Понятие о термодинамике. Квазистатические процессы.

Термодинамика — это наука о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического (теплового) равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Систему можно считать **макроскопической**, если она состоит из такого количества структурных элементов, которое сопоставимо с числом Авогадро (например, одна тысячная или одна миллионная числа Авогадро[1]). В частности, любое наблюдаемое невооруженным глазом тело, рассматриваемое как совокупность молекул или атомов, является макроскопической системой. С другой стороны, все население Земли, рассматриваемое как совокупность людей, макроскопической системой не является.

Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов (начал), которые являются обобщением многочисленных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел.

Назовем **изолированной** систему тел, которые не могут обмениваться энергией с окружающими телами.

Нулевое начало термодинамики. Любая изолированная макроскопическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия, в котором прекращаются все макроскопические процессы, т.е. все макроскопические параметры, характеризующие систему, не меняются.

При этом, как уже говорилось в первом задании, по определению считается, что различные части системы, находящейся в термодинамическом равновесии, характеризуются одной и той же температурой. Именно в этом смысле следует понимать утверждение о том, что необходимым условием равновесия является равенство температуры во всех частях системы.

Самопроизвольный процесс перехода изолированной системы в состояние термодинамического равновесия называется **релаксацией**. Длительность этого процесса характеризуется временем релаксации.

Всякое равновесное состояние полностью характеризуется небольшим числом физических параметров состояния (термодинамических параметров). Прежде всего, это уже упоминавшаяся температура. В простейших случаях состояние однородных тел фиксированной массы полностью фиксируется заданием любых двух из трех величин: температуры T, объема V и давления P. Третья величина имеет при этом вполне определенное значение. Связь между P, V и T различна для различных твердых тел, жидкостей и газов и называется **уравнением состояния**. Уравнение состояния идеального газа подробно обсуждалось в первом задании. Для полной характеристики равновесного состояния более сложных систем могут потребоваться и другие параметры. Это могут быть, например, концентрация компонент газовой смеси, напряженность электрического или магнитного полей и т.п.

---

[1] Числом Авогадро называют число атомов, содержащихся в 12 граммах изотопа углерода ^{12}C, оно примерно равно $6{,}02 \cdot 10^{23}$ 1/моль.

Переход системы из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние обычно представляет собой последовательность неравновесных состояний, т.е. является **неравновесным.**

В качестве примера возьмем вертикальный цилиндр с поршнем, который может свободно перемещаться в нем без трения. Пусть в цилиндре находится газ, и поршень удерживается в положении равновесия лежащим на нем грузом. Если снять часть груза или добавить новый груз, то равновесие нарушится. Возникнет достаточно сложное движение газа и колебания поршня с грузом. Через некоторое время все эти движения затухнут, и рассматриваемая система вновь придет в состояние равновесия. Подобные неравновесные процессы очень сложны и требуют для своего описания, вообще говоря, бесконечное множество значений параметров. В частности, в этом случае уже нельзя говорить о давлении или температуре газа в целом – они могут существенно различаться в разных частях цилиндра.

Допустим теперь, что разгрузка или нагрузка поршня идет очень малыми порциями. Для наглядности можно вообразить, что поршень нагружен мелким песком. Снимем или добавим одну песчинку. От этого равновесие нарушится очень мало. Когда оно восстановится (это произойдет спустя время превышающее время релаксации системы) снимем или добавим вторую песчинку. Повторив эту операцию много раз, можно, в конце концов, изменить груз на любую конечную величину. Вместе с грузом изменятся на конечную величину давление газа и другие его параметры.

Процесс, состоящий из последовательности бесконечно малых процессов, каждый из которых лишь ничтожно мало нарушает состояние равновесия системы, называется **квазиравновесным** или **квазистатическим процессом.**

Для мгновенного описания состояния системы, совершающей квазистатический процесс, требуется столько же параметров, сколько и для описания равновесного состояния. Это обусловлено тем, что квазиравновесный процесс состоит из непрерывно следующих друг за другом во времени состояний равновесия. В результате термодинамические исследования таких процессов принципиально упрощаются по сравнению со случаем неквазистатических процессов.

Квазистатические процессы в строгом смысле этого слова никогда не реализуются в природе, но можно реализовать процессы сколь угодно близкие к квазистатическим. Более того, очень многие важные процессы, идущие с конечными скоростями, могут с хорошей точностью считаться квазистатическими. Таковы, например, многие процессы расширения газов в цилиндрах тепловых двигателей или компрессоров.

Макроскопическая работа.

В дальнейшем мы будем обозначать с помощью символа Δ (дельта) произвольное (как малое, так и большое) изменение интересующей нас величины (например, ΔK обозначает некоторое произвольное изменение величины K), а с помощью символа d – только такое изменение интересующей нас величины, которое в условиях данной задачи можно считать очень малым (например, dK). В случае, когда для рассматриваемой величины некорректно говорить об ее изменении (например, нельзя сказать «изменение работы», говорят – «совершенная работа»), то для указания на малость такой величины мы будем использовать символ δ. Например, запись δA подчеркивает, что в рассматриваемом случае совершена очень малая работа. Если же используется просто символ А, то значит для нас не принципиально какая (малая или большая) работа была совершена в данном случае.

Рассмотрим снова газ в цилиндре с поршнем. Вычислим **элементарную** (очень малую) работу, совершаемую газом при очень малом квазистатическом расширении. Пусть при таком расширении поршень поднимается на малое расстояние dx. Тогда объем газа увеличивается на малую величину $dV = S\cdot dx$, где S – площадь поршня (и поперечного сечения цилиндра). Поскольку изменение объема очень мало, то давление газа P и силу давления газа на поршень $F=P\cdot S$ можно считать практически постоянными величинами. И, следовательно, можно легко рассчитать малую работу силы давления газа в этом процессе:

$$\delta A = F\cdot dx = P\cdot S\cdot dx = P\cdot dV \qquad (1)$$

Можно доказать, что формула (1) справедлива не только в случае изменения объема газа в цилиндре, но и в общем случае малого изменения объема любого тела, все части поверхности которого находятся под одинаковым давлением.

Механическая работа сил давления при произвольном перемещении поршня (или поверхности тела) равна сумме элементарных работ (1) при малых промежуточных перемещениях поршня, составляющих интересующий нас конечный процесс.

В случае изобарического квазистационарного процесса, т.е. процесса при постоянном давлении, в результате такого суммирования мы получим, что работа газа

$$A = P\cdot\Delta V, \qquad (2)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ — полное изменение объема системы на протяжении всего процесса. На P – V диаграмме такой процесс будет изображаться отрезком АВ горизонтальной прямой P = const. Из (2) видно, что величина работы в этом процессе будет пропорциональна площади прямоугольника, заключенного между отрезком АВ и осью объемов V. Модуль коэффициента пропорциональности зависит только от масштаба, используемого при построении диаграммы, а знак — от того расширяется (+) или сжимается (–) газ.

Если процесс не изобарический, то на P – V диаграмме он будет изображаться некоторой линией АВ. Можно показать, что и в этом случае величина работы в процессе будет пропорциональна **площади криволинейной трапеции**, заключенной между линией АВ и осью объемов V (линия АВ выступает в качестве боковой стороны такой криволинейной трапеции).

Пример 1. В нижней части цилиндрического сосуда при нормальных условиях заключен воздух. Воздух закрыт невесомым поршнем, который может свободно скользить вдоль стенок сосуда. Первоначальный объем воздуха V_0 = 1 м^3. Воздух под поршнем нагревают на Δt = 5 °С. Найти работу, которую совершает расширяющийся воздух, перемещая поршень.

Решение. Расширение газа происходит при постоянном давлении P_0, поэтому мы можем воспользоваться формулой (5): $A = P_0\cdot(V - V_0)$, где V – конечный объем воздуха под поршнем. С другой стороны, мы можем записать уравнения Клайперона-Менделеева для начального и конечного состояний воздуха под поршнем: $P_0\cdot V_0 = \nu\cdot R\cdot T_0$, $P_0\cdot V = \nu\cdot R\cdot(T_0$

+ ΔT), где ν – число молей воздуха под поршнем, а T_0 – его начальная температура. Вычитая из второго уравнения первое, получим формулу, полезную для расчета работы, совершаемой в **изобарическом** процессе (эта формула справедлива только в этом случае!):

$$A = \nu \cdot R \cdot \Delta T. \qquad (2.1)$$

Число молей воздуха найдем из уравнения Клайперона-Менделеева, записанного для его начального состояния: $\nu = P_0 \cdot V_0 / R \cdot T_0$, где по условию задачи $T_0 = 273$ K, $P_0 = 1{,}01 \cdot 10^5$ Па (нормальные условия). Можно также воспользоваться законом Авогадро – при нормальных условиях один моль любого газа занимает объем $V_A = 22{,}4\ 10^{-3}$ м^3. Следовательно, в нашем случае число молей $\nu = V_0/V_A$. Кроме того, как известно изменения температуры, измеренные по школе Кельвина и по шкале Цельсия, численно совпадают. В результате окончательно имеем $A = P_0 \cdot V_0 \cdot \Delta T / T_0 = R \cdot \Delta T \cdot V_0 / V_A = 1{,}85$ кДж.

Следует иметь в виду, что работа А не определяется заданием начального и конечного состояния системы. Ее величина зависит также от способа перехода системы из начального состояния в конечное состояние. Про такие величины говорят, что «они не являются **функциями состояния**». Напротив, величины, имеющие вполне определенные значения в каждом состоянии системы, называются функциями состояния. Одной из таких величин является внутренняя энергия системы (см. ниже).

Если в результате изменений система вернулась в исходное состояние, то говорят, что она совершила **круговой процесс** или **цикл**. Такой процесс, если он квазистатический, на P – V диаграмме изображается замкнутой кривой (неквазистатический процесс не может быть изображен на P – V диаграмме). Работа, совершенная системой в круговом процессе, пропорциональна площади цикла. При этом, если точка, изображающая состояние системы, описывает цикл по часовой стрелке, то работа системы положительна. Если же цикл проходит в направлении против часовой стрелки, то она отрицательна.

Пример 2. Один моль идеального газа расширяется из состояния 1 в состояние 2, увеличивая свой объем в n = 2,5 раза. При этом давление газа линейно зависит от его объема, а температура в состоянии 2 равна температуре в состоянии 1: $T_1 = T_2 = T$. Затем газ изобарически сжимается до исходного объема, переходя в состояние 3. Из состояния 3 газ изохорически переводится в исходное состояние. Какую работу совершил газ за цикл.

Решение. На P – V диаграмме данный цикл будет изображаться прямоугольным треугольником с катетами $(P_1 – P_3)$ и $(V_2 – V_3)$. Здесь и далее P_i и V_i – давление и объем в i–ом состоянии газа (i = 1,2,3). Работа газа за цикл будет положительной и равна $A = 0{,}5 \cdot (P_1 - P_3) \cdot (V_2 - V_3)$. При этом по условию $V_2 = n \cdot V_1$, $V_3 = V_1$, $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \nu \cdot R \cdot T$, $P_3 = P_2$. Поэтому $A = 0{,}5 \cdot (P_1 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_3 - P_3 \cdot V_2 + P_3 \cdot V_3) = 0{,}5 \cdot (P_1 \cdot (n \cdot V_1) - P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2 + P_2 \cdot (V_2/n)) = 0{,}5 \cdot R \cdot \nu \cdot (n \cdot T - T - T + T/n) = 0{,}5 \cdot R \cdot T \cdot \nu \cdot (n - 2 + 1/n) = 0{,}45 \cdot \nu \cdot R \cdot T$, где по условию $\nu = 1$.

В случае квазистатических процессов внутреннее давление газа всегда равно внешнему давлению (т.е. давлению внешних сил на поверхность системы), поскольку только в этом случае процесс может идти очень медленно и быть квазиравновесным. А поскольку внутренние и внешние силы давления направлены в противоположные стороны, то работы этих сил равны по модулю и противоположны по знаку:

$$A_{внеш} = - A \qquad (3)$$

Соотношение (3) остается также справедливым и для работ, совершенных системой и над системой, в случае неквазистационарных процессов, но при условии, что начальное и конечное состояние системы является равновесным.

Внутренняя энергия.

Как известно, в механике различают кинетическую энергию движения тела как целого, потенциальную энергию тел во внешних силовых полях и потенциальную энергию взаимодействия тел между собой. В курсе механики доказывается, что полная механическая энергия изолированной системы тел сохраняется, только в том случае, когда работа неконсервативных сил (например, сил трения) равна нулю. В остальных случаях механическая энергия изолированной системы уменьшается. С атомистической точки зрения несохранение механической энергии объясняется тем, что макроскопическая механика учитывает не все движения и силовые взаимодействия. Из ее поля зрения ускользают внутренние движения атомов и молекул, а также работа сил взаимодействия между ними.

Внутренней энергией термодинамической системы называется сумма кинетической энергии хаотического теплового движения составляющих ее частиц (атомов или молекул) относительно центра масс тела, потенциальной энергии взаимодействия этих частиц, а также внутренней энергии самих частиц.

Кинетическая и потенциальная энергии тела, как целого, во внутреннюю энергию тела естественно не входят. При этом оказывается, что внутренняя энергия любой термодинамической системы является функцией ее состояния. Иными словами, если термодинамическая система в результате любого процесса возвращается в исходное состояние, то ее внутренняя энергия не изменяется.

В первом задании говорилось о том, что идеальным газом называется газ, уравнением состояния которого является уравнение Клайперона-Менделеева. На самом деле существует несколько эквивалентных определений идеального газа. В частности, с точки зрения молекулярно-кинетической теории газ называют идеальным, если он удовлетворяет следующим условиям:

1) объемом всех молекул газа можно пренебречь по сравнению с объемом, занимаемым газом;

2) молекулы взаимодействуют между собой только при непосредственном соприкосновении (столкновении), при этом они отталкиваются; причем время столкновения молекул друг с другом пренебрежимо мало по сравнению со временем между двумя столкновениями. Иными словами средней потенциальной энергией взаимодействия молекул идеального газа можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией.

Можно доказать, что при изменении температуры ν молей **одноатомного идеального газа** на ΔT изменение его внутренней энергии равно

$$\Delta U = \frac{3}{2}\cdot\nu\cdot R\cdot\Delta T. \tag{4}$$

В случае идеального газа, молекулы которых содержат по два или более атомов, справедливы аналогичные формулы, но с другими числовыми коэффициентами (больше, чем $\frac{3}{2}$).

Количество теплоты. Первое начало термодинамики.

Изменять состояние системы (и, следовательно, и ее внутреннюю энергию) можно двумя принципиально различными способами: путем совершения макроскопической работы и без совершения такой работы.

Процессы, вызывающие изменение внутренней энергии системы без совершения макроскопической работы, называются **тепловыми процессами** или **теплообменом**.

Количеством теплоты Q, полученным телом в результате **теплообмена** с окружающей средой, называется взятое с обратным знаком изменение внутренней энергии окружающей среды, произошедшее в рассматриваемом процессе. Если $Q > 0$, то говорят, что тело получает тепло, если $Q < 0$ — отдает тепло.

В сущности, изменение внутренней энергии тела во время теплообмена также обусловлено работой внешних сил. Но это не макроскопическая работа, связанная с изменением макроскопических параметров (например, объема). Эта работа является микроскопической в том смысле, что складывается из работ, производимых молекулярными силами, с которыми на молекулы и атомы тела действуют молекулы и атомы окружающей среды. Так, при приведении тела в контакт с горячим газом, передача внутренней энергии от газа к телу осуществляется посредством столкновений молекул газа с молекулами тела.

Из определения количества теплоты следует, что в системе СИ она измеряется в джоулях (как энергия). Однако до сих пор иногда используется и внесистемная единица измерения количества теплоты – *калория*.

Калорией называется такое количество теплоты, которое должен получить 1 грамм воды при нормальном атмосферном давлении, чтобы нагреться на один градус (от 19,5 °С до 20,5 °С). Соотношение между джоулем (Дж) и калорией по историческим причинам называют механическим эквивалентом теплоты. Оно было установлено английским физиком Джеймсом Пре́скоттом Джо́улем опытным путем: 1 калория = 4,18 Дж.

Основные способы передачи теплоты: теплопроводность, конвекция и излучение. В реальных процессах они могут комбинироваться.

В общем случае, однако, тепловые процессы протекают одновременно с совершением макроскопической механической работы. В этом случае изменение внутренней энергии термодинамической системы можно найти, пользуясь **первым началом термодинамики:** изменение внутренней энергии термодинамической системы ΔU равно сумме количества полученной системой теплоты Q и работы $A_{внеш}$ внешних сил

$$\Delta U = Q + A_{внеш}. \tag{5}$$

Данная формулировка справедлива, если механическая энергия E тела, как целого, не меняется. Если это не так, то необходимо пользоваться **более общей формулировкой первого начала термодинамики**: суммарное изменение механической ΔE и внутренней

ΔU энергии термодинамической системы равно сумме количества полученной системой теплоты Q и работы $A_{внеш,\ непотенц}$ внешних непотенциальных сил

$$\Delta U + \Delta E = Q + A_{внеш,\ непотенц}. \qquad (6)$$

Вместо работы $A_{внеш}$, совершаемой внешними силами над термодинамической системой, часто удобнее бывает рассматривать работу A, совершенную термодинамической системой над внешними телами. Как уже указывалось выше (см. (3)) $A_{внеш} = -A$ для любых, в том числе и неравновесных процессов, связывающих два равновесных состояния. Поэтому для таких случаев соотношение (5) можно переписать в виде:

$$Q = \Delta U + A \qquad (7)$$

— количество теплоты, полученное термодинамической системой, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение системой работой.

Пример 3. В двух теплоизолированных баллонах содержатся одинаковые одноатомные идеальные газы. В первом баллоне объемом V_1 газ под давлением P_1 имеет температуру T_1, во втором баллоне объемом V_2 газ под давлением P_2 имеет температуру T_2. Баллоны соединены между собой трубкой с краном. Какая температура газа установится в баллонах, если кран открыть? Теплоемкостью баллонов и объемом соединительной трубки пренебречь.

Решение. Из уравнений состояния газов в каждом из сосудов до открытия крана найдем число молей газов этих сосудах: $\nu_1 = P_1 \cdot V_1/R \cdot T_1$, $\nu_2 = P_2 \cdot V_2/R \cdot T_2$. Поскольку сосуды теплоизолированные и внешние силы не совершают над газами в сосудах работы, то согласно первому началу термодинамики суммарная внутренняя энергия газов в двух сосудах не меняется: $\frac{3}{2} \cdot \nu_1 \cdot R \cdot (T - T_1) + \frac{3}{2} \cdot \nu_2 \cdot R \cdot (T - T_2) = 0$, где T – температура газа, которая установится в баллонах после открытия крана. Отсюда $T = (\nu_1 \cdot T_1 + \nu_2 \cdot T_2)/(\nu_1 + \nu_2) = (P_1 \cdot V_1 + P_2 \cdot V_2)T_1 \cdot T_2/(P_1 \cdot V_1 \cdot T_2 + P_2 \cdot V_2 \cdot T_1)$.

Пример 4. Моль идеального газа нагревается при постоянном давлении, а затем при постоянном объеме переводится в состояние с температурой, равной начальной $T_0 = 300$K. Оказалось, что в итоге газу сообщено количество теплоты Q = 5 кДж. Во сколько раз изменился объем, занимаемый газом?

Решение. Поскольку конечная и начальная температура идеального газа совпадают, то его внутренняя энергия в результате совершения двух процессов не изменяется. Следовательно, по первому началу термодинамики количество теплоты, сообщенное газу, равно совершенной газом работе. Поскольку в изохорическом процессе работа не совершается, то $Q = A = P_0 \cdot (V - V_0) = P_0 \cdot (n - 1) \cdot V_0$, где V_0 и $V = n \cdot V_0$ – начальный и конечный объемы газа, соответственно. Но по уравнению Клайперона-Менделеева $P_0 \cdot V_0 = \nu \cdot R \cdot T_0$. Поэтому окончательно имеем $n = 1 + Q/(\nu \cdot R \cdot T_0)$, где по условию $\nu = 1$.

Современная жизнь человека невозможна без использования различных машин. Основным их общим свойством является способность совершать работу. Многие изобретатели в прошлом пытались построить машину, способную совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Машину с такими свойствами называют **вечным двигателем первого рода**. Все эти попытки окончились неудачей, что является серьезным подтверждением первого начала термодинамики. Ведь согласно (7)

$$A = Q - \Delta U, \tag{8}$$

Т.е. любая машина может совершать работу над внешними телами только за счет получения извне некоторого количества теплоты или изменения ее внутренней энергии. Иными словами, согласно первому началу термодинамики вечного двигателя первого рода существовать не может!

Теплоемкость

Теплоемкостью $C_т$ тела (или системы) называется отношение малого количества теплоты δQ, полученного телом, к соответствующему малому изменению его температуры dT:

$$C_т = \delta Q/dT. \tag{9}$$

Единицей измерения теплоемкости в СИ является Дж/К.

Удельной теплоемкостью $C_{уд}$ называется отношение теплоемкости тела $C_т$ к его массе m:

$$C_{уд} = C_т/m = \delta Q/(m \cdot dT). \tag{10}$$

Если удельная теплоемкость не зависит от температуры тела или слабо от нее зависит, из определения удельной теплоемкости следует формула

$$\delta Q = C_{уд} \cdot m \cdot (T_2 - T_1), \tag{11}$$

для подсчета количества теплоты, необходимого для нагревания тела от температуры T_1 до температуры T_2.

Молярной теплоемкостью вещества C называется отношение теплоемкости тела $C_т$ к количеству молей вещества ν, содержащегося в теле:

$$C = C_т/\nu = \delta Q \cdot \mu/(m \cdot dT), \tag{12}$$

где μ — молярная масса вещества.

При расчете теплоемкости следует иметь в виду, что нагревание тела на одно и то же количество градусов может потребовать различного количества теплоты в зависимости от способа нагрева. Это связано с первым началом термодинамики: часть сообщаемого телу количества теплоты может идти на совершении системой работы. Поэтому **теплоемкость — характеристика не только вещества, но и процесса, который происходит с веществом.** Для одной и той же системы теплоемкость может принимать самые разные значения в зависимости от того, какой именно процесс совершается над системой.

Проиллюстрируем это утверждение расчетом молярной теплоемкости идеального газа для изобарического и изохорического процессов.

Пусть в некотором процессе идеальный газ, первоначально имевший давление P, изменил свою температуру, объем и внутреннюю энергию на малые величины dT, dV и dU, соответственно. Тогда его работу можно рассчитать по формуле (1), а количество теплоты δQ, необходимое для осуществления этого процесса, — по формуле (7). В результате получим:

$$\delta Q = dU + PdV. \quad (13)$$

Следовательно, в силу (12) молярную теплоемкость идеального газа в рассматриваемом процессе можно найти по формуле

$$C = \delta Q/(\nu \cdot dT) = dU/(\nu \cdot dT) + PdV/(\nu \cdot dT). \quad (14)$$

Пусть в процессе нагрева идеального газа его объем остается постоянным (изохорический нагрев). В этом случае говорят о **молярной теплоемкости при постоянном объеме и обозначают ее C_v**. Из (13) при dV=0 имеем:

$$C_v = dU/(\nu \cdot dT). \quad (15)$$

Учитывая (4), для одноатомного идеального газа получим, что $C_v = 3 \cdot R/2$.

Если же в процессе остается постоянным давление (изобарический нагрев), то говорят о **молярной теплоемкости при постоянном давлении и обозначают ее C_p**. В этом случае в силу уравнения Клайперона-Менделеева $P \cdot dV = \nu \cdot R \cdot dT$ и, следовательно, с учетом (15), формула (14) может быть записана в виде:

$$C_p = C_v + R. \quad (16)$$

Соотношение (16) называется **формулой Майера**. Она справедлива для любого идеального газа.

Пример 5. Насколько изменилась внутренняя энергия моля гелия в процессе изобарного расширения, если ему сообщили Q = 30 кДж тепла? Найдите работу, совершенную при этом гелием.

Решение. Работа в изобарном процессе $A = \nu \cdot R \cdot \Delta T$, где $\nu = 1$ – число молей гелия, ΔT – изменение его температуры. С другой стороны, по определению $Q = C_p \cdot \nu \cdot \Delta T$, где C_p – молярная теплоемкость газа при постоянном давлении. По формуле Майера $C_p = C_v + R$, где C_v – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Гелий одноатомный газ, поэтому $C_v = 3R/2$. Таким образом, $A = R \cdot Q/(R + 3R/2) = 2 \cdot Q/5 = 12$ кДж.

Контрольные вопросы

1. В цилиндре при t = 20 °С находится m = 2 кг воздуха под давлением P = 10 МПа. Определить работу воздуха при его изобарном нагревании на $\Delta t = 100$ °С. Молярная масса воздуха $\mu = 29$ г/моль.

2. Над идеальным газом провели два цикла 1–2–5–6–1 и 2–3–4–5–2. При этом на P – T диаграмме отрезки 1–6, 2–5 и 3–4 параллельны оси T, а продолжения отрезков 1–3 и 6–4 проходят через начало координат, $T_6 > T_1$, $P_2 = (P_1+P_3)/2$. Сравните работы, совершенные газом в этих циклах. Ответ обоснуйте.

3. Имеются порция гелия, находящаяся при температуре T_1, давлении P_1 и занимающая объем V_1, и порция аргона с соответствующими параметрами T_2, P_2 и V_2. Оба газа нагревают на одну и ту же температуру ΔT. Найдите отношение изменений их внутренних энергий, считая оба газа идеальными.

4,5. Идеальный газ нагревают от температуры T_1 до температуры T_2 сначала при давлении P_1, а затем при давлении P_2. В каком процессе газ совершит большую работу и во сколько раз? В каком случае для этого потребуется большее количество теплоты и во сколько раз?

6. Над идеальным газом совершен цикл 1–2–3–4. На участке 1–2 процесс изохорический, давление газа увеличивается, на участке 2–3 – изобарический, объем газа возрастает, 3–4 – изотермический и на участке 4–1 изобарический. Изобразите этот цикл на P – V, P – T и V – T диаграммах. На каких участках идеальный газ получает теплоту, а на каких отдает? Ответ обоснуйте.
7. Насколько изменилась температура моля гелия, если в процессе изобарного расширения ему сообщили Q = 30 кДж тепла?

Контрольные задачи

1. Масса m идеального газа, имевшего температуру T, охлаждается при постоянном объеме так, что давление газа падает в n раз. Затем газ нагревают при постоянном давлении до первоначальной температуры T. Найдите совершенную газом работу, если его молярная масса M.
2. С одним молем идеального газа проводят замкнутый процесс 1–2–3–4–1, состоящий из двух изохор (1–2 и 3–4) и двух изобар (2–3 и 4–1), причем точки 2 и 4 лежат на одной изотерме. Температуры в точках 1 и 3 равны, соответственно T_1 и T_3. Определить работу, совершенную газом за цикл.
3. Над молем идеального одноатомного газа проводится не замкнутый процесс 1–2–3–4, состоящий из двух изобар (1–2 и 3–4) и участка 2–3, изображающегося на P – T диаграмме отрезком прямой, проходящей через начало координат. Температуры в точках 1 и 3, а также 2 и 4 равны. Определить подведенное к газу тепло, если разность конечной и начальной температур $T_4 - T_1 = 100$ K.
4. Теплоизолированный сосуд разделен неподвижной перегородкой на две части. В одной части объемом V находится гелий при давлении $2 \cdot P$ и температуре $2 \cdot T$. В другой части объемом $2 \cdot V$ – азот при давлении P и температуре T. Перегородку вытаскивают. Какие температура и давление установятся в сосуде? Молярная теплоемкость азота при постоянном объеме равна $5 \cdot R/2$.
5. Идеальный газ переводят из состояния 1 в состояние 2 один раз по изобаре, затем по изохоре, второй раз сначала по изохоре, затем по изобаре. При каком переходе выделилось больше тепла и насколько, если $p_1 = 400$ кПа, $V_1 = 3$ м^3, $p_2 = 200$ кПа, $V_2 = 1$м^3?
6. Для нагревания некоторого количества кислорода при постоянном давлении на $\Delta T = 10$K потребовалось количество теплоты $\Delta Q_1 = 7$ Дж. Чтобы охладить газ до исходной температуры при постоянном объеме необходимо от него отнять $\Delta Q_2 = 5$ Дж. Найти массу газа m.
7. В цилиндре под поршнем находится некоторая масса воздуха. На его нагревание при постоянном давлении затрачено количество теплоты Q = 5 кДж. Найти работу газа в этом процессе, если его удельная теплоемкость $C_p = 1$кДж/кг·град, а молярная масса $\mu = 29$г/моль.