

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра хімії та фізики

05-06-137М

Методичні вказівки

до виконання практичних та самостійних робіт
із освітньої компоненти «Фізика»,
розділ «Молекулярна фізика і термодинаміка»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за
освітньо-професійними програмами «Агрономія» спеціальності
201 «Агрономія»; «Екологія» спеціальності 101 «Екологія»;
«Технології захисту навколишнього середовища» спеціальності
183 «Технології захисту навколишнього середовища»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з
якості ННІАЗ
Протокол № 12 від 20.02.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання практичних та самостійних робіт із освітньої компоненти «Фізика», розділ «Молекулярна фізика і термодинаміка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами «Агрономія» спеціальності 201 «Агрономія»; «Екологія» спеціальності 101 «Екологія»; «Технології захисту навколишнього середовища» спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Лебедь О. О., Рудик Б. П., Мороз М. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 36 с.

Укладачі:

Лебедь О. О., к.т.н., доцент кафедри хімії та фізики;

Рудик Б. П., к.ф.-м.н., доцент кафедри хімії та фізики;

Мороз М. В., д.х.н., професор кафедри хімії та фізики.

Відповідальний за випуск: Мороз М. В., завідувач кафедри хімії та фізики, д.х.н., професор.

Керівник групи забезпечення спеціальності 201 «Агрономія» – Колесник Т. М., к.с.-г.н., доцент, завідувач кафедри агрохімії, ґрунтознавства та землеробства;

Керівник групи забезпечення спеціальності 101 «Екологія» – Буднік З. М., к.с.-г.н., доцент.

Керівник групи забезпечення спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» – Статник І. І., к.с.-г.н., доцент

© О. О. Лебедь, Б. П. Рудик,
М. В. Мороз, 2024
© НУВГП, 2024

ЗМІСТ

1. Молекулярна фізика і термодинаміка. Основні закони та співвідношення	5
2. Приклади розв'язування задач	12
3. Задачі для самостійного розв'язування.....	27
3.1. Молекулярна фізика	27
3.2. Термодинаміка. Реальні гази	30
4. Задачі для самостійного розв'язування.....	34
5. Довідкові дані	35

ПЕРЕДМОВА

Мета практичних занять з фізики – закріпити вивчення теоретичного матеріалу шляхом вироблення вмінь та навичок його застосування до розв’язування задач. Історично сформувався певний алгоритм цього процесу:

1. Перш за все потрібно уявити до якого розділу відноситься розглядувана задача і ознайомитись з теорією цього розділу, бо без знання базових понять науки і зв’язків між ними неможливе правильне оперування цими поняттями.
2. Умову задачі слід записати словесно і скорочено у загальноприйнятих символічних позначеннях (див. **Приклади розв’язування задач**)
3. Дані задачі та необхідні константи перевести до однієї системи одиниць (загальноприйнятою зараз є міжнародна система одиниць СІ).
4. Зробити малюнок до задачі (за винятком окремих очевидних випадків); малюнок допомагає збагнути зміст задачі і часто підказує ідею її розв’язання.
5. Розв’язати задачу у загальному вигляді одержавши робочу формулу шуканої величини. Розв’язання супроводжувати короткими поясненнями, які розкривають логіку міркувань.
6. Підставити у робочу формулу дані задачі та константи і обрахувати числове значення шуканої величини вказавши її одиницю. Точність обчислень не повинна перевищувати точність заданих величин.
7. Переконайтесь у «розумності» одержаного результату як з точки зору його розмірності, так і з точки зору відповідності до загальних законів природи. Повчально прояснити для себе алгоритм розв’язання даного типу задач.

1. Молекулярна фізика і термодинаміка. Основні закони та співвідношення

- **Кількість речовини**

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A},$$

де m – маса, μ – молярна маса, N – число молекул, N_A – стала Авогадро.

- **Зв'язок молярної маси з масою однієї молекули ($m^{(1)}$)**

$$\mu = m^{(1)} N_A.$$

- **Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона)**

$$\frac{pV}{T} = \text{const},$$

де p – тиск, T – абсолютна температура, V – об'єм (для даної маси газу).

Часткові випадки:

а) $T = \text{const}$, $pV = \text{const}$ – **рівняння ізотерми**;

б) $p = \text{const}$, $\frac{V}{T} = \text{const}$ – **рівняння ізобари**;

в) $V = \text{const}$, $\frac{p}{T} = \text{const}$ – **рівняння ізохори**.

- **Універсальне рівняння стану ідеального газу**

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

R – універсальна газова стала, m – маса газу, M – молярна маса газу.

- Рівняння стану ідеального газу (зв'язок тиску з концентрацією молекул газу)

$$p = nkT,$$

$n = N/V$ – концентрація, $k = R/N_A$ – стала Больцмана.

- Густина газу

$$\rho = \frac{\mu \cdot p}{RT} = m^{(1)} \cdot n.$$

- Закон Дальтона

$$p = \sum_i p_i,$$

p – тиск суміші газів, p_i – парціальний тиск i -го газу.

- Молярна маса суміші газів

$$\mu_c = \frac{m_c}{\sum_i \frac{m_i}{\mu_i}},$$

m_c – маса суміші, m_i та μ_i – маса і молярна маса i -тої компоненти.

- Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії(м.к.т.) газів

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{к.н.}^{(1)} \rangle,$$

$\langle E_{к.н.}^{(1)} \rangle$ – середня кінетична енергія поступального руху однієї молекули;

$$\langle E_{к.н.}^{(1)} \rangle = \frac{m^{(1)} v_{кв}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

де $v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m^{(1)}}}$ – середня квадратична швидкість газових молекул.

Інша форма запису основного рівняння м.-к.т. газів:

$$pV = \frac{2}{3} E_{к.л.},$$

де $E_{к.л.}$ – кінетична енергія поступального руху всіх молекул газу.

- **Середня арифметична швидкість хаотичного теплового руху молекул**

$$v_{ар} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m^{(1)}}}.$$

- **Найімовірніша швидкість молекул**

$$v_{ім} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m^{(1)}}}.$$

- **Робота розширення (стискання) газу**

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

V_1 та V_2 – початковий і кінцевий об'єми газу.

Окремі випадки:

а) ізотермічний процес, $A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ або $A = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$;

б) ізобаричний процес, $A = p(V_2 - V_1) \equiv p\Delta V$ або $A = \nu R\Delta T$;

в) ізохорний процес, $A = 0$.

- **Число ступенів вільності для системи, що складається з N жорстко зв'язаних матеріальних точок:**

а) $i = 3$, якщо $N = 1$ (одноатомний газ);

б) $i = 5$, якщо $N = 2$ (двохатомний газ);

в) $i = 6$, якщо $N \geq 3$ (трьох- і більше атомний газ).

- **Середня кінетична енергія молекули, котра володіє “ i ” ступенями вільності**

$$E_k = \frac{i}{2} kT .$$

- **Внутрішня енергія ідеального газу**

$$U = \nu \frac{i}{2} RT .$$

- **Математичний запис першого закону термодинаміки (інтегральна форма)**

$$Q = A + \Delta U ,$$

де: Q – кількість теплоти, одержаної системою ззовні; A – робота системи проти зовнішніх сил; ΔU – приріст внутрішньої енергії системи.

- **Диференціальна форма запису першого закону термодинаміки**

$$\delta Q = \delta A + dU .$$

- **Зв'язок молярної теплоємності (C_μ) з питомою теплоємністю (c) речовини**

$$C_\mu = c \cdot \mu .$$

- **Молярна теплоємність ідеального газу при сталому об'ємі**

$$C_{\mu V} = \frac{i}{2} R .$$

- **Молярна теплоємність ідеального газу при сталому тиску (рівняння Майєра)**

$$C_{\mu p} = C_{\mu V} + R.$$

- **Рівняння адіабатичного процесу:**

$$PV^\gamma = \text{const},$$

або

$$TV^{\gamma-1} = \text{const},$$

або

$$T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{const},$$

γ - показник адіабати (коефіцієнт Пуасона)

$$\gamma = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{i+2}{i}.$$

- **Робота газу при адіабатичному процесі**

$$A = -\Delta U = -\nu C_{\mu V} \cdot \Delta T.$$

- **Коефіцієнт корисної дії теплової машини**

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

де: A – робота, виконана робочим тілом за цикл; $A = Q_1 - |Q_2|$; Q_1 – кількість теплоти, одержаної тілом за цикл від нагрівника; Q_2 – кількість теплоти, відданої тілом за цикл холодильнику.

- **Коефіцієнт корисної дії циклу Карно**

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

T_1 – температура нагрівника, T_2 – температура холодильника.

- **Приріст ентропії у випадку оборотного термодинамічного процесу**

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T},$$

A та B – позначення початкового і кінцевого станів системи, δQ – елементарна кількість теплоти.

- **Середня довжина вільного пробігу молекули**

$$\lambda = \frac{v_{ap}}{z},$$

де v_{ap} – середня арифметична швидкість теплового руху частинки, z – середнє число зіткнень однієї молекули з іншими за одиницю часу.

$$z = \sqrt{2}\pi\sigma^2 v_{ap} n,$$

σ – ефективний діаметр молекули, n – концентрація речовини.

- **Характеристики речовини у процесах перенесення**

а) коефіцієнт дифузії

$$D = \frac{1}{3} v_{ap} \lambda;$$

б) динамічна в'язкість речовини

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_{ap} \lambda;$$

в) теплопровідність речовини

$$\kappa = \frac{1}{3} c_V \rho v_{ap} \lambda;$$

ρ – густина, c_V – питома теплоємність газу при сталому об'ємі.

- **Зв'язок критичних параметрів речовини з поправками Ван-дер-Ваальса «а» та «b»**

критичний тиск

$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2};$$

молярний критичний об'єм

$$V_{\mu кр} = 3b;$$

критична температура

$$T_{кр} = \frac{8a}{27bR}.$$

Нормальні умови :

$$T_0 = 273\text{K}; p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{Па} = 760\text{мм рт.ст.} = 1\text{атм.}$$

2. Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Скільки молекул є в 1 м^3 води? Яка маса молекули води? Вважаючи, що молекули мають форму кульок, що дотикаються між собою, знайти діаметр молекули.

Розв'язання

Дано: Використаємо формулу для розрахунку кількості речовини (через масу і через число молекул):

кульки
 $n ? m^{(1)} ?$
 $d ?$

$$\frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A},$$

μ – молярна маса, N_A – стала Авогадро. Звідси число молекул

$$N = \frac{mN_A}{\mu}.$$

Розділимо тепер праву і ліву частину одержаної рівності на об'єм (V) і врахуємо, що $N/V = n$, а $m/V = \rho$ – густина. Маємо шукану концентрацію

$$n = \frac{\rho N_A}{\mu}.$$

З таблиць: $\rho = 1,00 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$,
 $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Тому

$$n = \frac{1,00 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{18 \cdot 10^{-3}} = 3,34 \cdot 10^{28} \left(\text{м}^{-3} \right).$$

Масу однієї молекули можна розрахувати або із її зв'язку з молярною масою ($\mu = m^{(1)}N_A$), або із зв'язку густини з концентрацією ($\rho = m^{(1)}n$). Наприклад,

$$m^{(1)} = \frac{\mu}{N_A}.$$

$$m^{(1)} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ (кг)}.$$

Нехай на ділянці довжиною 1м тісно вкладається ряд із z молекул. Тоді в об'ємі 1м^3 будуть розміщені z^3 молекул, тобто $3,34 \cdot 10^{28}$ молекули (див. вище розраховану концентрацію). Тому

$$z = \sqrt[3]{3,34 \cdot 10^{28}} = 3,22 \cdot 10^9 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Відповідно, діаметр однієї молекули $d = \frac{1}{z}$, тобто

$$d = \frac{1}{3,22 \cdot 10^9} = 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

Відповідь: $n = 3,34 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$; $m^{(1)} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$;
 $d = 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Приклад 2. В балоні об'ємом $V = 10\text{л}$ знаходиться гелій під тиском $p_1 = 1,0\text{МПа}$ при температурі $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Після того, як з балона було взято $|\Delta m| = 10\text{г}$ гелію, температура в балоні зменшилася до $t_2 = 17^\circ\text{C}$. Визначити тиск p_2 гелію, що залишився.

Розв'язання

Дано:

$$V = 10 \text{ л}$$

He

$$p_1 = 1,0 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 27^\circ \text{C}$$

$$|\Delta m| = 10 \text{ г}$$

$$t_2 = 17^\circ \text{C}$$

$$p_2 ?$$

Застосуємо рівняння стану ідеального газу до початкового і кінцевого станів гелію у балоні:

$$p_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT_1,$$

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT_2,$$

де m_1 та m_2 – маси газу в обох станах, μ – молярна маса, T – абсолютна температура, R – універсальна газова стала. З цих рівнянь маємо

$$m_1 = \frac{\mu p_1 V}{RT_1},$$

$$m_2 = \frac{\mu p_2 V}{RT_2}$$

або

$$m_1 - m_2 = \frac{\mu V p_1}{RT_1} - \frac{\mu V p_2}{RT_2}.$$

Але за умовою задачі $m_1 - m_2 = |\Delta m|$, тому

$$p_2 = T_2 \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{|\Delta m| R}{\mu V} \right).$$

Підготуємо необхідні фізичні величини до підстановки і виконаємо числовий розрахунок.

$$T_1 = 300 \text{ К}, T_2 = 290 \text{ К}, p_1 = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Па}, |\Delta m| = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ кг},$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \mu = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, V = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

$$p_2 = 290 \left(\frac{1,0 \cdot 10^6}{300} - \frac{1,0 \cdot 10^{-2} \cdot 8,31}{4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2}} \right) = 3,6 \cdot 10^5 \text{ (Па)}.$$

Відповідь: 0,36 МПа .

Приклад 3. Якою має бути кінетична енергія поступального руху двох кіломолив кисню, щоб його молекули могли покинути Землю? Яка при цьому має бути температура? Знайти тиск газу за цих умов, якщо його об'єм 10м^3 . Газ вважати ідеальним.

Розв'язання

Дано: Молекула газу може покинути Землю, якщо її швидкість $v \geq v_2$, v_2 – друга космічна швидкість.
 $V = 10\text{м}^3$
 O_2 Отже, має виконуватися нерівність

$$v = 2\text{кмоль}$$

$$v \geq v_2$$

$$\langle E_{к.н.}^{(1)} \rangle \geq \frac{m^{(1)}v_2^2}{2}, \quad (1)$$

$$p?, E_{к.н.}?,$$
$$T?$$

а для заданої кількості газу кінетична енергія поступального руху молекул

$$E_{к.н.} \geq \frac{mv_2^2}{2},$$

де $E_{к.н.}^{(1)}$ – кінетична енергія поступального руху однієї молекули,
 $m^{(1)}$ – маса однієї молекули, m – маса всього газу.

Масу газу виразимо через кількість речовини

$$m = \mu\nu.$$

Тепер мінімальна кінетична енергія

$$E_{к.н.} = \frac{\mu\nu v_2^2}{2}.$$

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, \quad \nu = 2 \cdot 10^3 \text{ моль}, \quad v_2 = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

$$E_{к.п.} = \frac{32 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot (11,2 \cdot 10^3)^2}{2} = 4,0 \cdot 10^9 (\text{Дж}).$$

Температуру газу знайдемо, підставивши в (1) вираз для розрахунку $\langle E_{к.п.}^{(1)} \rangle = \frac{3}{2} kT$ і застосувавши зв'язок молярної маси з масою однієї молекули $\mu = m^{(1)} N_A$ та означення сталої Больцмана $k = \frac{R}{N_A}$, R – універсальна газова стала, N_A – стала Авогадро.

Маємо

$$\frac{3}{2} kT = \frac{\mu}{N_A} \frac{v_2^2}{2}$$

або

$$T = \frac{\mu v_2^2}{3R}.$$

$$T = \frac{32 \cdot 10^{-3} (11,2 \cdot 10^3)^2}{3 \cdot 8,31} = 1,6 \cdot 10^5 (K).$$

Тиск розрахуємо, виходячи з основного рівняння м.-к.т. газів

$$pV = \frac{2}{3} E_{к.п.},$$

$$p = \frac{2}{3} \frac{E_{к.п.}}{V}.$$

$$p = \frac{2 \cdot 4,0 \cdot 10^9}{3 \cdot 10} = 2,7 \cdot 10^8 (\text{Па}).$$

Відповідь: $E_{к.п.} = 4,0 \text{ГДж}$, $T = 0,16 \text{МК}$, $p = 0,27 \text{ГПа}$.

Приклад 4. Визначити густину суміші, що містить $m_1 = 4\text{г}$ водню та $m_2 = 32\text{г}$ кисню при температурі $T = 280\text{К}$ і тиску $p = 93\text{кПа}$. Який об'єм займає газ?

Розв'язання

Дано: Густина газу

$$m_1 = 4\text{г}, \text{H}_2$$

$$\rho = \frac{\mu_c p}{RT},$$

$$m_2 = 32\text{г} \text{O}_2$$

μ_c – молярна маса, R – універсальна газова стала.

$$T = 280\text{К}$$

Молярна маса суміші

$$p = 93\text{кПа}$$

$$\mu_c = \frac{m_c}{\sum_i \frac{m_i}{\mu_i}},$$

$$\rho?, V?$$

m_c – маса суміші ($m_c = m_1 + m_2$), m_i та μ_i – маса і молярна маса i -тої компоненти.

Тепер густина суміші

$$\rho = \frac{(m_1 + m_2)p}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}}.$$

Підготуємо необхідні фізичні величини до підстановки і виконаємо числовий розрахунок.

$$m_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{кг}, \quad m_2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{кг}, \quad \mu_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{кг/моль},$$

$$\mu_2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{кг/моль}, \quad p = 9,3 \cdot 10^4 \text{Па}.$$

$$\rho = \frac{(4 \cdot 10^{-3} + 32 \cdot 10^{-3}) \cdot 9,3 \cdot 10^4}{\frac{4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{32 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}}} = 0,48 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Об'єм газу знайдемо, виходячи з означення густини

$$V = m_c \rho = (m_1 + m_2) \rho,$$

$$V = (4 \cdot 10^{-3} + 32 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.48 = 0.017 (\text{м}^3)$$

Відповідь: $\rho = 0,48 \text{кг/м}^3$; $V = 0,017 \text{м}^3$.

Приклад 5. Розрахувати молярну теплоємність ідеального газу за умови, що тиск прямо пропорційний до об'єму.

Розв'язання

Да За означенням

но:

$$p \sim V$$

$$C_\mu = \frac{\delta Q}{\nu dT},$$

C_μ ? δQ – елементарна кількість теплоти, dT – елементарний приріст температури, ν – кількість речовини.

Перше начало термодинаміки

$$\delta Q = \delta A + dU,$$

δA – елементарна робота газу проти зовнішніх сил, dU – елементарний приріст внутрішньої енергії системи.

$$dU = \nu \frac{i}{2} R dT,$$

i – число ступенів вільності молекул, R – універсальна газова стала.

$$\delta A = p dV.$$

За умовою задачі $p = \alpha V$, де α – деяка стала величина. Тиск запишемо, виходячи з рівняння стану ідеального газу:

$$p = \frac{\nu RT}{V}.$$

Прирівняємо праві частини останніх двох рівнянь

$$\alpha V^2 = \nu RT$$

і продиференціюємо цю рівність:

$$2\alpha V dV = \nu R dT$$

або

$$2pdV = \nu R dT.$$

Тепер уже можна записати вираз для елементарної роботи

$$\delta A = \frac{1}{2} \nu R dT$$

і розрахувати теплоємність:

$$C_{\mu} = \frac{\frac{1}{2} \nu R dT + \nu \frac{i}{2} R dT}{\nu dT} = \frac{R}{2} + \frac{iR}{2} = \frac{R}{2} + C_{\mu\nu},$$

$C_{\mu\nu}$ – молярна теплоємність при сталому об'ємі.

Відповідь: $C_{\mu} = C_{\mu\nu} + \frac{R}{2}.$

Приклад 6. В циліндрі під поршнем, котрий може вільно переміщуватися, знаходиться 10г азоту. Яка кількість теплоти Q_1 необхідна для нагрівання азоту від температури $T_1 = 283K$ до температури $T_2 = 298K$? Порівняйте цю теплоту з необхідною теплою Q_2 для нагрівання такої ж кількості газу в тому ж температурному інтервалі при постійному об'ємі, а також визначте зміну внутрішньої енергії і роботу розширення.

Розв'язання

Дано:

$$m = 10\text{г}$$

N_2

$$T_1 = 283\text{К}$$

$$T_2 = 298\text{К}$$

а) $p = \text{const}$

б) $V = \text{const}$

$$\frac{Q_1}{Q_2}?, \Delta U?,$$

А?

Будемо вважати, що газ ідеальний. У першому випадку маємо справу з ізобарним процесом, тому

$$Q_1 = \frac{m}{\mu} C_{\mu p} \Delta T,$$

μ – молярна маса, $C_{\mu p}$ – молярна теплоємність при сталому тиску, $\Delta T = T_2 - T_1$.

У процесі ізохорного нагрівання (другий випадок)

$$Q_2 = \frac{m}{\mu} C_{\mu V} \Delta T.$$

Молярні теплоємності

$$C_{\mu V} = \frac{i}{2} R,$$

$$C_{\mu p} = C_{\mu V} + R = \frac{i+2}{2} R,$$

тому

$$\frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{i+2}{i}, \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{i+2}{i}.$$

Зміну внутрішньої енергії розраховують за формулою

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T, \text{ а роботу розширення газу – на основі першого}$$

принципу термодинаміки:

$$A = Q_1 - \Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i+2}{2} R \Delta T - \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{2}{i} \Delta U$$

або безпосередньо за формулою

$$A = \frac{m}{\mu} R \Delta T .$$

Виконаємо числові розрахунки.

$$m = 10 \cdot 10^{-3} \text{ кг} ; i = 5 \text{ (двохатомний газ)} ; \mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} ; \\ R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} .$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{5+2}{5} = 1,4 ;$$

$$\Delta U = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} \frac{5}{2} \cdot 8,31 (298 - 283) = 111 \text{ (Дж)} ;$$

$$A = \frac{2}{5} \cdot 111 = 44,4 \text{ (Дж)} .$$

Відповідь: $Q_1/Q_2 = 1,4$; $\Delta U = 111 \text{ Дж}$; $A = 44,4 \text{ Дж}$.

Приклад 7. Треба стиснути повітря від об'єму $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ до об'єму $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Як вигідніше його стискувати: адіабатично чи ізотермічно?

Розв'язання

Дано: Порівняємо роботу при заданих процесах. У випадку адіабатичного процесу

$$V_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$A_{ad} = -\nu \frac{i}{2} R \Delta T ,$$

$$\frac{A_{ad}}{A_{із}}$$

ν – кількість речовини, i – число ступенів вільності молекули, R – універсальна газова стала, ΔT – приріст температури ($\Delta T = T_2 - T_1$). Скористуємося рівнянням Пуасона

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

і виразимо зміну температури через зміну об'єму.

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

або

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1},$$

або

$$\Delta T = T_1 \left(\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right).$$

Врахуємо, що показник адиабати $\gamma = \frac{i+2}{i}$, тобто $\gamma - 1 = 2/i$. Тоді

$$A_{ad} = \frac{\nu R T_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right).$$

У випадку ізотермічного процесу

$$A_{iz} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Знайдемо відношення адиабатичної та ізотермічної роботи:

$$\frac{A_{ad}}{A_{iz}} = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}}{\ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Врахуємо, що для повітря $\gamma = 1,4$, і отримаємо остаточно:

$$\frac{A_{ad}}{A_{iz}} = \frac{1}{1,4 - 1} \frac{1 - \left(\frac{1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,4-1}}{\ln \frac{2 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}}} = 1,4.$$

Відповідь: вигідніше стискувати ізотермічно.

Приклад 8. Нагрівник теплової машини, що працює за циклом Карно, має температуру $t_1 = 200^\circ\text{C}$. Визначити температуру T_2 холодильника, якщо при надходженні від нагрівника кількості теплоти $Q_1 = 1,0\text{Дж}$ машина виконує роботу $A = 0,40\text{Дж}$.

Розв'язання

За означенням ККД теплової машини

Дано: $t_1 = 200^\circ\text{C}$ $\eta = \frac{A}{Q_1},$

$Q_1 = 1,0\text{Дж}$ а для циклу Карно

$A = 0,40\text{Дж}$ $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

$T_2 ?$ Прирівнявши праві частини виписаних співвідношень, маємо

$$\frac{A}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

Звідки

$$T_2 = T_1 \left(1 - \frac{A}{Q_1} \right).$$

Виконаємо числовий розрахунок: $T_1 = 473\text{К}$;

$$T_2 = 473 \left(1 - \frac{0,40}{1,0} \right) = 280(\text{К}).$$

Відповідь: 280 К.

Приклад 9. Знайти приріст ентропії при перетворенні 1г води з температурою 0°C в пару при 100°C.

Розв'язання

Дано: Зміна ентропії у випадку оборотного
 $m = 1\text{г}$ термодинамічного процесу

H_2O

$t_1 = 0^\circ\text{C}$

$$\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q}{T},$$

$t_2 = 100^\circ\text{C}$ де δQ – елементарна кількість теплоти; T – абсолютна температура; A та B – формальні позначення вихідного і кінцевого стану системи.
 ΔS ?

Розіб'ємо інтеграл у правій частині виписаної формули на два доданки, що відповідають двом процесам, заданим в умові:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 \equiv \int_A^C \frac{\delta Q}{T} + \int_C^B \frac{\delta Q}{T}.$$

ΔS_1 – приріст ентропії при нагріванні води від температури T_1 до температури T_2 , ΔS_2 – приріст ентропії при випаровуванні (T_2 за умовою задачі – температура кипіння води).

У першому доданку

$$\delta Q = cmdT,$$

c – питома теплоємність води. У другому доданку $T_2 = \text{const}$, а

$$\int_C^B \delta Q = Q = rm,$$

r – питома теплота пароутворення. Маємо

$$\Delta S = cm \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{1}{T_2} \int_C^B \delta Q = m \left(c \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{r}{T_2} \right).$$

$c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); r = 22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}; m = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$
 $T_1 = 273\text{К}; T_2 = 273\text{К}.$

$$\Delta S = 1 \cdot 10^{-3} \left(4,19 \cdot 10^3 \ln \frac{373}{273} + \frac{22,6 \cdot 10^5}{373} \right) = 7,4 (\text{Дж}/\text{К}).$$

Відповідь: 7,4 Дж/К.

Приклад 10. Два кіломолі трьохатомного газу адіабатично розширюються в пустоту від $V_1 = 1\text{м}^3$ до $V_2 = 5\text{м}^3$. Температура газу при цьому зменшується на 15К. Знайти за цими даними постійну «а» з рівняння Ван-дер-Ваальса.

Розв'язання

Дано: Перше начало термодинаміки для адіабатичного
 $\nu = 2 \cdot 10^3$ моль процесу має вигляд $\delta A = -dU$, де A – робота газу
 проти зовнішніх сил, U – внутрішня енергія. За
 $i = 6$ умовою задачі зовнішнього тиску немає
 $\delta Q = 0$ (розширення в пустоту), тому
 $P = 0$ $\delta A = p dV = 0.$

$$V_1 = 1\text{м}^3$$

$$V_2 = 5\text{м}^3$$

$$\Delta T = -15\text{К}$$

а?

В підсумку маємо, що

$$dU = 0.$$

Зміна внутрішньої енергії має дві складові:
 $\nu C_{\mu} \nu dT$, що не залежить від зміни об'єму, та
 $dU(V)$, що залежить від об'єму. Остання складова рівна роботі сили
 міжмолекулярного притягання, котра спричинює додатковий
 внутрішній тиск $P_0 = \nu^2 \frac{a}{V^2}$:

$$dU(V) = P_0 dV = \nu^2 \frac{a}{V^2} dV.$$

Повна зміна внутрішньої енергії газу

$$\nu C_{\mu V} dT + \nu^2 \frac{a}{V^2} dV = 0,$$

звідки

$$dT = -\nu \frac{a}{V^2 C_{\mu V}} dV.$$

Проінтегруємо останнє співвідношення:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -\nu \frac{a}{C_{\mu V}} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^2} = \nu \frac{a}{C_{\mu V}} \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right),$$

тобто

$$\Delta T = \nu \frac{2a}{iR} \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right),$$

оскільки молярна теплоємність при постійному об'ємі $C_{\mu V} = \frac{i}{2}R$ (i – число ступенів вільності, R – універсальна газова стала). Тепер маємо

$$a = \frac{iR\Delta T V_1 V_2}{2\nu(V_1 - V_2)}.$$

Виконаємо числовий розрахунок.

$$a = \frac{6 \cdot 8,31 \cdot (-15) \cdot 1 \cdot 5}{2 \cdot 2 \cdot 10^3 (1 - 5)} = 0,23 \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2} \right)$$

Відповідь: $a = 0,23 \text{Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$.

3. Задачі для самостійного розв'язування

3.1. Молекулярна фізика

рівняння стану ідеального газу

1. Балон місткістю 12л заповнений азотом при тиску 8,1МПа і температурі 17°C. Знайти масу азоту.
2. Яким може бути найменший об'єм балона, що містить 6,4кг кисню, якщо його стінка при температурі 20°C витримує тиск 160кгс/см²?
3. До якої температури потрібно нагріти ідеальний газ, щоб його густина зменшилася у два рази порівняно з густиною цього газу при $t_0 = 0^\circ\text{C}$?
4. 5г азоту, що знаходиться в закритій посудині місткістю 4л при температурі 20°C, нагрівають до температури 40°C. Знайти тиск газу до і після нагрівання.
5. Знайти густину водню при температурі 15°C і тиску 730мм рт.ст.
6. Густина деякого газу при температурі 10°C і тиску $2 \cdot 10^5$ Па дорівнює 0,34кг/м³. Чому дорівнює маса одного кіломоля цього газу?
7. 10г кисню знаходяться під тиском 3атм при температурі 10°C. Після розширення внаслідок нагрівання при постійному тиску кисень зайняв об'єм 10л. Знайти: 1) об'єм газу до розширення; 2) густину газу до розширення; 3) температуру газу після розширення; 4) густину газу після розширення.
8. 6г вуглекислого газу (CO₂) і 5г закису азоту (N₂O) заповнюють посудину місткістю 2 дм³. Який загальний тиск у посудині при температурі 127°C?
9. В посудині знаходяться 14г азоту і 9г водню при температурі 10°C і тиску 1МПа. Знайти: 1) масу одного кіломоля суміші; 2) об'єм посудини.

10. Який об'єм займає суміш газів – азоту масою $m_1 = 1\text{кг}$ і гелію масою $m_2 = 1\text{кг}$ – при нормальних умовах?
11. Скільки молекул міститься в 1г водяної пари?
12. Скільки молекул буде знаходитися в 1см^3 посудини при 10°C , якщо посудину відкачано до $p = 1 \cdot 10^{-11}\text{ммрт.ст.}$?
13. В балоні місткістю $V = 3\text{л}$ знаходиться кисень масою 4г. Визначити кількість речовини ν газу і концентрацію n його молекул.
14. В балоні було 10кг газу при тиску 10МПа. Знайти, яку кількість газу взяли з балона, якщо тиск став рівним 2,5МПа. Температуру вважати постійною.
15. *Балони місткістю $V_1 = 20\text{л}$ і $V_2 = 44\text{л}$ заповнені газом. Тиск у першому балоні $p_1 = 2,4\text{МПа}$, у другому – $p_2 = 1,6\text{МПа}$. Визначити загальний тиск p після сполучення балонів, якщо температура газу залишилася попередньою.

основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів, швидкості молекул

16. Тиск p газу дорівнює 1мПа, концентрація n його молекул рівна $1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$. Визначити: 1) температуру T газу; 2) середню кінетичну енергію $\langle E_{k.n.}^{(1)} \rangle$ поступального руху молекули.
17. Густина деякого газу $\rho = 0,06\text{кг/м}^3$, середня квадратична швидкість його молекул $v_{\text{кв}} = 500\text{м/с}$. Знайти тиск газу на стінки посудини.
18. Газ займає об'єм $V = 1\text{л}$ під тиском $p = 2\text{атм}$. Визначити кінетичну енергію $E_{k.n.}$ поступального руху всіх молекул в даному об'ємі.

19. Кількість речовини деякого газу $\nu = 1,5$ моль, температура $T = 120\text{ K}$. Визначити сумарну кінетичну енергію $E_{k.n.}$ поступального руху всіх молекул цього газу.
20. Знайти сумарну кінетичну енергію $E_{k.n.}$ поступального руху всіх молекул газу, що знаходяться в посудині місткістю $V = 3\text{ л}$ під тиском $p = 540\text{ кПа}$.
21. При якій температурі середня кінетична енергія $\langle E_{k.n.}^{(1)} \rangle$ поступального руху молекули газу рівна $4,14 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$?
22. Посудина зі внутрішнім об'ємом $V = 4\text{ л}$ містить $m = 0,6\text{ г}$ деякого газу під тиском $p = 2\text{ атм}$. Визначити середню квадратичну швидкість молекул газу.
23. Знайти середню квадратичну швидкість молекул повітря при температурі 17°C . Повітря вважати однорідним газом з молярною масою $29 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$.
24. Визначити середню квадратичну швидкість $v_{кв}$ молекул газу, що знаходиться в посудині місткістю $V = 2\text{ л}$ під тиском $p = 200\text{ кПа}$. Маса газу $m = 0,3\text{ г}$.
25. Знайти відношення середніх квадратичних швидкостей молекул гелію та азоту при однакових температурах.
26. Знайти середню квадратичну $v_{кв}$, середню арифметичну $v_{ар}$ та найімовірнішу $v_{ім}$ швидкості молекул водню. Обчислення виконати для трьох значень температури: 1) $T = 20\text{ K}$; 2) $T = 300\text{ K}$; 3) $T = 5000\text{ K}$.
27. При якій температурі T середня квадратична швидкість атомів гелію буде дорівнювати другій космічній швидкості $v_2 = 11,2\text{ км/с}$?
28. Знайти середню арифметичну швидкість $v_{ар}$ молекул газу, якщо їх середня квадратична швидкість $v_{кв} = 1\text{ км/с}$.

29. *Кінетична енергія поступального руху молекул азоту, що знаходиться в об'ємі 20 дм^3 , дорівнює 5 кДж , а середня квадратична швидкість його молекул рівна 2 км/с . Знайти: 1) кількість азоту в балоні; 2) тиск, під яким знаходиться азот.

30. *Посудина, що містить деяку масу одноатомного газу, рухається зі швидкістю u . На скільки збільшиться середній квадрат швидкості теплового руху молекул при зупинці посудини? Теплоємність, теплопровідність і маса стінок посудини зникаюче малі.

3.2. Термодинаміка. Реальні гази

внутрішня енергія, робота розширення газу, перше начало термодинаміки

31. Чому дорівнює енергія теплового руху молекул двоатомного газу, що знаходиться в посудині місткістю 2 л під тиском $0,15 \text{ МПа}$?

32. 10 г кисню знаходяться під тиском $0,3 \text{ МПа}$ при температурі 10°C . Після нагрівання при постійному тиску газ зайняв об'єм 10 л . Знайти: 1) кількість теплоти, одержаної газом; 2) зміну внутрішньої енергії газу; 3) роботу, виконану газом при розширенні.

33. 2 кмоль вуглекислого газу нагріваються при постійному тиску на 50°C . Знайти: 1) зміну його внутрішньої енергії; 2) роботу розширення; 3) кількість теплоти, наданої газу.

34. Газ, що займав об'єм 5 л і знаходився під тиском $0,2 \text{ МПа}$ при температурі 17°C , було нагріто і він розширився ізобарично. Робота розширення газу при цьому виявилася рівною 196 Дж . Наскільки нагріто газ?

35. При ізотермічному розширенні 10 г азоту, що знаходиться при температурі 17°C , було виконано роботу 860 Дж . У скільки разів змінився тиск азоту при розширенні?

36. 1 л гелію, котрий знаходиться при нормальних умовах, ізотермічно розширюється за рахунок одержаної ззовні теплоти до об'єму 2 л . Знайти: 1) роботу, виконану газом при розширенні; 2) кількість наданої газу теплоти.

37. *1кг двохатомного газу знаходиться під тиском 80кПа і має густину $\rho = 4 \text{ кг/м}^3$. Знайти енергію теплового руху молекул газу при цих умовах.

38. *У посудину, в котрій міститься 2,8л води при температурі 20°C, вкинули нагрітий до 460°C кусок сталі, що має масу 3кг. Від цього вода в посудині нагрілася до 60°C, а частина її перетворилася в пару. Визначити масу води, котра випарувалася. Теплоємністю посудини знехтувати.

теплоємність, адіабатичний процес

39. Різниця питомих теплоємностей $c_p - c_V$ деякого двохатомного газу дорівнює 260Дж/(кг·К). Знайти молярну масу μ газу і його питомі теплоємності c_p та c_V .

40. Молярна маса деякого газу $\mu = 30 \text{ г/моль}$, відношення $c_p/c_V = 1,4$. Знайти питомі теплоємності c_p і c_V цього газу.

41. До якої температури охолонуть повітря, що знаходиться при температурі 0°C, якщо воно розширюється адіабатично від об'єму V_1 до об'єму $V_2 = 2V_1$?

42. Газ розширюється адіабатично, при цьому об'єм його збільшується вдвічі, а температура падає в 1,32 рази. Яке число ступенів вільності мають молекули цього газу?

43. *Чому дорівнюють питомі теплоємності c_p і c_V деякого двохатомного газу, якщо густина цього газу при нормальних умовах дорівнює $1,43 \text{ кг/м}^3$?

44. *Двохатомний газ займає об'єм $V_1 = 0,5 \text{ л}$ при тиску $p_1 = 0,5 \text{ атм}$. Газ стискується адіабатично до деякого об'єму V_2 і тиску p_2 , а потім при постійному об'ємі V_2 охолоджується до початкової температури. При цьому тиск його стає рівним $p_0 = 1 \text{ атм}$. Зобразити описаний процес графічно; знайти об'єм V_2 і тиск p_2 .

45. *Газ розширюється адіабатично так, що його тиск спадає від 2 атм до 1 атм. Потім він нагрівається при постійному об'ємі до початкової температури, причому його тиск зростає до 1,22 атм. Зобразити описаний процес графічно і визначити відношення c_p/c_V газу.

цикл Карно, ентропія

46. Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, отримує за кожний цикл від нагрівника 600кал теплоти. Температура нагрівника 400К, температура холодильника 300К. Знайти роботу, що виконує машина за один цикл, і кількість теплоти, котра віддається холодильнику за один цикл.

47. Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, 2/3 теплоти, одержаної від нагрівника, передає холодильнику з температурою 10°C. Визначити температуру нагрівника.

48. Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно. При цьому 80% теплоти, одержаної від нагрівника, передається холодильнику. Від нагрівника надходить за цикл 1,5ккал теплоти. Знайти: 1) ККД циклу; 2) роботу, виконану за цикл.

49. Знайти зміну ентропії при ізотермічному розширенні 6г водню зі зменшенням тиску від 0,1МПа до 50кПа.

50. 10,5г азоту ізотермічно розширюються від об'єму $V_1 = 2л$ до об'єму $V_2 = 5л$. Знайти приріст ентропії в цьому процесі.

51. 10г кисню нагріваються від $t_1 = 50^\circ C$ до $t_2 = 150^\circ C$. Знайти зміну ентропії, якщо нагрівання відбувається: 1) ізохорично; 2) ізобарично.

52. *У циклі Карно робочим тілом є двоатомний газ. Визначити ККД циклу, якщо при адіабатичному розширенні об'єм газу збільшився від 8,0 до 10,2дм³.

53. *0,5кг розплавленого свинцю при температурі плавлення влили в лід при 0°C. Частина льоду розплавилася. Знайти зміну ентропії.

реальні гази, явища перенесення

54. Знайти критичний молярний об'єм азоту.
55. Розрахувати густину кисню у критичному стані.
56. Знайти середню довжину вільного пробігу атомів гелію в умовах, коли густина гелію $\rho = 21 \text{ г/м}^3$.
57. Знайти в'язкість азоту при нормальних умовах, якщо коефіцієнт дифузії для нього при цих умовах дорівнює $0,142 \text{ см}^2/\text{с}$.
58. Яка теплопровідність водню, якщо його в'язкість при таких самих умовах рівна $8,6 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$?
59. *Коефіцієнт дифузії і в'язкість кисню дорівнюють $1,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ та $\eta = 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, відповідно. Знайти при цих умовах: 1) густину кисню; 2) середню довжину вільного пробігу і 3) середню арифметичну швидкість його молекул.
60. *Знайти залежність теплопровідності κ газу від температури T в умовах ізобаричного та ізохоричного процесів. Зобразити ці залежності графічно.

4. Задачі для самостійного розв'язування

Варіант	Номер задачі						
1	1	13	32	33	36	41	50
2	2	14	33	34	39	42	51
3	3	15	34	35	40	43	52
4	4	16	35	40	42	44	53
5	5	17	26	28	35	45	54
6	6	22	38	40	38	46	55
7	7	23	29	36	46	47	56
8	8	24	28	38	41	48	57
9	9	26	29	30	42	49	58
10	11	27	28	31	39	40	59

5. Довідкові дані

Фундаментальні фізичні сталі

Гравітаційна стала	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Прискорення вільного падіння	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Стала Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Стала Лошмідта	$n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Газова стала	$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Молярний об'єм ідеального газу (н.у.)	$V_0 = 22,413 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Маса електрона	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Елементарний заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Густина деяких речовин

Речовина	$\rho \cdot 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)}$	Речовина	$\rho \cdot 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)}$
мідь	8,6	вода	1,00
залізо	7,9	гліцерин	1,26
свинець	11,3	касторове масло	0,89
ртуть	13,6	повітря	0,00129

Молярні маси деяких речовин

Речовина	Молекула	$\mu \cdot 10^{-3}, \text{ кг/моль}$	Речовина	Молекула	$\mu \cdot 10^{-3}, \text{ кг/моль}$
Азот	N ₂	28	Гелій	He	4
Аргон	Ar	40	Кисень	O ₂	32
Неон	Ne	20	Повітря	-	29
Вода	H ₂ O	18	Ртуть	Hg	201
Водень	H ₂	2	Кухонна сіль	NaCl	58
Вуглек.г.	CO ₂	44			

Нормальні умови:

$$T_0 = 273\text{K};$$

$$p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{Па} = 760 \text{мм рт.ст.} = 1 \text{атм.}$$

Питоми теплоємності для деяких речовин

Сталь: $c = 460 \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

Свинець: $c = 126 \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

Питома теплота плавлення свинцю $\lambda = 2,26 \cdot 10^4 \text{Дж}/\text{кг}$.

Символи і відносні атомні маси деяких хімічних елементів

H	He	C	N	O	Cu	K	Li	Na
1	4	12	14	16	64	39	6	23

Деякі параметри води:

питома теплота пароутворення при 100°C – $r = 2,26 \text{МДж}/\text{кг}$;

питома теплоємність – $c = 4,19 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

питома теплота плавлення при 0°C – $\lambda = 3,35 \cdot 10^5 \text{Дж}/\text{кг}$.

Критичні параметри

Елемент	$T_{кр}, \text{К}$	$p_{кр}, \text{МПа}$	Елемент	$T_{кр}, \text{К}$	$p_{кр}, \text{МПа}$
азот	126	3,4	кисень	154	5,07

Ефективні діаметри молекул

Елем ент	$\sigma, \text{нм}$	Елем ент	$\sigma, \text{нм}$
азот	0,3	гелій	0,2
	0		0

$$1\text{л} = 1\text{дм}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{м}^3;$$

$$1\text{кгс} = 9,8\text{Н};$$

$$1\text{кал} = 4,19 \text{Дж}.$$