

11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

Набор задач для самостоятельного решения по занятию 4.

Темы: молекулярная физика и термодинамика (часть 1).

Задача 1 (1 балл) [идеальный газ, основное уравнение МКТ]

В сосуде содержится разреженный неон под давлением 120 кПа. Часть газа выпустили, и концентрация его молекул в сосуде уменьшилась в 2 раза. Затем газ нагрели так, что средняя кинетическая энергия его молекул увеличилась в три раза. Чему равно установившееся давление неона после этого? Ответ запишите в кПа, с точностью до целых.

Подсказка 1: Разреженный неон можно считать одноатомным идеальным газом.

Подсказка 2: Согласно основному уравнению МКТ, давление такого газа прямо пропорционально концентрации молекул и их средней кинетической энергии.

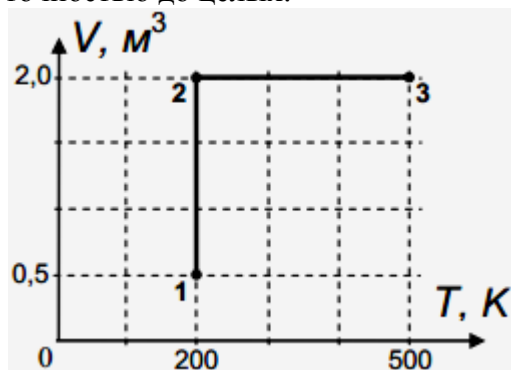
Решение:

Разреженный неон можно считать одноатомным идеальным газом. Согласно основному уравнению МКТ, давление такого газа прямо пропорционально концентрации молекул и их средней кинетической энергии, поэтому $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_K = \frac{2}{3} \frac{n_0}{2} 3 \bar{E}_{K0} = \frac{3}{2} p_0 = 180$ кПа.

Ответ: 180.

Задача 2 (2 балла) [идеальный газ, диаграммы состояния, уравнение Менделеева-Клапейрона]

На рисунке изображена диаграмма процесса над постоянным количеством гелия. Давление гелия в точке 1 равно 120 кПа. Найдите давление гелия в точке 3. Ответ запишите в кПа, с точностью до целых.



Подсказка 1: Гелий можно считать одноатомным идеальным газом..

Подсказка 2: Связь искомой величины (давления) с величинами, отложенными по осям диаграммы, выражается из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Подсказка 3: $p = \frac{\nu RT}{V}$.

Решение:

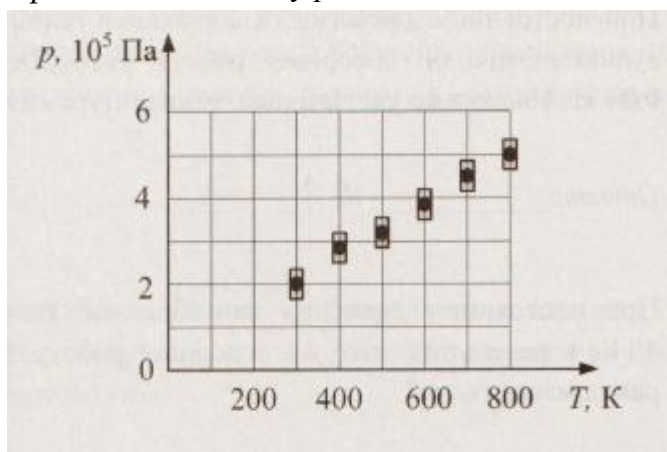
Гелий можно считать одноатомным идеальным газом. Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона, связь искомой величины (давления) с величинами, отложенными по осям диаграммы (температурой и объемом) дается выражением $p = \frac{\nu RT}{V}$. Поэтому

$$p_3 = \frac{\nu RT_3}{V_3} = \frac{T_3}{T_1} \frac{V_1}{V_3} p_1 = \frac{5}{8} p_1 = 75 \text{ кПа.}$$

Ответ: 75.

Задача 3 (2 балла) [идеальный газ, диаграммы состояния, уравнение Менделеева-Клапейрона]

На рисунке показаны результаты измерения давления 0,3 моль разреженного газа при изохорном нагревании. Погрешность измерения температуры $\Delta T = \pm 10 \text{ К}$, давления $\Delta p = \pm 2 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Чему равен объем газа? Ответ в литрах округлите до целых.

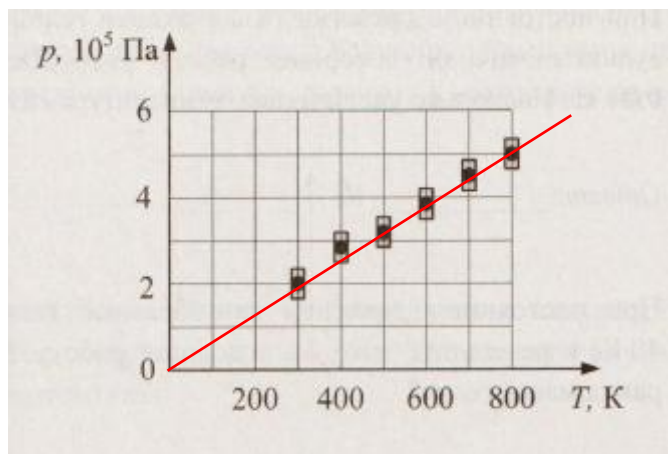


Подсказка 1: Объем газа, согласно уравнению Менделеева-Клапейрона, $V = \frac{\nu RT}{p}$.

Подсказка 2: Нужно провести наилучшую из всех возможных прямых, отвечающих этому уравнению.

Решение:

Объем газа, согласно уравнению Менделеева-Клапейрона, $V = \frac{\nu RT}{p}$. Как видно, зависимость $p(T)$ должна быть линейной, и нужно выбрать наилучшую из всех возможных (то есть проходящую по возможности через все возможные области положения точек диаграммы процесса изохорного нагревания) прямых, отвечающих уравнению Менделеева-Клапейрона, причем эта прямая должна проходить через начало координат.



Проведем такую прямую на диаграмме. Она проходит вблизи точки на координатной сетке, отвечающей значениям $T \approx 800 \text{ К}$, $p \approx 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. По этой точке и находим объем

$$V = \frac{\nu RT}{p} \approx 3,99 \text{ л. В рамках точности измерений } V \approx 4 \text{ л.}$$

Ответ: 4.

Задача 4 (2 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона]

Разреженный воздух охлаждали в сосуде постоянного объема. Абсолютную температуру воздуха понизили в 1,56 раза. Оказалось, что давление воздуха в сосуде уменьшилось только в 1,3 раза. Это означает, что сосуд не герметичен, и в него натекло снаружи некоторое количество воздуха. На сколько процентов возросла масса воздуха в сосуде за время охлаждения? Ответ запишите в виде целого числа.

Подсказка 1: Из уравнения Менделеева-Клапейрона можно выразить массу газа через другие параметры состояния: $pV = \frac{m}{\mu}RT \Rightarrow m = \frac{\mu pV}{R T}$.

Подсказка 2: С помощью этого уравнения можно вычислить отношение конечной и начальной масс (с учетом того, что объем остается постоянным).

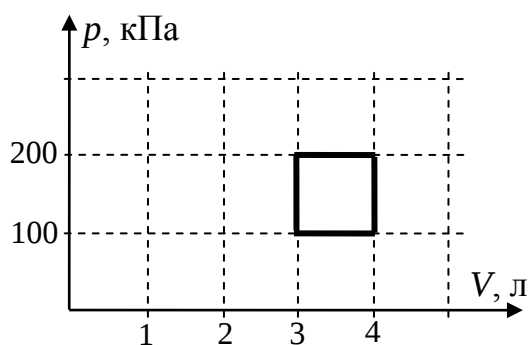
Решение:

Из уравнения Менделеева-Клапейрона можно выразить массу газа через другие параметры состояния: $pV = \frac{m}{\mu}RT \Rightarrow m = \frac{\mu pV}{R T}$, поэтому отношение конечной и начальной масс (с учетом того, что объем остается постоянным) равно $\frac{m}{m_0} = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = 1,2$. Значит, масса увеличилась на 20%..

Ответ: 20.

Задача 5 (4 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона]

С идеальным газом постоянной массы происходит циклический процесс, pV -диаграмма которого представлена на рисунке. Минимальная температура газа в этом процессе равна 300 К. Определите количество вещества этого газа. Ответ дайте в молях, округлив до сотых.



Подсказка 1: Линии постоянной температуры в координатах «давление-объем» — это гиперболы $pV = const$.

Подсказка 2: Минимальная температура в данном процессе достигается в точке, в которой $V = 3$ л, $p = 100$ кПа.

Решение:

Линии постоянной температуры в координатах «давление-объем» — это гиперболы $pV = const$, и минимальная температура в данном процессе достигается в точке, отвечающей «левому нижнему» углу квадрата, где $V = 3$ л, $p = 100$ кПа. Из уравнения

Менделеева-Клапейрона находим количество вещества: $\nu = \frac{pV}{RT} \approx 0,12$ моль.

Ответ: 0,12.

Задача 6 (3 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона]

В прочном сосуде объемом $V = 50$ л находится смесь водорода и гелия общей массой $m = 10$ г. При температуре $t = 27,7^\circ\text{C}$ давление в сосуде $p = 200$ кПа. Найдите отношение масс водорода и гелия в сосуде. Ответ округлите до десятых. Молярные массы водорода и гелия $\mu_1 = 2$ г/моль и $\mu_2 = 4$ г/моль, универсальная газовая постоянная $R \approx 8,31$ Дж/(моль·К).

Подсказка 1: По закону Дальтона давление в сосуде есть сумма парциальных давлений водорода и гелия, каждое из которых можно найти из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Подсказка 2: Из уравнения, полученного в предыдущей подсказке, можно выразить $\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} = \frac{pV}{RT}$.

Подсказка 3: Вместе с уравнением $m_1 + m_2 = m$ получается система для определения масс газов.

Решение:

По закону Дальтона давление в сосуде есть сумма парциальных давлений водорода (1) и гелия (2), каждое из которых можно найти из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p = p_1 + p_2 = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{V} \Rightarrow \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} = \frac{pV}{RT}. \text{ С другой стороны, } m_1 + m_2 = m. \text{ Решая}$$

полученную систему относительно масс водорода и гелия, находим:

$$m_1 = \frac{\mu_1(\mu_2 pV - mRT)}{(\mu_2 - \mu_1)RT} \approx 6 \text{ г} \quad \text{и} \quad m_2 = \frac{\mu_2(mRT - \mu_1 pV)}{(\mu_2 - \mu_1)RT} \approx 4 \text{ г}. \quad \text{Таким образом,}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\mu_1(\mu_2 pV - mRT)}{\mu_2(mRT - \mu_1 pV)} \approx 1,5.$$

Ответ: 1,5.

Задача 7 (4 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона, внутренняя энергия]

Теплоизолированный сосуд разделен теплоизолирующей перегородкой на две равные по объему части. В правой находится некоторое количество гелия, а в левой – такое же количество аргона. Температура гелия равна $T_1 = 300\text{К}$, а температура аргона - $T_2 = 450\text{К}$. Во сколько раз изменится давление на правую стенку сосуда после удаления перегородки и установления равновесия? Ответ запишите в виде десятичной дроби.

Подсказка 1: начальное давление на правую стенку – это давление ν молей гелия, который занимает объем $\frac{V}{2}$ при температуре T_1 .

Подсказка 2: так как система теплоизолирована и над ней не производится работа, то сумма внутренних энергий газов остается неизменной после удаления перегородки и перемешивания газов $U' = \frac{3}{2} 2\nu RT = U = \frac{3}{2} \nu R(T_1 + T_2)$.

Подсказка 3: конечное давление на стенки сосуда определяется суммой равных парциальных давлений газов, распределившихся по всему объему сосуда с общей установившейся температурой.

Решение:

Пусть ν – количество и гелия, и аргона, а V - объем сосуда. Начальное давление на правую стенку – это давление гелия, который занимает объем $\frac{V}{2}$. В соответствии с уравнением

Менделеева-Клапейрона $p = \frac{2\nu RT_1}{V}$. Суммарная внутренняя энергия обоих газов до

удаления перегородки $U = \frac{3}{2} \nu RT_1 + \frac{3}{2} \nu RT_2 = \frac{3}{2} \nu R(T_1 + T_2)$. После удаления перегородки и установления равновесия оба газа распределятся по всему объему сосуда, а их температуры

выравниваются. Следовательно, теперь суммарная внутренняя энергия $U' = \frac{3}{2}\nu RT$, и, поскольку сосуд теплоизолирован и его объем неизменен, то $U' = U \Rightarrow T = \frac{T_1 + T_2}{2}$. Теперь давление на стенки сосуда определяется суммой равных парциальных давлений газов $p' = 2 \frac{\nu RT}{V} = \frac{\nu R(T_1 + T_2)}{V}$. Следовательно, $\frac{p'}{p} = \frac{T_1 + T_2}{2T_1} = 1,25$.

Ответ: 1,25.

Задача 8 (3 балла) [идеальный газ, диаграммы состояний, уравнение Менделеева-Клапейрона]

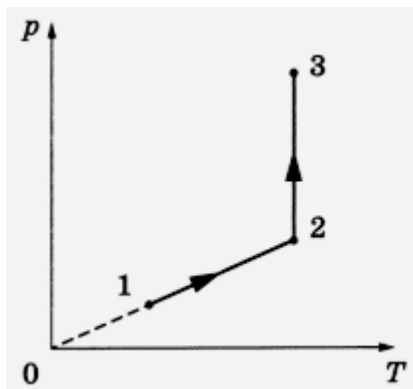
Два моля разреженного аргона участвуют в процессе 1-2-3, график которого показан на рисунке в координатах p - T , где p – давление газа, а T – его абсолютная температура. Как изменяются плотность аргона в процессе 1-2 и его внутренняя энергия в процессе 2-3? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

плотность аргона в процессе 1-2	внутренняя энергия аргона в процессе 2-3

В ответе запишите выбранные цифры подряд.



Подсказка 1: Разреженный аргон можно считать идеальным газом, и связь плотности с давлением и температурой можно найти из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Подсказка 2: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT}$.

Подсказка 3: Внутренняя энергия идеального газа определяется только количеством вещества и температурой $U = \frac{3}{2}\nu RT$.

Решение:

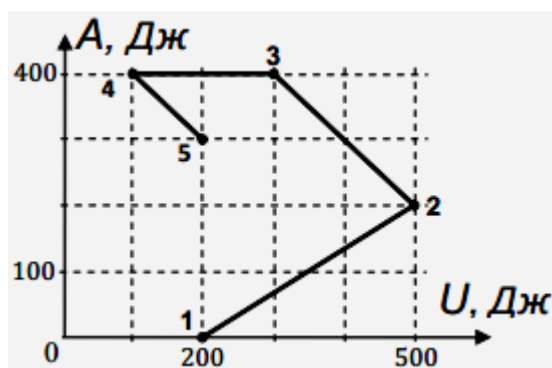
Разреженный аргон можно считать идеальным газом, и связь плотности с давлением и температурой можно найти из уравнения Менделеева-Клапейрона: $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT}$. Диаграмме процесса 1-2 – прямая, проходящая через начало координат, и отношение давления к абсолютной температуре остается постоянным. Следовательно, плотность аргона в этом процессе остается постоянной. Внутренняя энергия идеального газа определяется только количеством вещества и температурой $U = \frac{3}{2}\nu RT$. В процессе 2-3 обе эти величины не изменяются, и поэтому внутренняя энергия также остается постоянной.

Ответ: 33.

Задача 9 (4 балла) [работа идеального газа, внутренняя энергия идеального газа]

С постоянным количеством одноатомного идеального газа произвели процесс 1-2-3-4-5, в течение которого измеряли работу A , произведенную газом от начала процесса, и вычисляли внутреннюю энергию газа U . AU -диаграмма процесса приведена на рисунке. Выберите все правильные утверждения об этом процессе из приведенных ниже. В ответ запишите номера выбранных утверждений в порядке возрастания, не разделяя пробелами или знаками препинания.

- 1) Процесс 1-2 – изобарное расширение.
- 2) Процесс 1-2 – изотермический.
- 3) Процессы 2-3 – адиабатическое расширение.
- 4) Процесс 2-3 – изохорное охлаждение.
- 5) В процессе 3-4 от газа отведено количество теплоты, равное 300 Дж.
- 6) Конечная температура во всем процессе равна начальной.



Подсказка 1: В процессе 1-2 совершается положительная работа, и внутренняя энергия постоянного количества газа (а вместе с ней и температура газа) растет.

Подсказка 2: Изобару можно опознать по соотношению работы и изменения внутренней энергии: для изобары работа $A = p\Delta V = \Delta(pV)$, а $\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(pV)$.

Подсказка 3: Для адиабаты должно быть $\Delta A + \Delta U = 0$, то есть $\Delta A = -\Delta U$.

Подсказка 4: В соответствии с I Началом термодинамики $Q_{34} = \Delta A_{34} + \Delta U_{34}$.

Решение:

В процессе 1-2 совершается положительная работа, и внутренняя энергия постоянного количества газа (а вместе с ней и температура газа) растет. Значит, этот процесс точно не является изотермическим – утверждение 2 **неверное**. В процессе изобарного расширения работа газа и изменение внутренней энергии действительно положительные (как и в 1-2), но они еще должны находиться в определенном соотношении: работа $A = p\Delta V = \Delta(pV)$, а $\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(pV)$. Таким образом, для изобары $\frac{\Delta U}{A} = 1,5$. Проверяем: $\frac{\Delta U_{12}}{A_{12}} = \frac{300 \text{ Дж}}{200 \text{ Дж}} = 1,5$.

Итак, утверждение 1 – **верное**. Если процесс 2-3 – действительно адиабата, то для него должно быть $\Delta A + \Delta U = 0$, то есть $\Delta A = -\Delta U$. Как видно, это действительно выполняется для любого участка процесса 2-3, к тому же в этом процессе работа газа положительна, то есть газ расширяется. Значит, утверждение 3 – **верное** (нетрудно заметить, что 4-5 – тоже адиабата, только сжатие), а утверждение 4 – **неверное**. В процессе 3-4 работа не совершается (ясно, что объем газа постоянен, то есть это изохорный процесс), а внутренняя энергия уменьшается на 200 Дж. В соответствии с I Началом термодинамики $Q_{34} = \Delta A_{34} + \Delta U_{34} = -200 \text{ Дж}$ – тепло от газа отводится, но не 300 Дж, и утверждение 5 **неверное**. Утверждение 6 **верное**: это практически очевидно, так как по диаграмме видно, что внутренняя энергия газа в конечном состоянии 5 совпадает с его внутренней энергией в начальном состоянии 1.

Ответ: 136.

Задача 10 (3 балла) [идеальный газ, уравнение Менделеева-Клапейрона, работа газа]

Один моль неона, занимающий объем $V_1 = 10 \text{ л}$, изобарически нагревают так, что его объем увеличился до $V_2 = 20 \text{ л}$, а затем изохорически увеличивают его давление до $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. При этом газ совершил работу $A = 0,8 \text{ кДж}$. Определить изменение температуры газа в этом процессе. Ответ выразить в К, округлив до целых.

Подсказка 1: неон совершает работу только в изобарическом процессе.

Подсказка 2: поэтому начальное давление $p_1 = \frac{A}{V_2 - V_1}$.

Подсказка 3: в соответствии с уравнением состояния $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R}$, $T_2 = \frac{p_2 V_2}{R}$.

Решение:

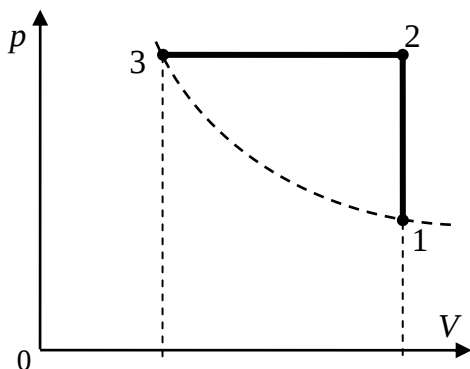
Неон совершает работу только в изобарическом процессе, и $p_1 = \frac{A}{V_2 - V_1}$, и в соответствии с уравнением состояния $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R} = \frac{V_1}{V_2 - V_1} \frac{A}{R}$. При этом $T_2 = \frac{p_2 V_2}{R}$, и поэтому

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1}{R} \left[p_2 V_2 - \frac{V_1}{V_2 - V_1} A \right] \approx 144 \text{ К}.$$

Ответ: 144.

Задача 11 (4 балла) [идеальный газ, внутренняя энергия, количество теплоты]

Один моль одноатомного идеального газа сначала нагрели, а затем охладил до первоначальной температуры $T_1 = 300\text{K}$ (см. диаграмму). В процессе охлаждения объем газа уменьшился в 3 раза. Какое количество теплоты было сообщено газу при нагревании? Ответ укажите в кДж, округлив до сотых.



Подсказка 1: неон совершает работу только в изобарическом процессе.

Подсказка 2: поэтому начальное давление $p_1 = \frac{A}{V_2 - V_1}$.

Подсказка 3: в соответствии с уравнением состояния $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R}$, $T_2 = \frac{p_2 V_2}{R}$.

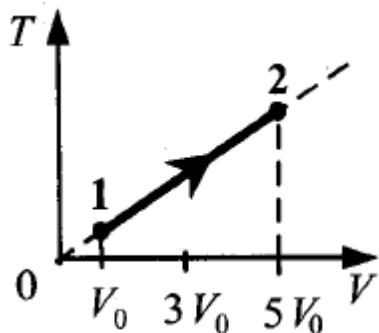
Решение:

Процесс нагревания – изохорный, газ работы не совершает. Поэтому, согласно I Началу термодинамики, сообщенное газу тепло равно изменению его внутренней энергии: $Q_{12} = \Delta U_{12}$. Внутренняя энергия моля одноатомного идеального газа зависит только от его температуры: $U = \frac{3}{2}RT$, и поэтому $Q_{12} = \frac{3}{2}R(T_2 - T_1)$. Процесс охлаждения – изобарный, и температура в нем уменьшается пропорционально объему. Таким образом, $T_2 = 3T_3 = 3T_1$. Значит, $Q_{12} = 3RT_1 \approx 7480\text{Дж}$.

Ответ: 7,48.

Задача 12 (2 балла) [идеальный газ, внутренняя энергия, количество теплоты]

На рисунке изображена диаграмма процесса с 2 молями неона. Начальная температура неона равна 0°C . Какое количество теплоты сообщено неону в этом процессе? Ответ запишите в кДж, округлив до десятых.



Подсказка 1: Изображенный процесс – изобарный (объем растет пропорционально температуре).

Подсказка 2: Согласно I Началу термодинамики, $Q = A + \Delta U$.

Подсказка 3: в соответствии с уравнением состояния $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R}$, $T_2 = \frac{p_2 V_2}{R}$.

Решение:

Прежде всего отметим, что изображенный процесс – изобарный (объем растет пропорционально температуре). Согласно I Началу термодинамики, $Q = A + \Delta U$. В изобарном процессе $A = p\Delta V = 4pV_0$. С учетом уравнения Менделеева-Клапейрона $pV_0 = \nu RT_0$, то есть $A = 4\nu RT_0$. Поскольку неон можно считать одноатомным идеальным газом, то $\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T = 6\nu RT_0$. Значит, $Q = 10\nu RT_0 \approx 45,4 \text{ кДж}$.

Ответ: 45,4.

Задача 13 (4 балла) [идеальный газ, внутренняя энергия, количество теплоты]

С $\nu = 6$ молями разреженного газа в сосуде под поршнем провели два опыта с нагреванием, в ходе которых температура газа увеличивалась на одну и ту же величину ΔT . В первом случае нагревание проводилось при закреплённом поршне, и газу подвели количество теплоты $Q_1 \approx 886 \text{ Дж}$, а во втором – при постоянном давлении – подвели количество теплоты $Q_2 \approx 1240 \text{ Дж}$. Найдите ΔT . Ответ запишите в К, округлив до десятых.

Подсказка 1: Первый процесс – изобарный, и в ходе него теплота идет только на увеличение внутренней энергии газа $Q_1 = \Delta U$.

Подсказка 2: Во втором процессе изменение внутренней энергии точно такое же, поэтому увеличение количества теплоты связано с работой газа: $Q_2 - Q_1 = A = p\Delta V$.

Подсказка 3: В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона при $p = \text{const}$ $p\Delta V = \Delta(pV) = \nu R\Delta T$.

Решение:

Первый процесс – изобарный, и в ходе него теплота идет только на увеличение внутренней энергии газа $Q_1 = \Delta U$. Во втором процессе изменение внутренней энергии точно такое же, поэтому увеличение количества теплоты связано с работой газа: $Q_2 - Q_1 = A = p\Delta V$. В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона при $p = \text{const}$ эта величина

$$Q_2 - Q_1 = p\Delta V = \Delta(pV) = \nu R\Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{Q_2 - Q_1}{\nu R} \approx 7,1 \text{ К}.$$

Комментарий: В этой задаче полезно обратить внимание, что мы не можем найти ΔT только по одной из величин количества теплоты, так как в условии не сказано, что газ, например, одноатомный. В самом деле, в общем случае $Q_1 = \Delta U = \frac{i}{2}\nu R\Delta T$ (где $i = 3, 5, 6$ для одноатомного, двухатомного и многоатомного газов соответственно). Тогда $Q_2 = Q_1 + \nu R\Delta T = \frac{i+2}{2}\nu R\Delta T$. Таким образом, $\frac{i+2}{i} = \frac{Q_2}{Q_1} \approx 1,4$, и можно установить, что для газа из данной задачи $i = 5$, то есть этот газ на самом деле двухатомный!

Ответ: 7,1.

Задача 14 (4 балла) [идеальный газ, внутренняя энергия, работа]

Один моль гелия нагревают таким образом, что его давление растет пропорционально объему. В ходе нагревания плотность гелия уменьшается в $n = 1,5$ раза, и гелий совершает работу $A \approx 830 \text{ Дж}$. Найти начальную температуру гелия в этом процессе. Ответ запишите в К, округлив до целого значения.

Подсказка 1: Если записать уравнение процесса в виде $p = k \cdot V$, то связь температуры с объемом в этом процессе $T = \frac{pV}{R} = \frac{k}{R}V^2$.

Подсказка 2: Уменьшение плотности в n раз при неизменной массе означает увеличение объема во столько же раз: $V_2 = nV_1$.

Подсказка 3: Работа газа равна площади под диаграммой процесса в координатах давление-объем, то есть для данного процесса площади трапеции: $A = \frac{p_2 + p_1}{2}(V_2 - V_1) = \frac{k}{2}(V_2^2 - V_1^2)$.

Решение:

Запишем уравнение процесса в виде $p = k \cdot V$. Тогда, в соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона $T = \frac{pV}{R} = \frac{k}{R}V^2$. Уменьшение плотности в n раз при неизменной

массе означает увеличение объема во столько же раз: $V_2 = nV_1$. Значит, $T_2 = n^2T_1$. Работа газа равна площади под диаграммой процесса в координатах давление-объем, то есть для данного процесса площади трапеции: $A = \frac{p_2 + p_1}{2}(V_2 - V_1) = \frac{k}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{R}{2}(T_2 - T_1)$. Таким образом,

$A = \frac{R}{2}(n^2 - 1)T_1 \Rightarrow T_1 = \frac{2A}{(n^2 - 1)R} \approx 160\text{K}$. Отметим, что конечная температура около 360K, и в

этом диапазоне температур гелий действительно ведет себя практически как идеальный газ.

Ответ: 160.