

Молекулярная физика

Молекулярная физика и термодинамика

В изучении свойств вещества существует два подхода.

Молекулярная физика использует **статистический подход**, основывающийся на **молекулярно-кинетической теории**, в соответствии с которой все тела состоят из огромного числа атомов и молекул, находящихся в непрерывном хаотическом (тепловом) движении. Атомы и молекулы взаимодействуют между собой, притягиваясь на больших расстояниях и отталкиваясь на маленьких расстояниях.

Термодинамический подход изучает свойства веществ в целом, не привлекая сведений об их строении. Он устанавливает связи между макроскопическими экспериментально определяемыми параметрами состояния (температура, давление, внутренняя энергия и т. д.), базируясь на нескольких фундаментальных законах, называемых началами термодинамики. Обе теории взаимно дополняют друг друга.

Молекулярная физика

• Молекулярно-кинетическая теория.

• Масса атомов и молекул определяется в атомных единицах массы (а. е. м.) ($1/12$ массы изотопа углерода C_{12}). Макроскопическая масса различных веществ измеряется в молях и киломолях. **1 моль (1 киломоль)** – количество вещества, масса которого численно равна массе его атома или молекулы, выраженной в граммах (килограммах). Для кислорода, масса молекулы которого равна 32 а. е. м., 1 моль равен 32 г, а – 1 киломоль – 32 кг. В одном моле вещества содержится количество атомов или молекул, равное числу Авогадро.

• Температура

• При соприкосновении двух нагретых тел в результате теплового движения атомов и молекул происходит передача энергии от более нагретого к менее нагретому телу до тех пор, пока не наступает тепловое равновесие. Характеристикой степени нагретости тел служит температура T , которая определяется следующим соотношением

Молекулярная физика

$$\varepsilon_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{мб}} \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Где $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$ - кинетическая энергия поступательного движения молекулы массой m_0 , Дж/К - постоянная Больцмана, $v_{\text{кв}}$ - средняя квадратичная скорость молекулы.

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}, \langle v_{\text{кв}} \rangle \quad \text{- среднее значение квадрата скорости}$$

движения молекулы. Измерять температуру в джоулях неудобно, в связи с малой величиной кинетической энергии молекулы и сложностью ее определения. Поэтому принято измерять температуру в градусах абсолютной шкалы температуры – кельвинах, ноль которой соответствует прекращению теплового движения. Наряду со шкалой Кельвина используется шкала Цельсия, где за 0° принимается точка замерзания воды, а за 100° – точка ее кипения. Абсолютная температура замерзания воды $273,15^\circ \text{ K}$, поэтому для перевода градусов Цельсия в градусы Кельвина пользуются соотношением $T = 273,15 + t_c$

Молекулярная физика

• Давление.

• При столкновении со стенками сосуда молекулы газа оказывают на них давление, передавая им определенный импульс. Изменение импульса определяет величину действующей на стенку силы.

Давлением p называется сила F действующая на единицу площади поверхности сосуда

$$p = \frac{F}{S}$$

• В системе СИ давление измеряется в паскалях: $\text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Наряду с этим используется внесистемная единица давления - атмосфера, определяемая как сила в 1 кГ, действующая на площади в 1 см^2 и миллиметры ртутного столба

$$1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

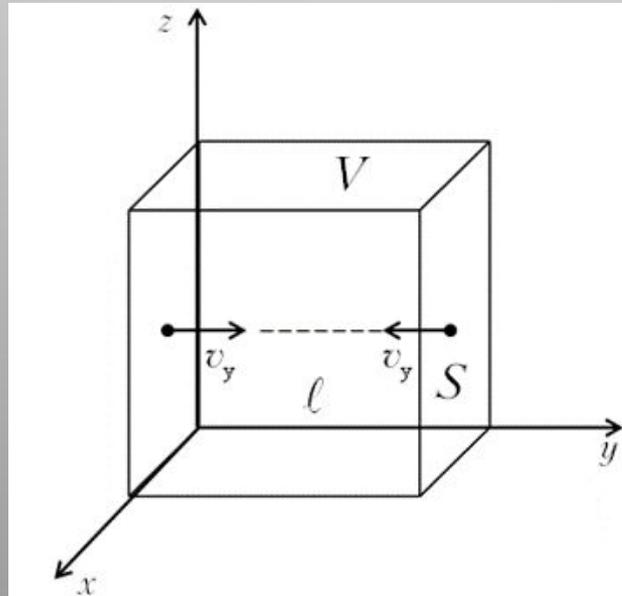
Идеальный – газ, взаимодействием между молекулами которого можно пренебречь (за исключением момента их соударения).

Молекулы идеального газа рассматриваются как материальные точки, не имеющими объема.

Молекулярная физика

Рассмотрим движение молекулы идеального газа вдоль оси y в объеме V (Рис) При каждом ударе о стенку сосуда S она передает ему импульс, равный $m_0 v_y - (-m_0 v_y) = 2m_0 v_y$. После удара молекула долетит до противоположной стенки сосуда на расстоянии ℓ , отразится и вновь ударит о стенку через время $\Delta t = 2\ell/v_y$. Она подействует на стенку с силой f , равной

$$f = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_y v_y}{2\ell} = \frac{m_0 v_y^2}{\ell}.$$



Тепловое движение молекул

Молекулярная физика

Полная сила, действующая на стенку со стороны всех N молекул, находящихся в сосуде, равна

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{m_0 v_{iy}^2}{\ell} = \frac{m_0}{\ell} \sum_{i=1}^N v_{iy}^2 = \frac{m_0}{\ell} N \frac{\sum_{i=1}^N v_{iy}^2}{N} = \frac{m_0}{\ell} N \langle v_y^2 \rangle$$

Т.к. движение молекул хаотично, то все направления равноценны и

$$m_0 v_x^2 = m_0 v_y^2 = m_0 v_z^2 = 1/3 m_0 v^2$$

Тогда на дно и любую стенку сосуда со стороны N молекул действует сила

$$F = \frac{m_0}{3\ell} N \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{V} S \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} m_0 n S \langle v^2 \rangle,$$

где $n = \frac{N}{V}$ - число молекул в единице объема. Отсюда

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$$

• Полученное соотношение называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории. Используя определение

Молекулярная физика

температуры, получим основное уравнение МКТ в форме Больцмана $p = nkT$. Если преобразовать уравнение

$$pV = NkT = \frac{N}{N_A} N_A kT = \nu RT,$$

то получим уравнение Клапейрона-Менделеева $pV = \nu RT$,

где ν - число молей. $R = kN_A$ - универсальная газовая постоянная.

• **Закон Дальтона:** давление p смеси газов равно сумме давлений каждого из газов, которое он производил бы, занимая весь объем

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

Примеры решения задач

Задача 54. В сосуде объемом $V = 400 \text{ см}^3$ содержится некоторый газ при температуре 10°C . Найдите насколько повысится давление Δp , если в сосуд добавить $N_0 = 10^{19}$ молекул.

Решение. Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории для конечного $p_2 = \frac{N + N_0}{V} kT$ и начального

Молекулярная физика

состояний $p_1 = \frac{N}{V} kT$. Вычитая из первого выражения второе,

получим:
$$\Delta p = \frac{N_0}{V} kT = \frac{10^{19}}{400 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 283 = 97,6$$

Задача 55. Баллон, вместимостью 20 л, содержит смесь водорода и азота при температуре 290 К и давлении 1 Мпа. Найдите массу водорода, если масса смеси равна 200 г, молярная масса водорода 2 г/моль, молярная масса азота 28 г/моль.

Решение. По закону Дальтона давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{а}} = \left(\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} \right) \frac{RT}{V},$$

Откуда $\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m - m_{\text{в}}}{M_{\text{а}}} = \frac{pV}{RT}$ и масса водорода равна 2,51 г.

Задача 56. Найдите давление газа в сосуде, если его плотность равна 0,1 кг/м³, а средняя квадратичная скорость $v_{\text{кв}} = 500$ м/с.

Молекулярная физика

Решение. Из уравнения Клапейрона – Менделеева давление

равно

$$p = \frac{mRT}{VM} = \frac{\rho RT}{M}$$

Средняя квадратичная скорость определяется выражением

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

и

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \frac{\rho v_{\text{кв}}^2}{3} = 8333,3 \text{ Па.}$$

Задача 57. Как и во сколько раз изменится средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при уменьшении его объема в 3 раза и увеличении давления в 6 раз.

Решение. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории в форме Больцмана имеем $p = \frac{N}{V} \frac{2}{3} \langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle$, где N – число

молекул газа, $\langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle$ – средняя кинетическая энергия одной

Молекулярная физика

откуда
$$\frac{\langle \varepsilon_{\text{кин}2} \rangle}{\langle \varepsilon_{\text{кин}1} \rangle} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = 2.$$

Задача 58. Баллон, вместимостью 20 л содержит смесь водорода и азота при температуре 290К и давлении 1Мпа. Найти массу водорода, если масса смеси равна 200 г, молярная масса водорода 2г/см³, молярная масса азота 28 г/см³.

Решение. По закону Дальтона давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{а}} = \left(\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} \right) \frac{RT}{V},$$

откуда
$$\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m - m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} = \frac{pV}{RT}$$
 и масса водорода равна 2,51г.

Задача 59. В сосуде объемом 5 л находится кислород, концентрация молекул которого равна $9,41 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Найдите массу газа.

Решение. Из уравнения Клапейрона-Менделеева
$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Молекулярная физика

находим $m = \frac{pVM}{RT} = \frac{nkTVM}{RT} = \frac{nVM}{N_A} = 0,25$.

Задача 60. Найдите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы идеального газа, если при давлении 200 кПа концентрация молекул этого газа равна $5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$

Решение. Запишем основное уравнение молекулярно-

кинетической теории $p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$, откуда

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3p}{2n} = 4,1 \cdot 10^{-21}$$

Задача 61. В сосуде при 400 К содержится смесь 16 г кислорода и 42 г азота, которые создают давление 166 кПа. Найдите плотность этой газовой смеси.

Решение. Из уравнения Клапейрона-Менделеева и закона Дальтона получим $p = p_a + p_k = (v_a + v_k) \frac{RT}{V}$, где p_a, p_k, v_a, v_k - давление

Молекулярная физика

и число молей азота и кислорода соответственно. Тогда плотность смеси равна:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_a + m_k)p}{(\nu_a + \nu_k)RT} = 1,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$