

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Существуют физические явления, которые невозможно объяснить с помощью изученных ранее законов классической механики. Например, переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, явление теплопередачи при контакте тел с разной степенью нагрева, совершение механической работы за счет тепла, изменение физических свойств вещества при изменении температуры и многие другие.

Все перечисленные явления имеют общий признак: они зависят от степени нагрева вещества, то есть от температуры, и называются *тепловыми явлениями*.

Для изучения тепловых явлений используются два взаимно дополняющих метода: *молекулярно-кинетическая теория*, или *статистическая физика*, и *термодинамика*.

Макроскопические тела, тепловые свойства которых рассматриваются в молекулярно-кинетической теории и термодинамике, состоят из очень большого числа атомов и молекул.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Последние являются микроскопическими составляющими, которые определяют тепловые свойства тел. Для описания термодинамических явлений одновременно были разработаны две теории.

Молекулярно-кинетическая теория изучает тепловые свойства различных физических систем, исходя из их микроскопической структуры, т.е. рассматривая как системы атомов и молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Микроскопические параметры исследуемых систем (масса атомов и молекул, скорость, импульс и их средняя энергия) определяют их макроскопические параметры.

Термодинамика изучает тепловые свойства физических систем с макроскопической точки зрения, т.е. без учета их внутренней атомно-молекулярной структуры.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В этом случае устанавливаются количественные соотношения между непосредственно наблюдаемыми величинами (давлением, объемом, температурой и т.д.), а с их помощью исследуется взаимодействие и обмен энергией между телами анализируемой системы и окружающей средой.

Тело или группу изучаемых макроскопических тел называют *термодинамической системой*. Входящие в эту систему тела могут взаимодействовать как между собой, так и с окружающими систему телами.

По характеру взаимодействия с внешней средой термодинамические системы подразделяются на:

- **открытые системы** – системы, в которых происходит обмен с внешней средой веществом и энергией.
- **закрытые системы** – системы, в которых нет обмена веществом с внешней средой, но может быть обмен энергией.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

– *изолированные (замкнутые) системы* – системы, в которых не происходит обмена энергией и веществом с окружающей средой.

Совокупность свойств системы молекул на данный момент времени определяет *состояние* системы. Измеряемые физические величины, описывающие конкретное состояние системы и характеризующие её свойства, называются *параметрами состояния*.

Выражение, устанавливающее связь между параметрами состояния, называется *уравнением состояния*.

Переход системы молекул из одного состояния в другое через ряд промежуточных состояний называется *термодинамическим процессом* или *превращением*.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В основе молекулярно-кинетической теории вещества лежат следующие положения, подтвержденные опытом:

- ✓ вещество состоит из частиц;
- ✓ частицы вещества непрерывно и беспорядочно движутся;
- ✓ частицы взаимодействуют друг с другом.

Дискретная структура вещества характеризуется *количеством вещества*, которое содержит столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C и называется *молем*.

Это число атомов или молекул одинаково для любого вещества и называется *числом (постоянной) Авогадро* ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$).

Количеством вещества ν называется число молей вещества, содержащегося в данном теле.

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad \nu = \frac{N}{N_A}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В молекулярной физике, как и в механике, неизбежно использование моделей, упрощенно представляющих структуру вещества. Простейшей моделью газа является *модель идеального одноатомного газа*, которая описывается следующим образом:

- молекулы (атомы) представляют собой материальные точки, то есть их размеры пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями между ними;
- межмолекулярные силы при движении отдельных молекул между соударениями отсутствуют, поэтому молекулы (атомы) движутся от соударения до соударения прямолинейно и равномерно;
- столкновения молекул (атомов) между собой и со стенками сосуда, в котором находится газ, абсолютно упруги.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Впервые Р. Клаузиусом было доказано что, *давление газа прямо пропорционально кинетической энергии поступательного движения всех молекул, содержащихся в единице объема*

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_{\text{пост.}}$$

где $n = \frac{N}{V}$ — число молекул в единице объема, или их концентрация.

Это уравнение называется *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*.

Из молекулярно-кинетического толкования температуры следует, что средняя кинетическая энергия молекул газа и его абсолютная температура ведут себя одинаково и, следовательно, должны выражаться одна через другую.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Австрийский физик Л. Больцман (1844–1906) первым показал, что *средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре и зависит только от нее:*

$$\overline{\varepsilon}_{\text{пост.}} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — это универсальная постоянная, называемая *постоянной Больцмана*.

Поскольку давление газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения молекул, то оно должно зависеть и от температуры:

$$p = nkT.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Формула, выражающая функциональную зависимость только макроскопических параметров (в случае идеального газа – это давление, объем и температура), называется *уравнением состояния идеального газа*:

$$pV = \nu RT \quad \Leftrightarrow \quad pV = \frac{m}{M} RT,$$

где $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – это *универсальная газовая постоянная*.

Из соотношения $\bar{\varepsilon}_{\text{пост.}} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$ следует, что одновременно с ростом температуры увеличивается интенсивность теплового хаотического движения молекул газа.

Количественно это движение может быть описано с помощью средней квадратичной (тепловой) скорости:

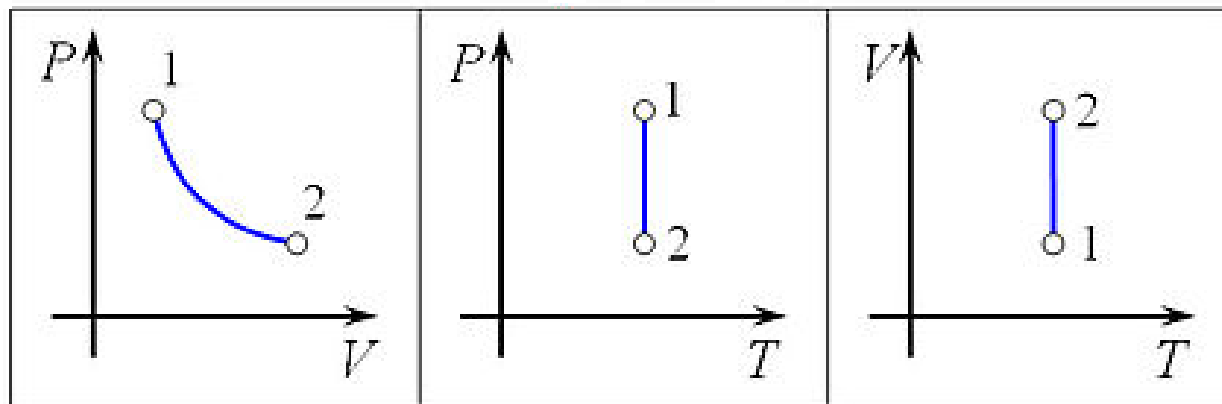
$$v_T = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Изучение связи между изменяющимися параметрами состояния в тепловых процессах вначале было проведено экспериментально.

Если один из параметров состояния T , p , V не меняется, то процесс называется *простым*: *изотермическим*; *изобарным* и *изохорным*.

В изотермическом процессе ($T = \text{const}$) для данной массы газа ($m = \text{const}$) произведение давления на объем – величина постоянная: $pV = \text{const}$.



ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

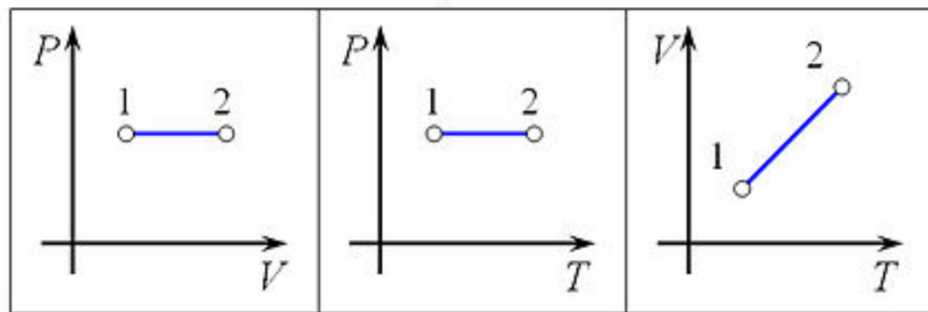
При рассмотрении процесса расширения некоторой массы газа ($m=const$) при постоянном давлении ($p=const$) экспериментально было доказано что: *относительное изменение объема данной массы газа прямо пропорционально изменению температуры и не зависит от природы газа*

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha \cdot t \quad V = V_0 (1 + \alpha t),$$

где $\alpha = \frac{1}{273,15}$ град⁻¹ называется *температурным коэффициентом объемного расширения*.

Для данной массы газа ($m=const$) в изобарном процессе отношение между объемом и абсолютной температурой постоянно:

$$\frac{V}{T} = const.$$



ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

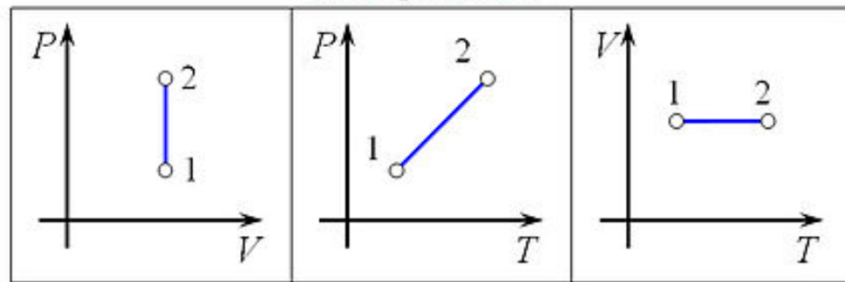
При изохорном ($V=const$) нагреве данной массы газа ($m=const$) относительное изменение его давления прямо пропорционально изменению температуры и не зависит от природы газа:

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \alpha t \quad \Leftrightarrow \quad p = p_0 (1 + \alpha t).$$

Коэффициент пропорциональности α называется *температурным коэффициентом давления*, он численно равен относительному изменению давления газа при нагреве его на один градус.

Для данной массы газа ($m=const$) в изохорном процессе отношение между давлением и абсолютной температурой постоянно:

$$\frac{p}{T} = const.$$



ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.7.* Объем некоторой массы газа увеличился в 4 раза, а его абсолютная температура увеличилась в 1,6 раза. Найти начальное давление газа, если в рассматриваемом процессе оно уменьшилось на 90 кПа. (Отв.: 150 кПа).

Дано:

$$\frac{V_2}{V_1} = 4$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,6$$

$$p_1 = p_2 + 90 \text{ кПа}$$

$$p_1 = ?$$

Решение:

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V_1 = \nu R T_1 \\ p_2 V_2 = \nu R T_2 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{\nu R T_2}{\nu R T_1} \Rightarrow$$

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} \cdot 4 = 1,6 \Rightarrow$$

$$4(p_1 - 90) = 1,6 \cdot p_1 \Rightarrow 4p_1 - 360 = 1,6p_1 \Rightarrow$$

$$2,4p_1 = 360 \Rightarrow p_1 = (360/2,4) = 150 \text{ (кПа)}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.10.* Абсолютная температура некоторой массы газа увеличилась в 1,2 раза, а его объём увеличился в три раза. Найти отношение конечного и начального давлений газа. (Отв.: 0,4).

Дано:

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 3$$

$$\frac{p_2}{p_1} = ?$$

Решение:

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V_1 = \nu R T_1 \\ p_2 V_2 = \nu R T_2 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = \frac{\nu R T_2}{\nu R T_1} \Rightarrow$$

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} \cdot 3 = 1,2 \Rightarrow$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1,2}{3} = 0,4.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.11.** Два одинаковых баллона, содержащие газ при температуре $T = 280$ К, соединены узкой, горизонтальной трубкой сечением 80 мм^2 , посередине которой находится столбик ртути (см. рис. 5.01). Столбик делит весь сосуд на два объема по $V = 200 \text{ см}^3$. На какое расстояние x переместится столбик ртути, если один баллон нагреть на $\Delta T = 14$ К, а другой на столько же охладить? Изменением объемов баллонов пренебречь. (Отв.: 0,125 м).

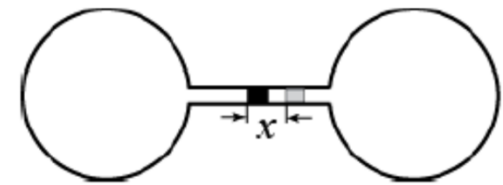


Fig. 5.1

Дано:

$$T = 280 \text{ К}$$

$$S = 80 \text{ мм}^2$$

$$V = 200 \text{ см}^3$$

$$\Delta T = 14 \text{ К}$$

$$x - ?$$

Решение:

$$pV_1 = \nu R(T + \Delta T)$$

$$V_1 = V + \Delta V$$

$$\Delta V = S \cdot x$$

$$p(V + Sx) = \nu R(T + \Delta T)$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

$$\left. \begin{aligned} pV_2 &= \nu R(T - \Delta T) \\ V_2 &= V - \Delta V \\ \Delta V &= S \cdot x \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} p(V + Sx) &= \nu R(T + \Delta T) \\ p(V - Sx) &= \nu R(T - \Delta T) \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\frac{p(V + Sx)}{p(V - Sx)} = \frac{\nu R(T + \Delta T)}{\nu R(T - \Delta T)} \Rightarrow \frac{V + Sx}{V - Sx} = \frac{T + \Delta T}{T - \Delta T} \Rightarrow$$

$$VT - V \cdot \Delta T + SxT - Sx \cdot \Delta T = VT + V \cdot \Delta T - SxT - Sx \cdot \Delta T$$

$$SxT - Sx \cdot \Delta T + SxT + Sx \cdot \Delta T = V \cdot \Delta T + V \cdot \Delta T$$

$$2SxT = 2V \cdot \Delta T$$

$$x = \frac{V \cdot \Delta T}{S \cdot T}, \quad x = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 14}{80 \cdot 10^{-6} \cdot 280} = 0,125 \text{ (м)}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.26.* Найти плотность азота при давлении $3,32 \cdot 10^5$ Па и температуре 280 К. Молярная масса азота равна 0,028 кг/моль, а универсальная газовая постоянная $R = 8,3$ Дж/(моль·К). (Отв.: 4 кг/м³).

Дано:

$$p = 3,32 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T = 280 \text{ К}$$

$$M = 0,028 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

 $\rho = ?$

Решение:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$pV = \nu RT \Leftrightarrow pV = \frac{m}{M} RT$$

$$pM = \frac{m}{V} RT \Rightarrow \frac{pM}{RT} = \rho$$

$$\rho = \frac{3,32 \cdot 10^5 \cdot 0,028}{8,3 \cdot 280} = 4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.29.* В сосуде находится 0,8 кг идеального газа. Какова масса газа, удаленного из сосуда, если его температуру газа уменьшить в 1,5 раза, а давление уменьшить в 2 раза? (**Отв.:** 0,2 кг).

Дано:

$$m = 0,8 \text{ кг}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 1,5$$

$$\frac{p_1}{p_2} = 2$$

 $m_2 - ?$

Решение:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1$$

$$p_2 V = \frac{m_1 - m_2}{M} R T_2$$

$$\frac{p_1 V}{p_2 V} = \frac{m_1 R T_1}{M} \cdot \frac{M}{(m_1 - m_2) R T_2} \Rightarrow$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1 T_1}{(m_1 - m_2) T_2} \Rightarrow 2 = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot 1,5 \Rightarrow$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

$$2m_1 - 2m_2 = 1,5m_1 \Rightarrow 0,5m_1 = 2m_2 \Rightarrow$$

$$m_2 = \frac{0,5 \cdot m_1}{2},$$

$$m_2 = \frac{0,5 \cdot 0,8}{2} = 0,2 \text{ (КГ)}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.42.* Давление газа упало на 60% от первоначального, а его объем увеличился на 0,9 м³. Считая процесс изотермическим найти начальный объем газа. (**Отв.:** 0,6 м³).

Дано:

$$p_2 = 0,4 \cdot p_1$$

$$V_2 = V_1 + 0,9 \text{ м}^3$$

$$T = \text{const}$$

$$V_1 - ?$$

Решение:

$$T = \text{const} \Rightarrow pV = \text{const}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$p_1 V_1 = 0,4 \cdot p_1 (V_1 + 0,9) \Rightarrow$$

$$V_1 = 0,4 \cdot V_1 + 0,36 \Rightarrow$$

$$0,6 \cdot V_1 = 0,36 \Rightarrow V_1 = \frac{0,36}{0,6} = 0,6 \text{ (м}^3\text{)}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.63.* Сколько ртути войдет в стеклянный баллончик объемом 5 см^3 (см. *рис. 5.03*), нагретый до 327°C при его изобарном остывании до 27°C , если плотность ртути при 27°C равна $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. (**Отв.:** 34 г).



Рис. 5.3

Дано:

$$V_1 = 5 \text{ см}^3$$

$$T_1 = 327^\circ\text{C} = 600 \text{ К}$$

$$p = \text{const}$$

$$T_2 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ К}$$

$$\rho = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$m - ?$

Решение:

$$p = \text{const} \Rightarrow \frac{V}{T} = \text{const}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_2 = V_1 - V$$

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_1 - \frac{m}{\rho}}{T_2} \Rightarrow$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

$$V_1 T_2 = V_1 T_1 - T_1 \frac{m}{\rho} \Rightarrow$$

$$T_1 \frac{m}{\rho} = T_1 V_1 - T_2 V_1 \Rightarrow$$

$$m = \frac{\rho}{T_1} V_1 (T_1 - T_2)$$

$$m = \frac{13,6 \cdot 10^3}{600} \cdot 5 \cdot 10^{-6} (600 - 300) = 0,034 (\text{кг}) = 34 \text{ г.}$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.81.* При изохорном нагревании газа, его температура увеличилась в 1,5 раза, а его давление увеличилось на 85 кПа. Найти конечное давление газа. (**Отв.:** 255 кПа).

Дано:

$$V = const$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1,5$$

$$p_2 = p_1 + 85 \text{ кПа}$$

$$p_2 - ?$$

Решение:

$$V = const \Rightarrow \frac{p}{T} = const$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow$$

$$1,5 = \frac{p_2}{p_2 - 85} \Rightarrow 1,5 \cdot p_2 - 127,5 = p_2 \Rightarrow$$

$$1,5 p_2 - p_2 = 127,5 \Rightarrow 0,5 p_2 = 127,5 \Rightarrow$$

$$p_2 = \frac{127,5}{0,5} = 255 \text{ (кПа)}.$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

5.85.* При нагревании газа в закрытом сосуде на 150 К его давление увеличилось в 1,3 раза. Найти начальную температуру газа. (Отв.: 500 К).

Дано:

$$V = const$$

$$T_2 = T_1 + 150 \text{ К}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1,3$$

$$T_1 - ?$$

Решение:

$$V = const \Rightarrow \frac{p}{T} = const$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow$$

$$\frac{T_1 + 150}{T_1} = 1,3 \Rightarrow T_1 + 150 = 1,3 \cdot T_1 \Rightarrow$$

$$150 = 0,3 \cdot T_1 \Rightarrow T_1 = \frac{150}{0,3} = 500 (\text{К}).$$

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ