

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання **практичних** робіт

з розділу «Молекулярна фізика і термодинаміка»

з навчальних дисциплін

«ФІЗИКА», «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної
та заочної форм навчання всіх спеціальностей)*

Методичні рекомендації до виконання **практичних** робіт з розділу **«Молекулярна фізика і термодинаміка»** з навчальних дисциплін **«Фізика»**, **«Загальна фізика»** (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел, О. М. Петченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 48 с.

Укладачі : канд. фіз.-мат. наук, доц. Г. Я. Дульфан,
канд. фіз.-мат. наук, доц. Є. І. Назаренко,
канд. фіз.-мат. наук, доц. Є. С. Орел,
д-р фіз.-мат. наук, проф. О. М. Петченко

Рецензент :

Безуглий А. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою фізики, протокол № 2 від 28 вересня 2021 р.

ЗМІСТ

Передмова	4
Перелік умовних позначень	5
Перелік основних констант	5
1 Основні закони і формули	5
1.1 Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів	5
1.2 Енергія теплового руху молекул (внутрішня енергія) газу	6
1.3 Перший закон термодинаміки	6
1.4 Рівняння Менделєєва – Клапейрона для ідеального газу	6
2 Приклади розв'язування задач.....	9
Список рекомендованих джерел.....	45

Передмова

При вивченні курсу фізики розв'язуванню задач приділяється велика увага. Розв'язування і аналіз задач дозволяє зрозуміти і запам'ятати основні закони і формули фізики, а також створити уявлення про їх характерні особливості і границі їх застосовності. Задачі розвивають навички при вирішенні конкретних питань, що мають практичне і пізнавальне значення. Це необхідно студенту в аудиторній та самостійній роботі, а також у формуванні раціонального підходу до розв'язання задач. Вміння розв'язувати задачі є напевно найкращим критерієм оцінки глибини вивчення теоретичного матеріалу та його засвоєння. Разом з тим, для розв'язання задач недостатньо формального знання фізичних законів. В окремих випадках необхідні знання спеціальних методів, прийомів, загальних для розв'язання окремих груп задач. При відсутності останніх головним стає здатність аналітичного мислення, вміння проявити інтуїцію, винахідливість тощо.

В наведених рекомендаціях теоретичний матеріал, що використовується при розв'язанні задач подається в стислому вигляді, оскільки припускається, що студент більш повну інформацію отримує з підручників, конспекта лекцій тощо.

Усі розв'язання побудовані за планом: складання необхідних рівнянь, розв'язування їх у загальному вигляді, підставлення числових значень.

Оскільки при викладанні фізики нині дається перевага одиницям СІ, то задачі розв'язані саме в цій системі.

Перелік умовних позначень

M_0 – маса молекули, кг	c – питома теплоємність речовини, Дж/(кг·К)
M – маса речовини, кг	Q – кількість тепла, Дж
μ – молярна маса, кг/моль	U – внутрішня енергія, Дж
n – концентрація молекул, м ⁻³	A_{12} – робота, Дж
p – тиск, Па	ρ – густина речовини, кг/м ³
V – об'єм, м ³	i – число ступенів вільності молекули
T – абсолютна температура, К	C – молярна теплоємність речовини, Дж/(моль·К)

Перелік основних констант

$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро;
 $k = R / N_A = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;
 $R = 8,31441$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала.

У задачах часто стан газу порівнюють із станом його за нормальних умов: $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст.); $T_0 = 273$ К (0° С); $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м³ (об'єм 1 моля довільного газу за нормальних умов).

1 Основні закони і формули

1.1 Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів має такий вигляд:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2},$$

де $\langle E_k \rangle = m_0 \langle v^2 \rangle / 2$ – середня кінетична енергія поступального руху молекули,
 $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3RT / \mu} = \sqrt{3kT / m_0}$ – середня квадратична швидкість молекули.

З урахуванням того, що середня кінетична енергія $\langle E_k \rangle$ пропорційна абсолютній температурі T і у випадку одноатомної молекули визначається формулою:

$$\langle E_k \rangle = 3kT / 2.$$

Рівняння для тиску можна подати у такому вигляді:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}.$$

У загальному випадку $\langle E_k \rangle = i k T / 2$.

Закон Дальтона. Тиск p суміші n газів дорівнює сумі парціальних тисків p_i , $i=1,2,\dots,n$ кожного із газів, що входять до суміші.

Парціальний тиск газу – це той тиск, який спричиняв би цей газ, якби тільки він знаходився у посудині, зайнятою сумішшю

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i .$$

Барометрична формула для обчислення тиску p в залежності від висоти над рівнем моря h :

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right),$$

де p_0 тиск на рівні моря.

1.2 Енергія теплового руху молекул (внутрішня енергія) газу визначається за такою формулою:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT = \frac{m}{\mu} C_V T ,$$

де $C_V = i R/2$ – молярна теплоємність газу при сталому об'ємі.

Молярна теплоємність газу при сталому тиску:

$$C_P = C_V + R = (i + 2)R / 2 .$$

1.3 Перший закон термодинаміки

Кількість тепла Q , отримана системою, іде на збільшення її внутрішньої енергії $\Delta U = U_2 - U_1$ і на виконання роботи A_{12} системою над зовнішнім середовищем:

$$Q = \Delta U + A_{12} ,$$

де $A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ – робота системи при зміні об'єму газу від V_1 до V_2 .

1.4 Рівняння Менделєєва – Клапейрона для ідеального газу має такий вигляд:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT .$$

Поділивши обидві частини рівняння на T маємо:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R.$$

Якщо маса газу не змінюється $m=const$, то одержуємо формулу Клапейрона:

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

яку для двох станів газу з параметрами p_1, V_1, T_1 та p_2, V_2, T_2 можна записати у вигляді:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

За умови незмінної маси $m=const$ та у залежності від значень інших параметрів газу V, p, T розрізняють процеси ізохоричний, ізобаричний та ізотермічний. Вважаючи відповідний параметр сталим із формули Клапейрона одержуємо відомі із шкільного курсу фізики закони.

Ізохоричний процес ($V=const$). Виконується закон Шарля:

$$\frac{p}{T} = const, \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Оскільки об'єм газу не змінюється, то робота системою не виконується $A_{12}=0$. Перший закон термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T,$$

де різниця температур $\Delta T = T_2 - T_1$.

Ізобаричний процес ($p=const$). Виконується закон Гей-Люссака:

$$\frac{V}{T} = const, \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Робота при такому процесі:

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) = p \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T.$$

Перший закон термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U + A_{12} = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} (C_V + R) \Delta T = \frac{m}{\mu} C_P \Delta T.$$

Ізотермічний процес ($T = \text{const}$). Виконується закон Бойля – Маріотта:

$$pV = \text{const}, \quad p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Оскільки температура, а відповідно і внутрішня енергія газу при ізотермічному процесі не змінюються, перший закон термодинаміки має вигляд:

$$Q = A_{12}.$$

Робота при ізотермічному процесі може бути обрахована за однією із поданих формул:

$$\begin{aligned} A_{12} &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \\ &= \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = p_2 V_2 \ln \frac{p_1}{p_2}. \end{aligned}$$

Адіабатичний процес ($Q = 0$). Процес, що проходить без теплообміну із зовнішнім середовищем називається адіабатичним.

Перший закон термодинаміки має вигляд:

$$Q = \Delta U + A_{12} = 0.$$

Стан газу описується рівнянням Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const}, \text{ або } p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma, \text{ або } \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma,$$

де $\gamma = C_p / C_V = (i+2)/i$ – показник адіабати (коефіцієнт Пуассона).

Рівняння Пуассона можна подати ще в інших виглядах:

$$\begin{aligned} 1) \quad TV^{\gamma-1} &= \text{const}, & T_1 V_1^{\gamma-1} &= T_2 V_2^{\gamma-1}, & \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}; \\ 2) \quad T p^{(1-\gamma)/\gamma} &= \text{const}, & T_1 p_1^{(1-\gamma)/\gamma} &= T_2 p_2^{(1-\gamma)/\gamma}, & \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(1-\gamma)/\gamma}. \end{aligned}$$

Робота, що виконується при адіабатичній зміні об'єму газу може бути знайдена за формулою.

$$A_{12} = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{\mu} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

2 Приклади розв'язування задач

ЗАДАЧА 1. Знайти масу m повітря в аудиторії висотою $h = 5$ м і площею підлоги $S = 200$ м², Тиск повітря $p = 100$ кПа, температура в приміщенні $t = 17$ °С. Молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Дано: $h = 5$ м $S = 200$ м ² $p = 100$ кПа $t = 17$ °С $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль $m = ?$	СІ: $= 10^5$ Па $= 390$ К	Розв'язання: Із рівняння Менделєєва – Клапейрона: $pV = mRT/\mu$ виведемо масу враховуючи, що об'єм примі-
---	-------------------------------------	---

щення дорівнює:

$$V = Sh,$$

а абсолютна температура у шкалі Кельвіна дорівнює:

$$T = t + 273.$$

Отже, шукана маса дорівнює:

$$m = \frac{pV\mu}{RT} = \frac{pSh\mu}{RT} = \frac{10^5 \cdot 200 \cdot 5 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot (17 + 273)} = 1203 \text{ кг}.$$

Відповідь: $m = 1203$ кг.

ЗАДАЧА 2. У скільки разів густина ρ_1 повітря в приміщенні взимку ($t_1 = 7$ °С) більша за його густину ρ_2 влітку ($t_2 = 37$ °С)? Тиск газу вважати сталим.

Дано: $t_1 = 7$ °С $t_2 = 37$ °С $p = const$ $\rho_1/\rho_2 = ?$	СІ: $= 280$ К $= 310$ К	Розв'язання: Із рівняння Менделєєва – Клапейрона: $pV = mRT/\mu,$
--	-----------------------------------	---

поділивши обидві його частини на об'єм, отримаємо:

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

Відношення маси газу m до його об'єму V дорівнює густині ρ :

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

що ми використали у попередній формулі. Виразимо густину з цієї формули:

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}.$$

Записавши цей вираз для стану повітря взимку (p_1, T_1, ρ_1) і влітку (p_2, T_2, ρ_2), та враховуючи умову $p_1 = p_2 = p$, маємо

$$\rho_1 = \frac{p\mu}{RT_1}, \quad \rho_2 = \frac{p\mu}{RT_2}.$$

Поділивши перший вираз на другий, маємо:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{37 + 273}{7 + 273} = \frac{310}{280} = 1,107 \approx 1,1.$$

Відповідь: $\rho_1/\rho_2 = 1,1$.

ЗАДАЧА 3. У закритому балоні об'ємом $V = 1 \text{ м}^3$ знаходиться маса $m_1 = 1,6 \text{ кг}$ кисню і маса $m_2 = 0,9 \text{ кг}$ води. Знайти тиск p у балоні при температурі $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ знаючи, що при цій температурі вся вода перетворилася на пару. Молярна маса кисню $\mu_1 = \mu(\text{O}_2) = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, молярна маса водяної пари $\mu_2 = \mu(\text{H}_2\text{O}) = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Дано:

$$V = 1 \text{ м}^3$$

$$m_1 = 1,6 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,9 \text{ кг}$$

$$t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu_1 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\mu_2 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p = ?$$

Сі:

$$= 773 \text{ K}$$

Розв'язання:

За законом Дальтона тиск p газу у балоні буде дорівнювати сумі парціальних тисків кисню p_1 і водяної пари p_2 :

$$p = p_1 + p_2.$$

Записавши для кожного газу окремо рівняння Менделєєва – Клапейрона з урахуванням того, що $V=V_1=V_2$ та $T=T_1=T_2$, маємо:

$$p_1 = \frac{m_1}{\mu_1} \frac{RT}{V}, \quad p_2 = \frac{m_2}{\mu_2} \frac{RT}{V}.$$

Підставимо ці формули у першу формулу і отримаємо:

$$p = p_1 + p_2 = \frac{m_1}{\mu_1} \frac{RT}{V} + \frac{m_2}{\mu_2} \frac{RT}{V} = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{V} =$$

$$= \left(\frac{1,6}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,9}{18 \cdot 10^{-3}} \right) \frac{8,31 \cdot (500 + 273)}{1} = 642363 \text{ Па}.$$

Відповідь: $p \approx 640 \text{ кПа}$.

ЗАДАЧА 4. Знайти масу молекули кисню, масу атома кисню.

Дано:

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$m_{\text{мол}} - ?$

$m_{\text{ат}} - ?$

Розв'язання:

Оскільки молярна маса кисню становить

$$\mu(O_2) = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль},$$

а у кожному молі речовини міститься однакова кількість молекул, а саме рівна числу Авогадро N_A , то масу однієї молекули кисню O_2 знайдемо за формулою:

$$m_{\text{мол}} = \frac{\mu}{N_A} = \frac{32 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} = 5,33 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Враховуючи, що молекула кисню складається із двох атомів кисню, маса атома кисню буде удвічі менша:

$$m_{\text{ат}} = \frac{m}{2} = \frac{5,33 \cdot 10^{-26}}{2} = 2,67 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Відповідь: $m = 5,55 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, $m_0 = 2,67 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

ЗАДАЧА 5. Яке число молекул N знаходиться у кімнаті об'ємом $V = 80 \text{ м}^3$ при температурі $t = 17^\circ\text{C}$ і тиску $p = 100 \text{ кПа}$?

Дано:

$$V = 80 \text{ м}^3$$

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

$$p = 100 \text{ кПа}$$

$m - ?$

Сі:

$$= 390 \text{ К}$$

$$= 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

Із рівняння Менделєєва – Клапейрона:

$$pV = mRT/\mu$$

знайдемо, скільки молів $\nu = m/\mu$ газу міститься у об'ємі кімнати:

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{pV}{RT}.$$

Враховуючи, що кожен моль речовини складається із N_A молекул, маємо:

$$N = N_A \frac{m}{\mu} = \frac{N_A pV}{RT} = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 10^5 \cdot 80}{8,31 \cdot (17 + 273)} = 2 \cdot 10^{27} \text{ молекул.}$$

Відповідь: $N = 2 \cdot 10^{27}$.

ЗАДАЧА 6. Знайти концентрацію молекул водню у балоні, якщо тиск $p = 266,6 \text{ Па}$, а середня квадратична швидкість його молекул $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 240 \text{ м/с}$.

Дано:

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p = 266,6 \text{ Па}$$

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 240 \text{ м/с}$$

$n - ?$

Розв'язання:

Із виразу для тиску

$$p = 2n \langle E_k \rangle / 3 = (2/3) n m_0 \langle v^2 \rangle / 2,$$

де $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$ – маса однієї молекули; знайдемо концентрацію молекул:

$$n = \frac{3p}{m_0 \langle v^2 \rangle} = \frac{3p N_A}{\mu \langle v^2 \rangle} = \frac{3 \cdot 266,6 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 240^2} \approx 4,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Відповідь: $n \approx 4,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

ЗАДАЧА 7. Середня квадратична швидкість молекул деякого газу $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 450 \text{ м/с}$. Тиск газу $p = 50 \text{ кПа}$. Знайти густину газу за таких умов.

Дано:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 450 \text{ м/с}$$

$$p = 50 \text{ кПа}$$

$\rho - ?$

Сі:

$$= 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Розв'язання:

За означенням густина ρ газу – це маса одиниці об'єму газу. Тому густину можна

знайти знаючи масу однієї молекули m_0 і кількість таких молекул у одиниці об'єму, тобто концентрацію n :

$$\rho = m_0 n.$$

Із рівняння для тиску

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

виведемо формулу для концентрацію молекул:

$$n = \frac{3p}{m_0 \langle v^2 \rangle}.$$

Отже, для густини знаходимо:

$$\rho = m_0 n = m_0 \frac{3p}{m_0 \langle v^2 \rangle} = \frac{3p}{\langle v^2 \rangle} = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^4}{450^2} = 0,74 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: $\rho = 0,74 \text{ кг/м}^3$.

ЗАДАЧА 8. Знайти внутрішню енергію U маси $m = 20 \text{ г}$ кисню при температурі $t_1 = 17^\circ\text{C}$. Яка частина цієї енергії припадає на поступальний рух молекул і яка – на обертальний?

Дано:

$$m = 20 \text{ г}$$

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$t_1 = 17^\circ\text{C}$$

$$U - ?$$

$$U_{\text{пост}} - ?$$

$$U_{\text{оберт}} - ?$$

СІ:

$$= 0,020 \text{ кг}$$

$$= 390 \text{ К}$$

Розв'язання:

Внутрішню енергію кисню знайдемо за формулою:

$$U = (i/2) (m/\mu) RT.$$

Оскільки кисень – двоатомний газ, то кількість ступенів вільності $i = 5$. Причому на поступальний рух припадає $i = 3$, на обертальний $i = 2$. Підставивши чисельні значення у формулу, маємо:

$$U = \frac{5}{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} 8,31 \cdot (17 + 273) = 3765 \text{ Дж.}$$

На поступальний рух припадає

$$U_{\text{пост}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} 8,31 \cdot (17 + 273) = 2259 \text{ Дж,}$$

на обертальний –

$$U_{\text{оберт}} = \frac{2}{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot (17 + 273) = 1506 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $U = 3765 \text{ Дж}$, $U_{\text{пост}} = 2259 \text{ Дж}$, $U_{\text{оберт}} = 1506 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 9. Енергія поступального руху молекул азоту, що знаходиться у балоні об'ємом $V = 20 \text{ л}$, $U = 5 \text{ кДж}$, а середня квадратична швидкість його молекул $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 2000 \text{ м/с}$. Знайти масу m азоту у балоні та тиск p , під яким він знаходиться.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$		
$V = 20 \text{ л}$	$= 0,020 \text{ м}^3$	Енергія поступального руху – це кінетична енергія усіх молекул азоту:
$U = 5 \text{ кДж}$	$= 5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$	
$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 2000 \text{ м/с}$		
$m - ?$		$U = m \langle v^2 \rangle / 2.$
$p - ?$		

З цієї формули виразимо масу газу

$$m = \frac{2U}{\langle v^2 \rangle} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3}{(2 \cdot 10^3)^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Енергію поступального руху можна також записати на основі загальної формули для внутрішньої енергії враховуючи, що поступальних ступенів свободи $i = 3$:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT.$$

Із рівняння Менделєєва – Клапейрона виразимо тиск

$$p = \frac{m}{\mu} RT \cdot \frac{1}{V}.$$

Із формули для енергії поступального руху газу комбінацію таких величин:

$$\frac{m}{\mu} RT = \frac{2U}{3}.$$

і підставимо її у попередню формулу

$$p = \frac{2U}{3V} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^3}{3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 0,167 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Відповідь: $p = 167 \text{ кПа}$.

ЗАДАЧА 10. Знайти питому теплоємність кисню c для а) $V = \text{const}$; б) $p = \text{const}$.

Дано:

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\text{а) } V = \text{const}$$

$$\text{б) } p = \text{const}$$

$$c = ?$$

Розв'язання:

Питома теплоємність – це кількість тепла, яку потрібно передати одному кілограму речовини, щоб збільшити її температуру на один градус. Питома теплоєм-

ність c пов'язана з молярною теплоємністю C виразом

$$c = \frac{C}{\mu}.$$

При сталому об'ємі і сталому тиску цю формулу можна записати відповідно

$$c_V = \frac{C_V}{\mu}, \quad c_p = \frac{C_p}{\mu}.$$

Оскільки кисень – двоатомний газ, то кількість ступенів вільності $i=5$. Молярні теплоємності дорівнюють:

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad C_p = C_V + R = \left(\frac{i}{2} + 1\right)R.$$

Тоді

$$c_V = \frac{iR}{2\mu} = \frac{5 \cdot 8,31}{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} \approx 650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)},$$

$$c_p = \frac{(i+2)R}{2\mu} = \frac{(5+2) \cdot 8,31}{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} \approx 910 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Відповідь: $c_V = 650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, $c_p = 910 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

ЗАДАЧА 11. Знайти відношення молярних теплоємностей C_p/C_V для газової суміші, що складається із маси $m_1 = 8 \text{ г}$ гелію і маси $m_2 = 16 \text{ г}$ кисню.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$m_1 = 8 \text{ г}$	$= 8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$	Внутрішні енергії компонент суміші визначають за такими формулами:
$\mu_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$		
$m_2 = 16 \text{ г}$	$= 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$	
$\mu_2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$		
$C_p/C_V - ?$		

$$U_1 = \frac{i_1}{2} \cdot \frac{m_1}{\mu_1} RT,$$

$$U_2 = \frac{i_2}{2} \cdot \frac{m_2}{\mu_2} RT,$$

де i_1 і i_2 – число ступенів вільності кожного компонента.

Запишемо формулу для визначення внутрішньої енергії суміші газів:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{i_1}{2} \cdot \frac{m_1}{\mu_1} RT + \frac{i_2}{2} \cdot \frac{m_2}{\mu_2} RT.$$

З іншого боку

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT,$$

де i , $m = m_1 + m_2$, μ – число ступенів вільності, маса і молярна маса суміші газів відповідно.

Порівнюючи праві частини двох попередніх виразів, визначимо число ступенів вільності i суміші газів:

$$\frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT = \frac{i_1}{2} \cdot \frac{m_1}{\mu_1} RT + \frac{i_2}{2} \cdot \frac{m_2}{\mu_2} RT, \quad \frac{RT}{2} \cdot i \frac{m}{\mu} = \frac{RT}{2} \left(i_1 \cdot \frac{m_1}{\mu_1} + i_2 \cdot \frac{m_2}{\mu_2} \right),$$

$$i = \frac{i_1 \cdot \frac{m_1}{\mu_1} + i_2 \cdot \frac{m_2}{\mu_2}}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}} = \frac{3 \cdot \frac{8}{4} + 5 \cdot \frac{16}{32}}{\frac{8}{4} + \frac{16}{32}} = 3,4.$$

При виведенні останньої формули був використаний той факт, що кількість речовини всієї суміші дорівнює сумі кількостей речовини кожного компонента:

$$v = \frac{m}{\mu} = v_1 + v_2 = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}.$$

Молярні теплоємності дорівнюють:

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad C_p = C_V + R = \left(\frac{i}{2} + 1\right)R.$$

Їхнє відношення

$$\frac{C_p}{C_V} = \frac{\frac{i}{2}R + R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i} = \frac{3,4+2}{3,4} \approx 1,59.$$

Відповідь: $\frac{C_p}{C_V} \approx 1,59.$

ЗАДАЧА 12. Маса $m = 10$ г кисню знаходиться під тиском $p = 0,3$ МПа і температурі $t = 10$ С. Після нагрівання при $p = \text{const}$ газ зайняв об'єм $V_2 = 10$ л. Знайти кількість тепла Q , отриману газом, та енергію теплового руху молекул газу до U_1 і після U_2 нагрівання.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$m = 10$ г	$= 10^{-2}$ кг	Кількість тепла, отриманого газом
$p = 0,3$ МПа	$= 3 \cdot 10^5$ Па	
$t = 10$ С	$= 283$ К	$Q = m C_p \Delta T / \mu = m C_p (T_2 - T_1) T / \mu,$
$p = \text{const}$		
$V_2 = 10$ л	$= 10^{-2}$ м ³	де $C_p = 29,1$ Дж/(моль·К) – молярна теплоємність двоатомного газу (кисню) при сталому тиску.
$Q - ?$		
$U_1 - ?$		
$U_2 - ?$		

Температуру T_2 знайдемо із рівняння стану газу до і після нагрівання:

$$pV_1 = \frac{m}{\mu}RT_1, \quad pV_2 = \frac{m}{\mu}RT_2.$$

З першої формули виразимо V_1 , а з другої – T_2 :

$$V_1 = \frac{mRT_1}{\mu p}, \quad T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1}.$$

Підставимо перше у друге

$$T_2 = \frac{V_2 \mu p}{mR} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} = 1156 \text{ К}.$$

Таким чином:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_p (T_2 - T_1) = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} 29,1 \cdot (1156 - 283) = 7900 \text{ Дж.}$$

З урахуванням того, що для двохатомного газу $i=5$, внутрішня енергія газу до U_1 і після U_2 нагрівання обчислюється так:

$$U_1 = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT_1 = \frac{5}{2} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} 8,31 \cdot 283 = 1800 \text{ Дж,}$$

$$U_2 = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT_2 = \frac{5}{2} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} 8,31 \cdot 1156 = 7600 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $Q = 7900 \text{ Дж}$, $U_1 = 1800 \text{ Дж}$, $U_2 = 7600 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 13. У посудині об'ємом $V_1 = 2 \text{ л}$ знаходиться азот під тиском $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$. Яку кількість тепла Q треба передати азоту, щоб: а) при $p = \text{const}$ об'єм збільшився вдвічі, б) при $V = \text{const}$ тиск збільшився вдвічі?

Дано: $V=2 \text{ л}$, $p=0,1 \text{ МПа}$, а) при $p=\text{const}$, $V_2=2V_1$; б) при $V=\text{const}$, $p_2=2p_1$. Знайти Q .

Дано:	Сі:	Розв'язання:
$i = 5$		
$V_1 = 2 \text{ л}$	$= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$	а) При $p = \text{const}$ кількість тепла, отриманого газом визначається за формулою
$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$	$= 10^5 \text{ Па}$	
а) $p = \text{const}$		$Q = m C_p \Delta T / \mu,$
$V_2 / V_1 = 2$		
б) $V = \text{const}$		де $C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – молярна теплоємність двохатомного газу (кисню) при сталому тиску.
$p_2 / p_1 = 2$		
$Q = ?$		

му тиску.

З рівняння Менделєєва – Клапейрона, записаного для початкового і кінцевого станів

$$pV_1 = \frac{m}{\mu} RT_1, \quad pV_2 = \frac{m}{\mu} RT_2.$$

Відніmemo з другої формули першу і поміняємо місцями ліву частину одержаного рівняння з правою:

$$p\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T, \quad \frac{m}{\mu} \Delta T = \frac{p\Delta V}{R}.$$

Підставимо це у першу формулу розв'язання і отримаємо кінцеву формулу та відповідь до першої частини задачі:

$$Q = \frac{p\Delta VC_p}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 29,1}{8,31} = 700 \text{ Дж.}$$

б) Кількість тепла при $V = const$ визначається так:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T.$$

З рівняння Менделєєва – Клапейрона, записаного для початкового і кінцевого станів

$$p_1 V = \frac{m}{\mu} R T_1, \quad p_2 V = \frac{m}{\mu} R T_2.$$

Віднімемо з другої формули першу і поміняємо місцями ліву частину одержаного рівняння з правою:

$$(p_2 - p_1) V = \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1), \quad \frac{m}{\mu} \Delta T = \frac{V \Delta p}{R}.$$

Підставимо це у першу формулу випадку б) і отримаємо кінцеву формулу та відповідь до другої частини задачі:

$$Q = \frac{V C_V \Delta p}{R} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 20,8 \cdot 0,1 \cdot 10^6}{8,31} = 500 \text{ Дж.}$$

Відповідь: а) $Q = 700 \text{ Дж}$; б) $Q = 500 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 14. У закритому балоні об'ємом $V = 2 \text{ л}$ знаходиться азот, густина якого $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$. Яку кількість тепла Q треба передати азоту, щоб нагріти його на $\Delta T = 100 \text{ К}$?

Дано:

$$V = 2 \text{ л}$$

$$\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$$

$$\Delta T = 100 \text{ К}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$Q = ?$$

Сі:

$$= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Розв'язання:

Оскільки об'єм азоту не змінюється, кількість тепла можна знайти за формулою

$$Q = m C_V \Delta T / \mu,$$

де $C_V = 20,8 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – молярна теплоємність двоатомного газу (азоту) при сталому об'ємі.

Враховуючи, що $m = \rho V$, маємо:

$$Q = \frac{\rho V}{\mu} C_V \Delta T = \frac{1,4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} 20,8 \cdot 100 = 208 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $Q = 208 \text{ Дж.}$

ЗАДАЧА 15. Для нагрівання деякої маси газу на $\Delta t_1 = 50^\circ\text{C}$ при $p = \text{const}$ необхідно витратити кількість тепла $Q_1 = 670 \text{ Дж}$. Якщо ту ж саму масу газу охолодити на $\Delta t_2 = 100^\circ\text{C}$ при $V = \text{const}$, то виділиться кількість тепла $Q_2 = 1005 \text{ Дж}$. Яке число ступенів свободи i мають молекули цього газу?

Дано:

$$\Delta t_1 = 50^\circ\text{C}$$

$$p = \text{const}$$

$$Q_1 = 670 \text{ Дж}$$

$$\Delta t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$V = \text{const}$$

$$Q_2 = 1005 \text{ Дж}$$

$$i - ?$$

Розв'язання:

Число ступенів вільностей однозначно пов'язане з відношенням молярних теплоємностей, а саме як:

$$\gamma = C_p/C_V = (i + 2)/i.$$

Виразимо з цієї формули i :

$$i = 2/(\gamma - 1).$$

Записавши формули для кількості тепла, що передається газу (чи відбирається від нього) при сталому тиску і сталому об'ємі:

$$Q_1 = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T_1 = \frac{m}{\mu} C_p \Delta t_1, \quad Q_2 = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T_2 = \frac{m}{\mu} C_V \Delta t_2.$$

Поділимо першу формулу на другу а потім виразимо γ .

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_p}{C_V} \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \gamma \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}, \quad \gamma = \frac{Q_1 \cdot \Delta t_2}{Q_2 \cdot \Delta t_1} = \frac{670 \cdot 100}{1005 \cdot 50} = 1,33.$$

Тепер обчислимо i :

$$i = \frac{2}{\gamma - 1} = \frac{2}{1,33 - 1} = 6.$$

Відповідь: $i = 6$.

ЗАДАЧА 16. Маса $m = 10 \text{ г}$ азоту знаходиться у закритому балоні при температурі при $t_1 = 7^\circ\text{C}$. Яку кількість тепла треба передати азоту, щоб

збільшити середню квадратичну швидкість його молекул удвічі? У скільки разів при цьому зміниться температура газу? У скільки разів зміниться тиск газу на стінки балона?

Дано:

$$m = 10 \text{ г}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$t_1 = 7^\circ \text{C}$$

$$\sqrt{\langle v_2^2 \rangle} / \sqrt{\langle v_1^2 \rangle} = 2$$

$$Q - ?$$

$$T_2/T_1 - ?$$

$$p_2/p_1 - ?$$

Сі:

$$= 10^{-2} \text{ кг}$$

Розв'язання:

Оскільки процес проходить при сталому об'ємі, то все тепло йде на збільшення внутрішньої енергії. Тому:

$$Q = U_2 - U_1 = m C_V (T_2 - T_1) / \mu.$$

Температура і середня квадратична швидкість однозначно зв'язані між собою формулою:

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3RT/\mu}.$$

Записавши цю формулу для двох станів газу:

$$\sqrt{\langle v_1^2 \rangle} = \sqrt{3RT_1/\mu},$$

$$\sqrt{\langle v_2^2 \rangle} = \sqrt{3RT_2/\mu},$$

і враховуючи умову задачі, що

$$\sqrt{\langle v_2^2 \rangle} / \sqrt{\langle v_1^2 \rangle} = 2,$$

маємо

$$\frac{\sqrt{3RT_2/\mu}}{\sqrt{3RT_1/\mu}} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = 2.$$

Виразимо звідси T_2 :

$$T_2 = 4T_1.$$

Це є відповідь на друге питання задачі:

$$\frac{T_2}{T_1} = 4.$$

Відповідь на перше питання задачі:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_V (4T_1 - T_1) = \frac{3T_1 m C_V}{\mu} = \frac{3 \cdot 280 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 20,8}{28 \cdot 10^{-3}} = 6240 \text{ Дж}.$$

Запишемо рівняння ізохорного процесу:

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

і отримає відповідь на третє питання задачі:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_1}{4T_1} = \frac{1}{4}.$$

Відповідь: $Q = 6240$ Дж, $T_2/T_1 = 4$, $p_2/p_1 = 4$.

ЗАДАЧА 17. Обсерваторія розташована на висоті $h = 3250$ м над рівнем моря. Знайти тиск p повітря на цій висоті. Температуру повітря вважати сталою і рівною $t = 5^\circ\text{C}$. Молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Тиск повітря на рівні моря $p_0 = 101,3$ кПа.

Дано: $h = 3250$ м $t = 5^\circ\text{C}$ $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль $p_0 = 101,3$ кПа $p - ?$	Сі: $= 278$ К $= 1,013 \cdot 10^5$ Па	Розв'язання: Скориставшись барометричною формулою, отримаємо відповідь: $p = p_0 \exp(-\mu g h / (kT)),$
--	---	--

$$p = 101300 \exp\left(-\frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 3250}{8,31 \cdot 278}\right) = 67903 \text{ Па}.$$

Відповідь: $p = 67,9$ кПа.

ЗАДАЧА 18. На якій висоті h густина газу вдвічі менша, ніж його густина на рівні моря? Температуру газу вважати сталою і рівною $t = 0^\circ\text{C}$. Задачу розв'язати для: а) повітря; б) водню.

Дано: $\rho = 2\rho_0$ $t = 0^\circ\text{C}$ а) $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль б) $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль $h - ?$	Розв'язання: У барометричній формулі $p = p_0 \exp(-\mu g h / RT)$
--	--

тиски p на висоті h і p_0 на рівні моря виразимо через густину газу

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

скориставшись рівнянням Менделєєва – Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad p = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad p_0 = \frac{\rho_0}{\mu} RT.$$

Одержані два останні формули підставимо у барометричну формулу:

$$\frac{\rho}{\mu} RT = \frac{\rho_0}{\mu} RT \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right).$$

Після скорочення маємо формулу для залежності густини газу від висоти:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right).$$

Оскільки за умовою $\rho = 2\rho_0$, маємо:

$$\exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right) = \frac{1}{2}.$$

Виразимо h :

$$-\frac{\mu gh}{RT} = \ln\left(\frac{1}{2}\right), \quad h = -\frac{RT}{\mu g} \ln\left(\frac{1}{2}\right).$$

Для повітря:

$$h = -\frac{RT}{\mu g} \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{8,31 \cdot 273}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} \ln\left(\frac{1}{2}\right) = 5527 \text{ м.}$$

Для водню:

$$h = -\frac{RT}{\mu g} \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{8,31 \cdot 273}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} \ln\left(\frac{1}{2}\right) = 80142 \text{ м.}$$

Відповідь: а) $h = 5527 \text{ м}$, б) $h = 80142 \text{ м}$.

ЗАДАЧА 19. Знайти середню довжину вільного пробігу $\bar{\lambda}$, молекул повітря за нормальних умов. Діаметр молекул повітря $d = 0,3 \text{ нм}$.

Дано: $p = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $T = 273 \text{ К}$ $d = 0,3 \text{ нм}$ $\bar{\lambda} - ?$	СІ: $= 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$	Розв'язання: Середня довжина вільного пробігу $\bar{\lambda}$ знаходиться за формулою $\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}$
---	---------------------------------------	--

Із формули для тиску

$$p = n k T$$

знайдемо концентрацію n , підставивши у формулу для $\bar{\lambda}$, отримаємо:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (0,3 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 1,01 \cdot 10^5} = 93 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Відповідь: $\bar{\lambda} = 93 \text{ нм}$.

ЗАДАЧА 20. Знайти середню кількість зіткнень \bar{z} за одиницю часу молекул вуглекислого газу при температурі $t = 100^\circ \text{C}$, якщо середня довжина вільного пробігу $\bar{\lambda} = 870 \text{ мкм}$.

Дано: $t = 100^\circ \text{C}$ $\bar{\lambda} = 870 \text{ мкм}$ $\mu = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $\bar{z} - ?$	СІ: $= 373 \text{ К}$ $= 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	Розв'язання: Середня кількість зіткнень \bar{z} за одиницю часу знаходиться за формулою $\bar{z} = \frac{\langle v \rangle}{\bar{\lambda}},$
---	---	--

де

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

– середня арифметична швидкість. Тому

$$\bar{z} = \frac{1}{\bar{\lambda}} \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} = \frac{1}{870 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 373}{3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3}}} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Відповідь: $\bar{z} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

ЗАДАЧА 21. У скільки разів зменшиться число зіткнень \bar{z} за одиницю часу молекул двохатомного газу, якщо об'єм газу адіабатично збільшити у 2 рази?

Дано:

$$V_2 = 2V_1$$

$$Q = 0$$

$$i = 5$$

$$\bar{z}_1 / \bar{z}_2 = ?$$

Розв'язання:

Оскільки середня кількість зіткнень \bar{z} за одиницю часу знаходиться за формулою

$$\bar{z} = \frac{\langle v \rangle}{\bar{\lambda}},$$

де

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

– середня арифметична швидкість молекули, а

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

– середня довжина вільного пробігу молекули. Тому

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \cdot \sqrt{2}\pi d^2 n = 4d^2 n \sqrt{\frac{RT\pi}{\mu}}.$$

Запишемо цей вираз для двох станів газу

$$\bar{z}_1 = 4d^2 n_1 \sqrt{\frac{RT_1\pi}{\mu}}, \quad \bar{z}_2 = 4d^2 n_2 \sqrt{\frac{RT_2\pi}{\mu}}.$$

Візьмемо їхнє відношення:

$$\frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2} = \frac{n_1}{n_2} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}.$$

При адіабатичному розширенні зв'язок між температурами і об'ємами обчислюється за формулою

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

де γ – показник адіабати, який для двохатомного газу ($i = 5$) дорівнює $\gamma = 1,4$.

Тому для відношення температур маємо таке значення:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{2V_1}{V_1} \right) = 2^{0,4}.$$

Оскільки при збільшенні об'єму у два рази, концентрація молекул відповідно зменшиться у два рази, то $n_2 = n_1/2$. У підсумку отримаємо

$$\frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2} = \frac{n_1}{n_1/2} \sqrt{2^{0,4}} = 2 \cdot 2^{0,2} = 2^{1,2} = 2,3.$$

Відповідь: 2,3 рази.

ЗАДАЧА 22. При деякому тиску і температурі $t = 0^\circ\text{C}$ середня довжина вільного пробігу молекул кисню $\bar{\lambda}_1 = 95 \text{ нм}$. Знайти середнє число зіткнень \bar{z} за одиницю часу молекул кисню, якщо при тій же температурі тиск кисню зменшити у 100 разів?

Дано:
 $t = 0^\circ\text{C}$
 $\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
 $\bar{\lambda}_1 = 95 \text{ нм}$
 $p_2 = p_1/100$

СІ:
 $= 273 \text{ K}$
 $= 9,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$

Розв'язання:

Оскільки середня кількість зіткнень за одиницю часу знаходиться за формулою

$$\bar{z} = \frac{\langle v \rangle}{\bar{\lambda}},$$

$\bar{z} - ?$

де

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

– середня арифметична швидкість молекули, а

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

– середня довжина вільного пробігу молекули.

Тому для двох станів газу з тисками p_1 і $p_2 = p_1/100$ довжина вільного пробігу молекули буде дорівнювати

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p_1}, \quad \bar{\lambda}_2 = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p_2} = \frac{kT \cdot 100}{\sqrt{2}\pi d^2 p_1}.$$

Розділимо другу формулу на першу

$$\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} = \frac{p_1}{p_2} = 100, \quad \bar{\lambda}_2 = 100 \cdot \bar{\lambda}_1.$$

Остаточний результат буде таким:

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \cdot \frac{1}{100\bar{\lambda}_1} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 273}{3,14 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}} \cdot \frac{1}{100 \cdot 95 \cdot 10^{-9}} = 4,5 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}.$$

Відповідь: $\bar{z} = 4,5 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$.

ЗАДАЧА 23. Знайти середній час $\bar{\tau}$ між двома послідовними зіткненнями молекул азоту при тиску $p = 133 \text{ Па}$ і температурі $t = 10^\circ \text{C}$.

Дано: $p = 133 \text{ Па}$ $t = 10^\circ \text{C}$ $\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $\bar{\tau} - ?$	СІ: $= 283 \text{ К}$	Розв'язання: Знайдемо час, за який молекула подолає відстань, що дорівнює довжині вільного пробігу
--	------------------------------	---

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{\lambda}}{\langle v \rangle},$$

де

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

– середня арифметична швидкість молекули, а

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

– середня довжина вільного пробігу молекули. Підставимо дві останні формули у першу

$$\bar{\tau} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} = \frac{k}{4d^2 p} \sqrt{\frac{\mu T}{\pi R}}.$$

Підставимо чисельні значення:

$$\bar{\tau} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23}}{4(0,3 \cdot 10^{-9})^2 133} \sqrt{\frac{0,028 \cdot 283}{3,14 \cdot 8,31}} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ c}.$$

Відповідь: $\bar{\tau} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ c}$.

ЗАДАЧА 24. Який тиск p треба створити всередині сферичної посудини, щоб молекули не зіштовхувались між собою, якщо діаметр посудини: а) $D = 1 \text{ см}$; б) $D = 10 \text{ см}$; в) $D = 100 \text{ см}$. Діаметр молекул газу $d = 0,3 \text{ нм}$. Температура $T = 273 \text{ К}$.

Дано:

а) $D = 1 \text{ см}$

б) $D = 10 \text{ см}$

в) $D = 100 \text{ см}$

$d = 0,3 \text{ нм}$

$T = 273 \text{ К}$

$p = ?$

СІ:

$= 0,01 \text{ м}$

$= 0,1 \text{ м}$

$= 1 \text{ м}$

$= 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Розв'язання:

Щоб молекули не зіштовхувались між собою необхідно щоб довжина вільного пробігу була не меншою, ніж геометричні розміри посудини, тобто щоб виконувалась умова

$$\bar{\lambda} \geq D,$$

де

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}$$

– середня довжина вільного пробігу молекули. Підставимо цю формулу у нерівність і отримаємо

$$\frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \geq D.$$

Отже, умова, яка накладається на тиск, має вигляд

$$p \leq \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 D} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{\sqrt{2} \cdot 3,14 (0,3 \cdot 10^{-9})^2 D} = \frac{9,43 \cdot 10^{-3}}{D}.$$

Відповідно для випадків а), б), в) маємо

$$p \leq \frac{9,43 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} = 9,43 \cdot 10^{-1} \text{ Па},$$

$$p \leq \frac{9,43 \cdot 10^{-3}}{10^{-1}} = 9,43 \cdot 10^{-2} \text{ Па}.$$

$$p \leq \frac{9,43 \cdot 10^{-3}}{1} = 9,43 \cdot 10^{-3} \text{ Па}.$$

Відповідь: а) $p \leq 943 \text{ мПа}$; б) $p \leq 94,3 \text{ мПа}$; в) $p \leq 9,43 \text{ мПа}$.

ЗАДАЧА 25. Маса $m = 10 \text{ г}$ кисню знаходиться під тиском $p = 300 \text{ кПа}$ і температурі $t_1 = 10^\circ \text{C}$. Після нагрівання при $p = \text{const}$ газ зайняв об'єм $V_2 = 10 \text{ л}$. Знайти кількість тепла Q , отриману газом, зміну внутрішньої енергії газу ΔU та роботу A , виконану газом при розширенні.

Дано:

$$m = 10 \text{ г}$$

$$\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p = 300 \text{ кПа}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$p = \text{const}$$

$$V_2 = 10 \text{ л}$$

$$Q = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$A = ?$$

СІ:

$$= 10^{-2} \text{ кг}$$

$$= 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$= 283 \text{ К}$$

$$= 10^{-2} \text{ м}^3$$

Розв'язання:

Кількість тепла при ізобаричному процесі обчислюють за формулою

$$Q = m C_p \Delta T / \mu,$$

де $C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – молярна теплоємність газу при $p = \text{const}$, для двоатомного газу.

Згідно з першим законом термодинаміки

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

де

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

– зміна внутрішньої енергії,

$$A = p \Delta V$$

– виконана робота.

Із рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$p \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

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

Підставимо це у формули для 1) кількості тепла; 2) зміни внутрішньої енергії

$$Q = \frac{C_p A}{R},$$

$$\Delta U = \frac{i}{2} p \Delta V = \frac{i}{2} A.$$

Об'єм V_1 , що займав газ на початку процесу знайдемо із рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$V_1 = \frac{m R T_1}{\mu p} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 283}{32 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^5} = 0,245 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

Зміна об'єму дорівнює

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 10^{-2} - 0,245 \cdot 10^{-2} = 0,755 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

Шукані величини дорівнюють

$$A = p\Delta V = 3 \cdot 10^5 \cdot 0,755 \cdot 10^{-2} = 2,27 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

$$Q = \frac{C_p A}{R} = \frac{29,1 \cdot 2,27 \cdot 10^3}{8,31} = 7,93 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

$$\Delta U = \frac{i}{2} A = \frac{5}{2} 2,27 \cdot 10^3 = 5,66 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

Перевірка:

$$Q = \Delta U + A = 5,66 \cdot 10^3 + 2,27 \cdot 10^3 = 7,93 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Відповідь: $Q = 7,93 \text{ кДж}$, $\Delta U = 5,66 \text{ кДж}$, $A = 2,27 \text{ кДж}$.

ЗАДАЧА 26. У закритій посудині знаходиться маса $m_1 = 20 \text{ г}$ азоту і маса $m_2 = 32 \text{ г}$ кисню. Знайти зміну внутрішньої енергії суміші газів ΔU при охолодженні її на $\Delta T = 28 \text{ К}$.

Дано:

$$V = \text{const}$$

$$m_1 = 20 \text{ г}$$

$$\mu_1 = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$m_2 = 32 \text{ г}$$

$$t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 28 \text{ К}$$

$$\Delta U - ?$$

Сі:

$$= 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

$$= 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

Розв'язання:

Оскільки робота не виконується, то все тепло йде на збільшення внутрішньої Енергії

$$Q = \Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2,$$

де ΔU_1 і ΔU_2 – зміна внутрішньої енергії

азоту і кисню відповідно. Тоді

$$Q = \frac{i}{2} \cdot \frac{m_1}{\mu_1} R \Delta T + \frac{i}{2} \cdot \frac{m_2}{\mu_2} R \Delta T = \frac{i}{2} \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) R \Delta T =$$

$$= \frac{5}{2} \left(\frac{20 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} + \frac{32 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \right) 8,31 \cdot 28 = 997,2 \text{ Дж} \approx 1 \text{ кДж}.$$

Відповідь: $Q = 1 \text{ кДж}$.

ЗАДАЧА 27. Двохатомному газу надана кількість тепла $Q = 2,093 \text{ кДж}$. Газ розширюється при $p = \text{const}$. Знайти роботу A , виконану газом при розширенні.

Дано:

$$i = 5$$

$$Q = 2,093 \text{ кДж}$$

$$p = \text{const}$$

$$A - ?$$

Сі:

$$= 2,093 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$$

Розв'язання:

Згідно з першим законом термодинаміки

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

де ΔU – зміна внутрішньої енергії,

$$A = p\Delta V$$

– виконана робота,

$$Q = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T$$

– кількість тепла при ізобаричному процесі.

Із рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$p\Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

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

Підставимо це у формулу для кількості тепла і отримаємо кінцеву формулу, ізолювавши A ,

$$Q = \frac{C_p A}{R},$$

де $C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – молярна теплоємність газу при $p = \text{const}$, для двоатомного газу,

$$A = \frac{QR}{C_p} = \frac{2093 \cdot 8,31}{29,1} = 598 \text{ Дж}.$$

Відповідь: $A = 598 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 28. У посудині під поршнем знаходиться маса $m = 1 \text{ г}$ азоту. Яку кількість тепла Q треба витратити, щоб нагріти азот на $\Delta T = 10 \text{ К}$? На скільки при цьому підніметься поршень? Маса поршня $M = 1 \text{ кг}$, площа його поперечного перерізу $S = 10 \text{ см}^2$. Тиск над поршнем $p = 100 \text{ кПа}$.

Дано:

$$m = 1 \text{ г}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\Delta T = 10 \text{ К}$$

$$M = 1 \text{ кг}$$

$$S = 10 \text{ см}^2$$

$$p = 100 \text{ кПа}$$

$$Q - ?$$

$$\Delta h - ?$$

СІ:

$$= 10^{-3} \text{ кг}$$

$$= 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$= 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

Кількість тепла при ізобаричному процесі обчислюють за формулою

$$Q = m C_p \Delta T / \mu,$$

де $C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – молярна теплоємність газу при $p = \text{const}$, для дво атомного газу

Обчислимо кількість тепла

$$Q = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} 29,1 \cdot 10 = 10,39 \text{ Дж.}$$

Згідно з першим законом термодинаміки частина цього тепла йде на збільшення внутрішньої енергії газу ΔU , а частина – на виконання роботи A

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

Обчислимо зміну внутрішньої енергії ΔU

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{5}{2} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} 8,31 \cdot 10 = 7,42 \text{ Дж,}$$

і роботу A

$$A = Q - \Delta U = 10,39 - 7,42 = 2,97 \text{ Дж.}$$

Необхідно врахувати, що робота A складається із роботи зі зміни об'єму

$$A_1 = p \Delta V$$

та роботи проти сил тяжіння при підйомі поршня на висоту Δh

$$A_2 = F \Delta h.$$

Тому

$$A = A_1 + A_2 = p \Delta V + F \Delta h = p S \Delta h + M g \Delta h = (p S + M g) \Delta h.$$

Звідки

$$\Delta h = \frac{A}{p S + M g} = \frac{2,97}{10^5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 9,8} = 0,027 \text{ м.}$$

Відповідь: $\Delta h = 2,7 \text{ см.}$

ЗАДАЧА 29. Маса $m = 10,5 \text{ г}$ азоту ізотермічно розширюється при температурі $t = -23 \text{ }^\circ\text{C}$, причому його тиск змінюється від $p_1 = 250 \text{ кПа}$ до $p_2 = 100 \text{ кПа}$. Знайти роботу A , яку виконує газ при розширенні.

Дано:

$$m = 10,5 \text{ г}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T = \text{const}$$

$$t = -23 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_1 = 250 \text{ кПа}$$

$$p_2 = 100 \text{ кПа}$$

$$A = ?$$

Сі:

$$= 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

$$= 250 \text{ К}$$

$$= 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$= 10^5 \text{ Па}$$

Розв'язання:

При ізотермічному розширенні роботу обчислюють за формулою

$$A = (m/\mu) RT \ln(V_2/V_1).$$

Запишемо рівняння ізотермічного процесу

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

Підставимо другу формулу у першу і отримаємо відповідь

$$A = RT \frac{m}{\mu} \ln \frac{p_1}{p_2} = 8,31 \cdot 250 \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{2,5 \cdot 10^5}{10^5} = 714 \text{ Дж}.$$

Відповідь: $A = 714 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 30. При ізотермічному розширенні газу, який займав об'єм $V_1 = 2 \text{ м}^3$, тиск його змінюється від $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ до $p_2 = 0,4 \text{ кПа}$. Знайти роботу A , яку виконує газ при розширенні.

Дано:

$$T = \text{const}$$

$$V_1 = 2 \text{ м}^3$$

$$p_1 = 0,5 \text{ МПа}$$

$$p_2 = 0,4 \text{ кПа}$$

$$A = ?$$

Сі:

$$= 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$= 400 \text{ Па}$$

Розв'язання:

При ізотермічному розширенні роботу обчислюють за формулою

$$A = (m/\mu) RT \ln(V_2/V_1).$$

Запишемо рівняння ізотермічного процесу

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

Підставимо другу формулу у першу

$$A = RT \frac{m}{\mu} \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Враховуючи рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT,$$

маємо

$$A = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \ln \frac{0,5 \cdot 10^6}{0,4 \cdot 10^6} = 223 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Відповідь: $A = 223 \text{ кДж}$.

ЗАДАЧА 31. До якої температури t_2 охолоне повітря, яке знаходиться при $t_1 = 0^\circ\text{C}$, якщо воно розширюється адіабатично від об'єму V_1 до $V_2 = 2V_1$?

Дано: $t_1 = 0^\circ\text{C}$ $Q = \text{const}$ $V_2 = 2V_1$ $t_2 = ?$	СІ: $= 273\text{ K}$	Розв'язання: Запишемо рівняння адіабатичного процесу $TV^{\gamma-1} = \text{const},$
---	-------------------------	--

де $\gamma = (i + 2)/i = 1,4$ – показник адіабати для двохатомного газу, $i = 5$ – число ступенів вільності.

Тому

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{2V_1}{V_1}\right)^{1,4-1} = 2^{0,4}.$$

Звідки

$$T_2 = T_1/2^{0,4} = 2^{-0,4} \cdot 273 = 207\text{ K}.$$

Відповідь: $T_2 = 207\text{ K}$.

ЗАДАЧА 32. Газ розширюється адіабатично, причому його об'єм збільшується вдвічі, а термодинамічна температура спадає у 1,32 рази. Яку кількість ступенів вільності i мають молекули цього газу?

Дано: $Q = \text{const}$ $V_2 = 2V_1$ $T_2 = T_1/1,32$ $i = ?$	Розв'язання: Запишемо рівняння адіабатичного процесу $TV^{\gamma-1} = \text{const},$
--	--

Це рівняння можна записати по-іншому

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

Оскільки число ступенів вільності i однозначно пов'язане із показником адіабати формулою

$$\gamma = (i + 2)/i,$$

спочатку знайдемо саме цей показник.

Враховуючи умову

$$\frac{T_1}{T_1/1,38} = \left(\frac{2V_1}{V_1}\right)^{\gamma-1},$$

маємо

$$1,32 = 2^{\gamma-1},$$

$$2^\gamma = 2,68.$$

Коефіцієнт Пуассона і число ступенів вільності дорівнюють

$$\gamma = \log_2 2,68 = 1,4,$$

$$i = \frac{2}{\gamma-1} = \frac{2}{1,4-1} = 5.$$

Відповідь: $i = 5$.

ЗАДАЧА 33. Один кіломоляр азоту, який знаходиться при нормальних умовах, розширюється адіабатично від об'єму V_1 до $V_2 = 5V_1$. Знайти зміну внутрішньої енергії ΔU газу і роботу A , яку виконав газ при розширенні.

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$\nu = 1$ кмоль	$= 10^3$ моль	При адіабатичному процесі
$T_1 = 273$ К		$Q = \Delta U + A = 0.$
$p_1 = 1,01 \cdot 10^5$ Па		
$Q = const$		
$V_2 = 5V_1$		
$\Delta U - ?$		Тому
$A - ?$		$\Delta U = -A.$

Зміну внутрішньої енергії обчислимо за формулою

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = C_V \frac{m}{\mu} (T_2 - T_1),$$

де $C_V = 20,8$ Дж/(моль·К) – молярна теплоємність двохатомного газу при сталому об'ємі; $\nu = m/\mu = 1000$ – кількість молів за умовою задачі.

Із рівняння адіабати

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

знайдемо температуру T_2

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{5V_1}{V_1}\right)^{1,4-1} = 5^{0,4} = 1,9,$$

$$T_2 = T_1/1,9 = 273/1,9 = 143,7 \text{ К}.$$

Підставивши у формулу для внутрішньої енергії, маємо

$$\Delta U = 20,8 \cdot 1000 (143,7 - 273) = -2689440 \text{ Дж.}$$

Відповідно робота дорівнює

$$A = -\Delta U = 2689440 \text{ Дж.}$$

$$\text{Відповідь: } \Delta U = -2,69 \text{ МДж, } A = 2,69 \text{ МДж.}$$

ЗАДАЧА 34. Необхідно стиснути повітря від об'єму $V_1 = 10 \text{ л}$ до $V_2 = 2 \text{ л}$. Як вигідніше його стискати (адіабатично чи ізотермічно)?

Дано:	СІ:	Розв'язання:
$\gamma = 1,4$		
$V_1 = 10 \text{ л}$	$= 10^{-2} \text{ м}^3$	Робота при ізотермічному стисканні
$V_2 = 2 \text{ л}$	$= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$	
а) $Q = \text{const}$		$A_T = (m/\mu) RT_1 \ln(V_2/V_1).$
б) $T = \text{const}$		
$A_Q/A_T = ?$		

Робота при адіабатичному стисканні

$$A_Q = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right].$$

Взявши відношення робіт у цих процесах та враховуючи, що для повітря $\gamma = 1,4$, маємо

$$\frac{A_Q}{A_T} = \frac{1 - (V_1/V_2)^{\gamma - 1}}{(\gamma - 1) \ln(V_2/V_1)} = \frac{1 - 5^{\gamma - 1}}{0,4 \ln 0,2} = 1,4.$$

Відповідь: ізотермічне стискання вигідніше тому, що робота при цьому у 1,4 рази менша, ніж при адіабатичному стисканні.

ЗАДАЧА 35. Маса $m = 10 \text{ г}$ кисню, який знаходиться при нормальних умовах, стискається до об'єму $V_2 = 1,4 \text{ л}$. Знайти тиск p_2 і температуру T_2 кисню після стискання, якщо він стискається: а) ізотермічно; б) адіабатично. Знайти роботу A стискання у кожному з цих випадків.

Дано: $m = 10 \text{ г}$ $\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $p_1 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $T_1 = 273 \text{ К}$ $V_2 = 1,4 \text{ л}$ а) $T = \text{const}$ б) $Q = \text{const}$	СІ: $= 10^{-2} \text{ кг}$ $= 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$	Розв'язання: а) При ізотермічному процесі $T_2 = T_1 = 273 \text{ К}$ Тиск після ізотермічного стискання знайдемо із рівняння Менделєєва – Клапейрона $p_2 V_2 = m R T_2 / \mu$
$p_2 - ?$ $T_2 - ?$ $A - ?$		

З цієї формули виведемо p_2 і підставимо чисельні значення

$$p_2 = \frac{m R T_2}{\mu V_2} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 273}{32 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}} = 506000 \text{ Па}.$$

Роботу обчислимо за формулою

$$A = R T_1 \frac{m}{\mu} \ln \frac{p_1}{p_2} = 8,31 \cdot 273 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{101000}{506000} = -1142 \text{ Дж}.$$

б) Об'єм кисню до адіабатичного стискання знайдемо із рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} R T_1.$$

З цієї формули виведемо V_1 і підставимо чисельні значення

$$V_1 = \frac{m R T_1}{\mu p_1} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 273}{32 \cdot 10^{-3} \cdot 101000} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

З рівняння адіабати

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma$$

знайдемо тиск після адіабатичного стискання

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = 101000 \left(\frac{7 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,4} = 961345 \text{ Па}.$$

З рівняння Менделєєва – Клапейрона

$$p_2 V_2 = \frac{m}{\mu} R T_2$$

знайдемо температуру після адіабатичного стискання

$$T_2 = \frac{p_2 V_2 \mu}{m R} = \frac{961345 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} = 518 \text{ К}.$$

Роботу обчислимо за формулою

$$A = \frac{R T_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{8,31 \cdot 273}{1,4 - 1} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \left[1 - \left(\frac{7 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,4 - 1} \right] = -1600 \text{ Дж}.$$

Відповідь: а) $T_2 = 273 \text{ К}$, $p_2 = 506 \text{ кПа}$, $A = -1142 \text{ Дж}$;
 б) $T_2 = 518 \text{ К}$, $p_2 = 961 \text{ кПа}$, $A = -1600 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 36. У скільки разів збільшиться довжина вільного пробігу молекул двохатомного газу, якщо його тиск зменшиться вдвічі при розширенні газу: а) ізотермічно, б) адіабатично?

Дано:

$$i = 5$$

$$p_2 = p_1 / 2$$

$$\text{а) } T = \text{const}$$

$$\text{б) } Q = \text{const}$$

$$\bar{\lambda}_2 / \bar{\lambda}_1 = ?$$

Розв'язання:

Довжина вільного пробігу обчислюється за форму-

лою

$$\bar{\lambda} = 1 / (\sqrt{2} \pi d^2 n) = kT / (\sqrt{2} \pi d^2 p).$$

Для двох станів газу p_1 , T_1 та p_2 , T_2 довжини вільного пробігу відповідно мають значення

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{kT_1}{\sqrt{2} \pi d^2 p_1},$$

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{kT_2}{\sqrt{2} \pi d^2 p_2}.$$

Взявши відношення цих довжин, отримаємо формулу

$$\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}.$$

а) При ізотермічному процесі $T_1 = T_2$, тому

$$\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_1/2} = 2, \quad \bar{\lambda}_2 = 2\bar{\lambda}_1.$$

б) При адіабатичному процесі

$$Tp^{\gamma} = const, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}.$$

Підставивши цю формулу у відношення довжин вільного пробігу і враховуючи, що для двохатомного газу ($i = 5$) $\gamma = 1,4$ остаточно знаходимо

$$\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{p_1}{p_1/2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 2^{\frac{1}{\gamma}} = 2^{\frac{1}{1,4}} = 2^{0,71} = 1,64.$$

$$\bar{\lambda}_2 = 1,64\bar{\lambda}_1.$$

Відповідь: а) $\bar{\lambda}_2 = 2\bar{\lambda}_1$; б) $\bar{\lambda}_2 = 1,64\bar{\lambda}_1$.

ЗАДАЧА 37. Маса одного кіломоля вуглекислого газу $m = 44$ кг. Визначити густину вуглекислого газу за нормальних умов. Визначити масу однієї молекули вуглекислого газу.

Дано:
 $v = 1$ кмоль
 $\mu = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
 $m = 44$ кг
 $V = 22,4$ м³

 $\rho = ?$
 $m_{\text{мол}} = ?$

СІ:
 $= 10^3$ моль

Розв'язання:

За нормальних умов один кіломоль вуглекислого газу CO_2 займає об'єм

$$V = 22,4 \text{ м}^3.$$

Густина газу

$$\rho = m/V = 44/22,4 = 1,96 \text{ кг/м}^3.$$

У одному молі міститься

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ молекул};$$

у кіломоля відповідно у 1000 разів більше

$$N = N_A \cdot 1000 = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ молекул.}$$

Отже, на долю однієї молекули припадає маса:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{44}{6,02 \cdot 10^{26}} = 7,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Відповідь: $\rho = 1,96 \text{ кг/м}^3$, $m_0 = 7,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

ЗАДАЧА 38. Скільки молекул газу міститься у балоні місткістю $V = 60 \text{ л}$ при температурі $T = 300 \text{ К}$ і тиску $p = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$?

Дано:

$$V = 60 \text{ л}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$p = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$N = ?$$

СІ:

$$= 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

Розв'язання:

Число молекул в одиниці об'єму газу при температурі T і тиску p визначається із формули $p = nkT$. Звідки $n = p/kT$. У об'ємі

V число молекул

$$N = nV = \frac{pV}{kT} = \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 7,2 \cdot 10^{22}.$$

Відповідь: $N = 7,2 \cdot 10^{22}$.

ЗАДАЧА 39. Оцінити наближено розмір атома ртуті. Молярна маса ртуті $\mu = 0,2006 \text{ кг/моль}$.

Дано:

$$\mu = 0,2006 \text{ кг/моль}$$

$$r = ?$$

Розв'язання:

Маса одного атома ртуті

$$m_{am} = \frac{\mu}{N_A}.$$

Наближено об'єм одного атома

$$V_{am} = \frac{m_{am}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho N_A},$$

де $\rho = 11300 \text{ кг/м}^3$ – густина ртуті. Тоді наближений розмір атома:

$$r = \sqrt[3]{V} = 3 \sqrt{\frac{\mu}{\rho N_A}} = 3 \sqrt{\frac{0,2006}{11300 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}} = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Відповідь: $r = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$

ЗАДАЧА 40. Визначити середню квадратичну швидкість молекул газу, густина якого при тиску $p = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$, становить $\rho = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$.

Дано:

$$p = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$\rho = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$$

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = ?$$

Розв'язання:

Згідно з основним рівнянням кінетичної теорії тиск

дорівнює

$$p = (1/3) n m_0 \langle v^2 \rangle.$$

Оскільки за означенням густина – це маса одиниці об'єму, то можна записати, що $\rho = n m_0$. Тоді

$$p = (1/3) \rho \langle v^2 \rangle.$$

Звідки

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^4}{4,1 \cdot 10^{-2}}} = 1913 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 1913 \text{ м/с.}$

ЗАДАЧА 41. У кімнаті об'ємом $V = 60 \text{ м}^3$ випарували краплину парфумів, яка містила $m = 10^{-4} \text{ г}$ пахучої речовини, молярна маса якої $\mu = 1 \text{ кг/моль}$. Скільки молекул пахучої речовини потрапляє у легені людини при кожному вдиханні (об'єм легенів людини $V_0 = 1 \text{ л}$).

Дано:

$$V = 60 \text{ м}^3$$

$$m = 10^{-4} \text{ г}$$

$$\mu = 1 \text{ кг/моль}$$

$$V_0 = 1 \text{ л}$$

$$n = ?$$

Сі:

$$= 10^{-7} \text{ кг}$$

$$= 10^{-3} \text{ м}^3$$

Розв'язання:

У об'ємі V кімнати міститься N молекул пахучої речовини

$$N = m N_A / \mu = 10^{-7} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} / 1 = 6 \cdot 10^{16}.$$

У об'ємі V_0 легень людини міститься n молекул пахучої речовини. Склавши пропорцію:

$$V - N$$

$$V_0 - n,$$

і розв'язавши її відносно n маємо:

$$n = \frac{V_0}{V} N = \frac{10^{-3}}{60} 6 \cdot 10^{16} = 10^{12}.$$

$$\text{Відповідь: } n = 10^{12}.$$

ЗАДАЧА 42. Балон з киснем під тиском $p_1 = 10^6 \text{ Па}$ стояв у приміщенні при температурі $T_1 = 300 \text{ К}$. Потім балон винесли на вулицю і підключили до газозварювального апарату. Яку частину η кисню витратили при зварюванні, якщо після закінчення роботи тиск у балоні дорівнює $p_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а температура на вулиці $T_2 = 250 \text{ К}$?

Дано:

$$p_1 = 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$p_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_2 = 250 \text{ К}$$

$$\eta - ?$$

Розв'язання:

Витрачена частина кисню η дорівнює

$$\eta = (m_1 - m_2) / m_1 = 1 - m_2 / m_1,$$

де m_1 , m_2 – відповідно початкова і кінцева маси кисню в балоні. Відношення m_2 / m_1 знайдемо записавши рівняння Менделєєва – Клапейрона для кінцевого і початкового станів кисню у балоні:

$$p_1 V_1 = \frac{m_1}{\mu} R T_1,$$

$$p_2 V_2 = \frac{m_2}{\mu} R T_2$$

Поділивши ці дві рівності одну на іншу, знайдемо

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{p_2}{p_1}.$$

Звідки

$$\eta = 1 - \frac{T_1 p_2}{T_2 p_1} = 1 - \frac{300 \cdot 5 \cdot 10^5}{250 \cdot 10^6} = 0,4.$$

$$\text{Відповідь: } \eta = 0,4.$$

ЗАДАЧА 43 Визначити густину суміші, яка містить $m_1 = 4 \text{ г}$ водню і $m_2 = 32 \text{ г}$ кисню при температурі $T = 280 \text{ К}$ і загальному тиску $p = 10^5 \text{ Па}$.

Дано: $m_1 = 4 \text{ г}$ $\mu_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $m_2 = 32 \text{ г}$ $\mu_2 = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ $T = 280 \text{ К}$ $p = 10^5 \text{ Па}$ $\rho = ?$	СІ: $= 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ $= 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$	Розв'язання: Густина суміші газів дорівнює $\rho = (m_1 + m_2)/V$. Згідно із законом Дальтона
--	---	---

$$p = p_1 + p_2 = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V} + \frac{m_2 RT}{\mu_2 V} = \frac{RT}{V} \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right),$$

де μ_1, μ_2 – молярні маси водню і кисню відповідно.

Виведемо формулу для об'єму суміші газів

$$V = \frac{RT}{p} \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right).$$

Знайдемо її густину

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_1 + m_2)p}{RT \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right)} = \frac{(4 \cdot 10^{-3} + 3,2 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^5}{8,31 \cdot 280 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{3,2 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)} = 0,51 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: $\rho = 0,51 \text{ кг/м}^3$.

ЗАДАЧА 44. Водень, що зберігається у балоні об'ємом $V = 100 \text{ л}$ під тиском $p = 10^7 \text{ Па}$, використовують для заповнення метеорологічних куль-зондів, повинен мати підймальну силу $F = 20 \text{ Н}$. Скільки куль можна заповнити воднем з одного балона? Температура водню у балоні і кулях дорівнює температурі навколишнього повітря $T = 300 \text{ К}$. Молярна маса водню $\mu_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, молярна маса повітря $\mu_2 = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Дано: $V = 100 \text{ л}$ $p = 10^7 \text{ Па}$ $F = 20 \text{ Н}$ $T = 300 \text{ К}$ $\mu_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $\mu_2 = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ $N = ?$	СІ: $= 0,1 \text{ м}^3$	Розв'язання: При атмосферному тиску p_0 водень займає об'єм V_0 , а при тиску $p = 10^7 \text{ Па}$ його об'єм V . Із рівняння $p_0 V_0 = pV$ знайдемо об'єм V_0 водню при атмосферному тиску
---	----------------------------	--

$$V_0 = pV/p_0.$$

Куля з таким об'ємом V_0 мала б підймальну силу:

$$F_0 = gV_0(\rho_2 - \rho_1),$$

де ρ_1, ρ_2 – густини водню і повітря відповідно.

Враховуючи рівняння Менделєєва – Клапейрона:

$$p_0V_0 = \frac{m_1}{\mu_1} RT_1,$$

$$p_0V_0 = \frac{m_2}{\mu_2} RT_2$$

виразимо густини водню і повітря відповідно

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_0} = \frac{p_0\mu_1}{RT},$$

$$\rho_2 = \frac{m_2}{V_0} = \frac{p_0\mu_2}{RT}.$$

Тому підймальна сила F_0 дорівнює:

$$F_0 = gV_0\left(\frac{p_0\mu_2}{RT} - \frac{p_0\mu_1}{RT}\right) = g \frac{p_0V_0}{RT} (\mu_2 - \mu_1) = g \frac{pV}{RT} (\mu_2 - \mu_1),$$

$$F_0 = 9,81 \cdot \frac{10^7 \cdot 0,1}{8,31 \cdot 300} (29 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}) \approx 100 \text{ Н.}$$

Кількість куль дорівнює

$$n = F_0/F = 100/20 = 5.$$

Відповідь: $n = 5$.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курс фізики : навч. посіб. [Електрон. ресурс] / [Є. С. Орел, А. В. Безуглий, О. М. Петченко, Є. І. Назаренко] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 191 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/51767/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

2. Дульфан Г. Я. Фізика. Загальна фізика : конспект лекцій (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 103 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/62960/>, вільний (дата звернення: 01.03.2023). – Назва з екрана.

3. Methodical guidelines for performance laboratory works on the subject “General Physics” and “Physics”, part 1 “Mechanics” (for 1-st year of full-time and part-time students education level “bachelor” all specialties) [Electron. resource] / O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; com. : A. V. Bezugliy, O. M. Petchenko. – Electronic text data. – Kharkiv, O. M. Beketov NUUE, 2019. – 42 p. – Regime of access: <http://eprints.kname.edu.ua/52896/>, free (date of the application: 23.02.2023). – Header from the screen.

4. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із розділу «Механіка» з навчальних дисциплін «Фізика», «Загальна фізика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад : О. М. Петченко, Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 59 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/63166/>, вільний (дата звернення: 29.03.2023). – Назва з екрана.

5. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з розділу «Механіка» з навчальних дисциплін «Фізика», «Загальна фізика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел, О. М. Петченко. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 34 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/63167/>, вільний (дата звернення: 29.03.2023). – Назва з екрана.

6. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з розділу «Молекулярна фізика» з навчальних дисциплін «Фізика», «Загальна фізика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад.: Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел, О. М. Петченко. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,

2023. – 53 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/63205/>, вільний (дата звернення: 19.04.2023). – Назва з екрана.

7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Фізика» розділу «Електрика і магнетизм» (для студентів 1-го курсу денної форми та 1–2 курсів заочної форми навчання бакалаврів за напрямками 6.170202 – Охорона праці, 6.070101 – Транспортні технології (за видами транспорту), 6.060101 – Будівництво, 6.060103 – Гідротехніка (водні ресурси), 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування, 6.080101 – Геодезія, картографія та землеустрій, 6.050201 – Системна інженерія, 6.090103 – Лісове і садово-паркове господарство) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : О. М. Петченко, К. Ю. Аксьонова, Є. С. Орел, А. В. Безуглий. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 73 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/40495/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

8. Методичні вказівки до практичних занять з курсу загальної фізики, розділ «Електрика і магнетизм» (для студентів 1 курсу всіх форм навчання за напрямками підготовки 6.050701, «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 «Електромеханіка») [Електрон. ресурс] / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 46 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/35829/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

9. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із розділу «Оптика» дисциплін «Фізика» та «Загальна фізика» (для студентів 1 курсу денної форми та 1–2 курсів заочної форми навчання бакалаврів спеціальностей 101 – Екологія, 122 – Комп'ютерні науки та інформаційні технології, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 183 – Технології захисту навколишнього середовища, 185 – Нафтогазова інженерія та технології, 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 193 – Геодезія та землеустрій, 206 – Садово-паркове господарство, 263 – Цивільна безпека, 275 – Транспортні технології) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. М. Петченко, А. С. Сисоєв. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 55 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/45643/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

10. Методичні вказівки до організації самостійної роботи з дисциплін «Фізика» та «Загальна фізика» (для студентів 1 курсу денної форми та 1–2 курсів заочної форми навчання бакалаврів усіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : А. В. Безуглий, Є. С. Орел; – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 12 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/45802/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

11. Методичні рекомендації до проведення комп'ютерних лабораторних робіт із навчальної дисциплін «Загальна фізика», «Фізика». Розділ «Електрика і магнетизм» (для студентів 1 курсу денної і заочної форм навчання за всіма спеціальностями) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. М. Петченко, А. В. Безуглий. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 43 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/55382/>, вільний (дата звернення: 23.02.2023). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до виконання практичних робіт

із розділу

«Молекулярна фізика і термодинаміка»

з навчальних дисциплін

«ФІЗИКА», «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної
та заочної форм навчання всіх спеціальностей)*

Укладачі : **ДУЛЬФАН** Ганна Яківна,
НАЗАРЕНКО Євгеній Іванович,
ОРЕЛ Євгеній Станіславович,
ПЕТЧЕНКО Олександр Матвійович

Відповідальний за випуск *Є. І. Назаренко*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *Є. І. Назаренко*

План 2021, поз. 590М

Підп. до друку 19.01.2022. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 2,8

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.