$

Задача 62. (МФТИ, 1993) Внутренняя энергия U идеального газа зависит от температуры T и объёма V по формуле $U = cT - a/V$, где c и a — заданные константы. Такой газ из состояния с объёмом V_1 описывает замкнутый цикл, состоящий из адиабаты 1–2, изотермы 2–3 и изохоры 3–1 (см. рисунок). Найти разность конечной и начальной температур газа в изохорическом процессе, если величина работы газа в адиабатическом процессе оказалась в β раз больше величины работы изотермического сжатия. Известно, что $V_2 = \alpha V_1$, а суммарное количество теплоты, подведённое к газу за цикл, равно Q .



$$\frac{V\Delta^g}{g} \frac{v}{1-v} + \frac{v}{g} \frac{1-g}{g} = \Delta V$$

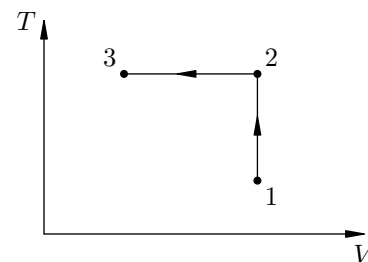
Задача 63. (МФТИ, 2003) Газ фотонов из начального состояния 1 расширяется в изотермическом процессе 1–2, а затем нагревается в изохорическом процессе 2–3 (см. рисунок). Во всём процессе перехода 1–2–3 газ совершил работу A , а его температура и объём увеличились в два раза. Какое количество теплоты было подведено к газу в процессе перехода 1–2–3?



Указание. В пустом сосуде переменного объёма V , температура стенок которого T , возникает равновесный газ фотонов, которые излучаются и поглощаются стенками сосуда. Внутренняя энергия этого газа $U = \alpha T^4 V$, где $\alpha = \text{const}$. Давление газа фотонов определяется только его температурой: $p = \frac{1}{3} \alpha T^4$.

$$Q = 94A$$

ЗАДАЧА 64. (МФТИ, 2003) Газ фотонов из начального состояния 1 нагревается в изохорическом процессе 1–2 так, что его температура увеличилась в $3/2$ раза. Затем газ сжимается в изотермическом процессе 2–3 (см. рисунок). В конечном состоянии 3 внутренняя энергия газа фотонов оказалась равной начальной. В процессе всего перехода 1–2–3 от газа пришлось отвести количество теплоты Q ($Q > 0$). Найти внутреннюю энергию газа фотонов в начальном состоянии.



Указание. В пустом сосуде переменного объема V , температура стенок которого T , возникает равновесный газ фотонов, которые излучаются и поглощаются стенками сосуда. Внутренняя энергия этого газа $U = \alpha T^4 V$, где $\alpha = \text{const}$. Давление газа фотонов определяется только его температурой: $p = \frac{1}{3} \alpha T^4$.

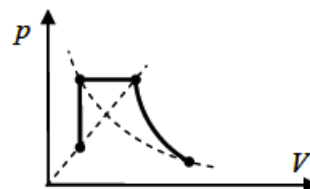
$$\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{4}{3} u$$

4 «Покори Воробьёвы горы!»

ЗАДАЧА 65. («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.

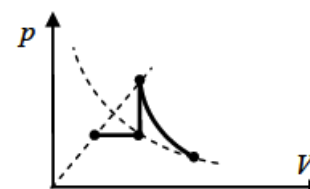
$$\frac{5}{2} R$$

ЗАДАЧА 66. («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.



$$\frac{1}{2} p_1 V_1 = \frac{1}{2} p_2 V_2 = \frac{1}{2} p_3 V_3 = \frac{1}{2} p_4 V_4$$

ЗАДАЧА 67. («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.



$$\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{5}{2} R$$

ЗАДАЧА 68. («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.

$$8 = \frac{(1-\gamma)\varepsilon}{(1-n)\gamma\varepsilon} = \frac{\text{числ}}{\text{знамен}} \quad \text{или } \frac{1-\gamma}{1-n\gamma} = \frac{1}{k}$$

5 «Росатом»

ЗАДАЧА 69. («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.

$$\Delta Q = \frac{5}{2} \nu R \Delta T = 0$$

6 «Курчатов»

ЗАДАЧА 70. («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).

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