

Міністерство освіти і науки України
ВСП « Ковельський промислово-економічний фаховий коледж
Луцького національного технічного університету»



ФІЗИКА І АСТРОНОМІЯ

Методичні вказівки до розв'язування задач з теми Молекулярна фізика і термодинаміка для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня фаховий молодший бакалавр усіх спеціальностей денної форми здобуття освіти.

УДК 53.01/0982(07)

Ф-50

Затверджено до видання методичною радою ВСП «КПЕФК ЛНТУ»,
протокол № 07_ від «19 » березня 2026 року.

Голова методичної ради ВСП «КПЕФК ЛНТУ» _____ О. О. Гончаренко
Розглянуто і схвалено на засіданні циклової комісії з природничо-
математичних освітніх компонентів ВСП «Ковельський промислово-
економічний фаховий коледж ЛНТУ», протокол № 05 від «17 » лютого
2026 року.

Голова циклової комісії _____ Жанна КРИВОШ

Друковане видання передано до репозитарію бібліотеки ВСП

«КПЕФКЛНТУ» _____ Неля ТЕЛЮЧИК

(підпис)

Укладач: _____ Леонід СЕРЕДА, викладач ВСП «КПЕФК
ЛНТУ»

Рецензент: _____ Степан БАБАРИКА, к.т.н., викладач ВСП
«КПЕФК ЛНТУ»

Відповідальний за випуск: _____ Леся ПРОКОПЧУК, методист ВСП
«КПЕФК ЛНТУ»

(підпис)

Фізика і астрономія [Текст]: Методичні вказівки до розв'язування
Ф50 задач з теми Молекулярна фізика і термодинаміка для здобувачів
освітньо-кваліфікаційного рівня фаховий молодший бакалавр денної
форми здобуття освіти /уклад. Л.І.Середа – Ковель: ВСП «КПЕФК
Луцького НТУ», 2026. – 41 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми предмету
«Фізика і астрономія» рівень «стандарт» авторський колектив під
керівництвом Яцківа Я.С. з метою розуміння здобувачами освітньо-
кваліфікаційного рівня молодший бакалавр суті фізичних процесів з
урахуванням внутрішньо-наукових та між предметних зв'язків.

© Л.І. Середа, 2026

ПЕРЕДМОВА

Методичні рекомендації **«Розв’язування задач з теми “Молекулярна фізика і термодинаміка”»** призначені для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня **молодший фаховий бакалавр** під час вивчення курсу фізики.

Метою даних методичних рекомендацій є допомога студентам у засвоєнні основних понять, законів і закономірностей молекулярної фізики та термодинаміки, а також формування навичок застосування теоретичних знань під час розв’язування фізичних задач. Особливу увагу приділено поетапному аналізу умов задач, вибору відповідних фізичних законів і формул, а також правильному оформленню розв’язку.

У рекомендаціях подано короткі теоретичні відомості з основних тем розділу, приклади розв’язування типових задач, алгоритми їх виконання, а також завдання для самостійної роботи студентів. Такий підхід сприяє розвитку логічного мислення, формуванню вмінь аналізувати фізичні явища та застосовувати отримані знання на практиці.

Методичні рекомендації можуть бути використані під час підготовки до практичних занять, самостійної роботи, а також для повторення та закріплення навчального матеріалу з теми «Молекулярна фізика і термодинаміка».

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

Основи молекулярно-кінетичної теорії.

Ідеальний газ

Основні закони і формули

- Кількість молів речовини

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

де m — маса речовини, M — її молярна маса, N — кількість молекул; N_A — стала Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Зв'язок між молярною масою M та відносною молекулярною масою M_r

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ (кг/моль)},$$

або

$$M = M_r \text{ (г/моль)},$$

тобто молярна маса, виражена у грамах на моль, чисельно дорівнює відносній молекулярній масі, яка визначається з таблиці Менделєєва.

- Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle,$$

де p — тиск газу, n — кількість молекул в одиниці об'єму, m_0 — маса молекули, $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ — середня квадратична швидкість молекул, кутові дужки означають усереднення, або

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle, \quad \langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle}{2} \text{ — середня кінетична енергія}$$

поступального руху молекул.

- Середня квадратична швидкість молекул

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

де T – абсолютна температура газу, $T = (t + 273,15) \text{ К}$, t – температура за шкалою Цельсія, $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана.

- Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона):

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

де V – об'єм газу; m – його маса; $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – газова стала.

- Залежність тиску газу від концентрації його молекул і температури (друга форма запису рівняння стану ідеального газу)

$$p = nkT.$$

- Концентрація молекул для будь-якого агрегатного стану речовини

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M},$$

де ρ – густина речовини.

- Дослідні газові закони:

а) закон Бойля – Маріотта (ізотермічний процес)

$$pV = \text{const при } T, m = \text{const},$$

або для двох станів газу

$$p_1 V_1 = p_2 V_2;$$

б) закони Гей-Люссака:

$$1) \frac{V}{T} = \text{const при } p, m = \text{const}, (\text{ізобаричний процес}),$$

або для двох станів газу

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

$$2) \frac{p}{T} = \text{const при } V, m = \text{const}, (\text{ізохоричний процес}),$$

або для двох станів

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

- Абсолютна вологість повітря

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

де m – маса водяної пари, що міститься у повітрі, ρ_a – її густина. Відносна вологість повітря

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_i} 100\%,$$

де ρ_H – густина насиченої пари. Параметри стану ненасиченої пари досить точно визначаються з рівняння Клапейрона. Для насиченої пари можна користуватись рівнянням стану у вигляді $\rho_H = pM/RT$. Температура t_p , за якої водяна пара у повітрі стає насиченою, називається точкою роси.

$$\rho_a(t) = \rho_H(t_p).$$

Якщо точка роси відома, можна визначити відносну вологість повітря при даній температурі, користуючись таблицею густини (або тиску) насичуючої пари при різних температурах

$$\varphi = \frac{\rho_H(t_p)}{\rho_H(t)} \cdot 100\%.$$

- Поверхневий натяг в рідині:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad \text{або} \quad \sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

де F – модуль сили поверхневого натягу, l – довжина межі поверхневого шару; ΔE – надлишок енергії поверхневого шару, що дорівнює роботі утворення поверхні плівки площею ΔS .

- Додатковий тиск під опуклою сферичною поверхнею рідини

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

- Висота підйому рідини густини ρ в капілярній трубці радіуса r у випадку повного змочування стінок

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

- Нормальні умови:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$T_0 = 273,15 \text{ К}.$$

1. Ви згадали основні положення МКТ і їх дослідницьке обґрунтування.

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Усі речовини складаються з частинок — атомів, молекул, йонів	Частинки безперервно хаотично рухаються	Частинки взаємодіють одна з одною:
♦ 1 моль речовини містить $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ частинок. ♦ Маса частинки: $m_0 = \frac{M}{N_A}$, де M — молярна маса. ♦ Кількість молекул: $N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A$, де ν — число молів (кількість речовини)	Середня квадратична швидкість поступального руху молекул: $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$, де T — абсолютна температура: $T = t + 273$ (К); $R = 8,31$ Дж/(моль · К) — універсальна газова стала	♦ <i>притягуються</i> на відстанях, які більші за розмір частинок; ♦ <i>відштовхуються</i> на відстанях, які менші від розміру частинок

2. Ви дізнались про фізичну модель «ідеальний газ» і про важливі закони, які пов'язують макроскопічні і мікроскопічні параметри цього газу:

Основне рівняння МКТ ідеального газу

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2} \leftarrow p = \frac{1}{3} m_0 \nu \overline{v^2} \rightarrow p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$$

Зв'язок середньої кінетичної енергії поступального руху молекул і температури:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

$$p = nkT$$

Рівняння Менделєєва — Клапейрона (рівняння стану ідеального газу)

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

p — тиск газу; V — об'єм газу; $n = \frac{N}{V}$ — концентрація молекул газу;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — стала Больцмана

Рівняння Клапейрона

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

Ізотермічний процес $T_1 = T_2$

Ізобарний процес $p_1 = p_2$

Ізохорний процес $V_1 = V_2$

Закон Бойля — Маріотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$

Закон Гей-Люссака: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

Закон Шарля: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

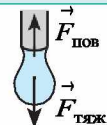
3. Ви дізнались, які фізичні величини характеризують вологість повітря; поверхневий шар рідини; стан деформованого тіла.

Вологість повітря

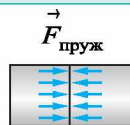
абсолютна $\rho_a = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{V}$

відносна $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п}}}$

Поверхневий натяг

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S} = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$


Механічна напруга

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$$


4. Ви довідалися, за яких умов рідина змочує або не змочує певну поверхню, та отримали формулу для розрахунку висоти h підняття (опускання) рідини в капілярі радіуса r : $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

Маса і розміри молекул. Молекулярно-кінетична теорія

2.1. Визначити кількість молів ν і молекул N , які містяться в $m = 1$ г водню.

Дано	Розв'язання
$m = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$	$\nu = \frac{m}{M}, \quad N = N_A \nu = \frac{m \cdot N_A}{M}$
$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$	
$\nu = ?$ $N = ?$	

Відповідь: $\nu = 0,5$ молів, $N = 3,01 \cdot 10^{23}$.

2.2. Визначити кількість молекул N у $m = 34$ г метану CH_4 ; визначити масу m_0 однієї молекули.

Дано	Розв'язання
$m = 34 \text{ г} = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$	$N = \frac{m}{M} N_A, \quad m_0 = \frac{M}{N_A}$
$M = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$	
$N = ?$ $m_0 = ?$	

Відповідь: $N = 1,28 \cdot 10^{24}$, $m_0 = 2,66 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

2.3. Кількість атомів твердого алюмінію в деякому об'ємі $N = 1,2 \cdot 10^{29}$. Визначити цей об'єм, якщо густина алюмінію $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Дано	Розв'язання
$M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$	$V = \frac{m}{\rho}, \quad m = m_0 N = \frac{M}{N_A} N,$ $V = \frac{MN}{N_A \rho}$
$N = 1,2 \cdot 10^{29}$	
$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $V = ?$	

Відповідь: $V = 2 \text{ м}^3$.

2.4. Визначити масу m_0 однієї молекули срібла.

Відповідь: $m_0 = 1,79 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$.

2.5. У скільки разів маса m_{01} однієї молекули вуглекислого газу CO_2 більша за масу m_{02} однієї молекули аміаку NH_3 ?

Відповідь: $m_{01}/m_{02} = 2,59$.

2.6. Скільки молекул N і молів ν міститься у $m = 5 \text{ кг}$ кисню O_2 ?

Відповідь: $N = 9,4 \cdot 10^{25}$, $\nu = 156,25$ молів.

2.7. Визначити середню квадратичну швидкість та середню кінетичну енергію поступального руху молекул вуглекислого газу при температурі 100 °С.

Відповідь: $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 459,7 \text{ м/с}$, $\langle E_k \rangle = 7,72 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$.

2.8. Визначити концентрацію молекул кисню, якщо його тиск 0,2 МПа, а середня квадратична швидкість молекул 700 м/с.

Відповідь: $n = 2,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

2.9. Визначити середню квадратичну швидкість молекул ідеального газу, густина якого під тиском $p = 35 \text{ кПа}$ становить $\rho = 0,3 \text{ кг/м}^3$.

Дано	Розв'язання
$p = 35 \text{ кПа} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $\rho = 0,3 \text{ кг/м}^3$ $\langle v_{\text{кв}} \rangle = ?$	$\rho = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle, \quad \rho = m_0 n,$ $\rho = \frac{1}{3} \rho \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle, \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$

Відповідь: $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 592 \text{ м/с}$.

2.10. Скільки молекул міститься у 10 г газу за нормальних умов, якщо середня квадратична швидкість його молекул $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 450 \text{ м/с}$?

Дано	Розв'язання
$m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$ $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 450 \text{ м/с}$ $T = 273 \text{ К}$ $N = ?$	$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$ $M = \frac{3RT}{\langle v_{\text{кв}} \rangle^2}, \quad R = k N_A,$ $N = \frac{m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{3kT}.$

Відповідь: $N = 1,79 \cdot 10^{23}$.

2.11. Густина газу $\rho = 0,01 \text{ кг/м}^3$, середня квадратична швидкість його молекул $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 480 \text{ м/с}$, концентрація молекул газу $n = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Визначити температуру газу та середню кінетичну енергію поступального руху його молекул.

Дано	Розв'язання
------	-------------

$\rho = 0,01 \text{ кг/м}^3$ $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 480 \text{ м/с}$ $n = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ $T = ? \langle E_k \rangle = ?$	$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \quad m_0 = \frac{\rho}{n},$ $T = \frac{\rho \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{3kn},$ $\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{\rho \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2n}.$
--	--

Відповідь: $T = 556,5 \text{ К}, \langle E_k \rangle = 1,15 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}.$

Рівняння стану ідеального газу. Газові закони

2.12. Газ при температурі $t_1 = 17^\circ\text{С}$ і тиску $p_1 = 350 \text{ мм рт. ст.}$ займає об'єм $V_1 = 160 \text{ см}^3$. Визначити об'єм V_0 цієї ж маси газу за нормальних умов.

<i>Дано</i> $T_1 = 290 \text{ К}$ $p_1 = 350 \text{ мм рт.ст}$ $V_1 = 160 \text{ см}^3$ $T_0 = 273 \text{ К}$ $p_0 = 760 \text{ мм рт.ст}$ $V_0 = ?$	<i>Розв'язання</i> $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}, \quad V_0 = \frac{p_1 V_1 T_0}{p_0 T_1}.$
--	---

Відповідь: $V_0 = 69,36 \text{ см}^3.$

2.13. Манометр на балоні зі стиснутим газом при температурі $t_1 = 27^\circ \text{С}$ показує тиск $p_1 = 9,3 \text{ МПа}$. Який тиск p_2 покаже манометр, якщо температуру знизити до $t_2 = -73^\circ \text{С}$?

<i>Дано</i> $T_1 = 300 \text{ К}$ $p_1 = 9,3 \text{ МПа}$ $T_2 = 200 \text{ К}$ $V = \text{const}$ $p_2 = ?$	<i>Розв'язання</i> $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1$
---	--

Відповідь: $p_2 = 6,2 \text{ МПа}.$

2.14. Під яким тиском p знаходиться кисень у балоні, якщо його температура $t^\circ = 27^\circ \text{С}$, а густина $\rho = 6,24 \text{ кг/м}^3$?

Дано

Розв'язання

$M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ 300 К $\rho = 6,24 \text{ кг/м}^3$ $p = ?$	$pV = \frac{m}{M} RT, \quad \rho = \frac{m}{V}, \quad p = \rho \frac{RT}{M}$
	Відповідь: $p = 0,49 \text{ МПа}$.

2.15. Об'єм газу при температурі $t_1 = 55^\circ\text{C}$ становить $V_1 = 300 \text{ дм}^3$. Якщо тиск зменшити в три рази, то газ займе об'єм $V_2 = 750 \text{ дм}^3$ при температурі t_2 . Визначити цю температуру.

<i>Дано</i> $T_1 = 328 \text{ К}$ $V_1 = 300 \text{ дм}^3$ $p_2 = \frac{1}{3} p_1$ $V_2 = 750 \text{ дм}^3$ $t_2 = ?$	<i>Розв'язання</i> $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad T_2 = \frac{p_2 V_2 T_1}{p_1 V_1},$ $t_2 = T_2 - 273.$
	Відповідь: $t_2 = 0,3^\circ\text{C}$.

2.16. Визначити концентрацію n та густину ρ чадного газу СО за нормальних умов.

<i>Дано</i> $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $T_0 = 273 \text{ К}$ $n = ?$ $\rho = ?$	<i>Розв'язання</i> $n = \frac{p_0}{kT_0}, \quad p_0 V = \frac{m}{M} RT_0,$ $\rho = \frac{m}{V}, \quad \rho = \frac{p_0 M}{RT_0}.$
	Відповідь: $n = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}, \rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$.

2.17. Скільки молекул кисню міститься в об'ємі $V = 2,3 \text{ л}$ при температурі $t = 15^\circ\text{C}$ і тиску $p = 0,11 \text{ МПа}$?

<i>Дано</i> $V = 2,3 \text{ л} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ $T = 288 \text{ К}$ $M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $N = ?$	<i>Розв'язання</i> $p = nkT, \quad n = \frac{p}{kT},$ $N = nV = \frac{pV}{kT}.$
	Відповідь: $N = 6,37 \cdot 10^{22}$.

2.18. Встановити густину вуглекислого газу CO_2 при температурі $t_1 = 37^\circ\text{C}$ і тиску $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$. Визначити масу газу, об'єм якого $V = 2,5 \text{ м}^3$, за цих умов.

Відповідь: $\rho = 3,42 \text{ кг/м}^3$, $m = 8,55 \text{ кг}$.

2.19. Якої довжини l вийде ланцюжок із молекул кисню, які знаходяться за нормальних умов в об'ємі $V = 2 \text{ см}^3$? Діаметр молекул кисню $d = 0,3 \cdot \text{нм}$.

Дано

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

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_0 = 273 \text{ К}$$

$$V = 2 \text{ см}^3 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$d = 0,3 \text{ нм} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$l = ?$$

Розв'язання

$$l = d \cdot N,$$

$$N = nV,$$

$$n = \frac{\rho_0}{kT_0},$$

$$l = \frac{d\rho_0 V}{kT_0}.$$

Відповідь: $l = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ м}$.

2.20. Балон місткості $V = 200 \text{ л}$ наповнено газом, тиск якого $p = 15 \text{ МПа}$ і температура $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Маса балона з газом $m = 70 \text{ кг}$. З балона викачують газ доти, поки його тиск не зменшиться до значення $p_1 = 9,5 \text{ МПа}$ при тій самій температурі. Маса балона з газом при цьому становить $m_1 = 56 \text{ кг}$. Визначити за цими даними густину ρ_0 газу за нормальних умов. Який це газ?

Дано

$$V = 200 \text{ л} = 0,2 \text{ м}^3$$

$$p = 15 \text{ МПа} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

$$T = 303 \text{ К}$$

$$m = 70 \text{ кг}$$

$$p_1 = 9,5 \text{ МПа} =$$

$$0,95 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

$$m_1 = 56 \text{ кг}$$

$$p_0 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$= 10^5 \text{ Па}$$

$$T_0 = 273 \text{ К}$$

$$\rho_0 = ?$$

$$M_r = ?$$

Розв'язання

Густина газу при тиску p_0 і температурі T_0 (нормальні умови)

$$\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{Mp_0}{RT_0}.$$

Якщо маса порожнього балона m_6 , то маса газу в першому і другому випадках буде відповідно $(m - m_6)$ і $(m_1 - m_6)$.

Тоді за рівнянням газового стану маємо

$$pV = \frac{m - m_6}{M} RT, \quad p_1 V = \frac{m_1 - m_6}{M} RT.$$

Віднявши від першого рівняння друге, одержимо

$$(p - p_1)V = \frac{m - m_1}{M} RT$$

Звідси

$$\frac{M}{R} = \frac{(m - m_1)T}{(p - p_1)V}.$$

Підставляючи це значення у вираз для ρ_0 , дістанемо

$$\rho_0 = \frac{(m - m_1)p_0T}{(p - p_1)VT_0} = \frac{(70 - 56) \cdot 1,01 \cdot 10^5 \cdot 303}{(1,5 - 0,95) \cdot 10^7 \cdot 0,2 \cdot 273} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^3} = 1,427 \text{ кг/м}^3.$$

Визначаємо молярну масу цього газу

$$M = \frac{\rho_0 RT_0}{p_0} = \frac{1,427 \cdot 8,31 \cdot 273}{1,01 \cdot 10^5} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}} \approx 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Відносна молекулярна маса $M_r = 32$. Цей газ – кисень.

Відповідь: $\rho_0 = 1,427 \text{ кг/м}^3$, $M_r = 32$, кисень.

2.21. У балоні ємності $V = 40$ л міститься азот при температурі $t_1 = 57^\circ\text{C}$ і тиску $p_1 = 0,3 \cdot \text{МПа}$. Частину газу з балона випустили. При цьому тиск не змінився, а температура підвищилася до $t_2 = 87^\circ\text{C}$. Яку масу Δm газу випустили?

<i>Дано</i> $V_1 = 40 \text{ л} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ $T_1 = 330 \text{ К}$ $p_1 = 0,3 \text{ МПа} = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ $p_2 = p_1$ $V = \text{const}$ $T_2 = 360 \text{ К}$ $\Delta m = ?$	<i>Розв'язання</i> $p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1, \quad p_2 V_2 = \frac{m - \Delta m}{M} RT_2,$ $p_1 = p_2, \quad V_1 = V_2, \quad m T_1 = (m - \Delta m) T_2,$ $\Delta m = m \frac{(T_2 - T_1)}{T_2}, \quad m = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1},$ $\Delta m = \frac{p_1 V_1 M}{R T_1} (T_2 - T_1) = \frac{p_1 V_1 M}{R} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$ $\begin{matrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{matrix}$
---	--

Відповідь: $\Delta m = 0,01 \text{ кг}$.

2.22. Кисень маси $m = 20$ г перебуває під тиском $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ при температурі $t_1 = 7^\circ\text{C}$. Після нагрівання без зміни тиску газ зайняв об'єм $V_2 = 5,8$ л. Визначити початковий об'єм V_1 і кінцеву температуру t_2 газу.

Дано

Розв'язання

$$\begin{aligned}
 m &= 20 \text{ г} = 0,02 \text{ кг} \\
 M &= 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\
 p_1 &= 0,5 \text{ МПа} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па} \\
 T_1 &= 280 \text{ К} \\
 V_2 &= 5,8 \text{ л} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\
 p_1 &= p_2 \\
 V_1 &= ? \quad t_2 = ?
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 V_1 &= \frac{m}{M} R T_1, & V_1 &= \frac{m R T_1}{p_1 M}, \\
 \frac{V_1}{V_2} &= \frac{T_1}{T_2}, & T_2 &= T_1 \frac{V_2}{V_1}, \\
 t_2 &= T_2 - 273.
 \end{aligned}$$

Відповідь: $V_1 = 2,91 \text{ л}$, $t_2 = 285 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ізопроцеси в газах

2.23. Посудину, яка містить $V_1 = 15 \text{ л}$ газу під тиском $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$, з'єднують з пустою посудиною об'ємом $V_2 = 3 \text{ л}$. Визначити кінцеве значення тиску p_2 . Процес ізотермічний.

Дано $V_1 = 15 \text{ л}$ $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ $V_2 = 3 \text{ л}$ $T = \text{const}$ $p_2 = ?$	Розв'язання $p_1 V_1 = p_2 (V_1 + V_2), \quad p_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1.$
--	---

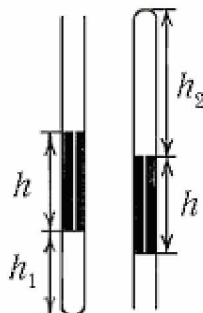
Відповідь: $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$.

2.24. У запаяній з одного кінця трубці знаходиться повітря, відокремлене від атмосфери стовпчиком ртуті завдовжки $h = 10 \text{ см}$. Коли трубка розміщена вертикально відкритим кінцем уверх, довжина повітряного стовпчика у закритому кінці $h_1 = 8 \text{ см}$. Якою буде довжина повітряного стовпчика, якщо трубку повернути відкритим кінцем униз? розташувати горизонтально? Атмосферний тиск $p_a = 0,101 \text{ МПа}$.

Дано $h = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$ $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $h_1 = 8 \text{ см} = 0,08 \text{ м}$ $p_a = 0,101 \cdot 10^6 \text{ Па}$ $h_2 = ?$ $h_3 = ?$	Розв'язання Повітря в трубці зазнає ізотермічного стискування і розширення. Нехай S – поперечний переріз трубки, тоді Sh – об'єм повітря в трубці. За законом Бойля – Маріотта добуток тиску на об'єм даної маси газу при постійній температурі залишається сталим.
---	---

$$(p_a + \rho q h) h_1 S = (p_a - \rho q h) h_2 S = p_a h_3 S.$$

Тут $\rho q h$ – гідростатичний тиск стовпчика ртуті, який у трьох випадках або додається до атмосферного, або віднімається від нього, або не враховується (ртуть не тисне на повітря).



Відповідь: $h_2 = \frac{p_a + \rho q h}{p_a - \rho q h} h_1 = 10,43 \text{ см}, h_3 = \frac{p_a + \rho q h}{p_a} h_1 = 9,06 \text{ см}.$

2.25. Трубка завдовжки $h = 40 \text{ см}$ запаяна з одного кінця і розміщена вертикально відкритим кінцем уверх. Повітря в трубці закрито стовпчиком ртуті висотою $h_1 = 12 \text{ см}$, який доходить до верхнього кінця трубки. Трубку обережно повертають, при цьому частина ртуті виливається. Визначити висоту h_2 стовпчика ртуті, який залишився в трубці. Атмосферний тиск $p_a = 0,101 \text{ МПа}$.

Дано

$$h_1 = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$$

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

$$h = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$$

$$p_a = 0,101 \text{ МПа} = 0,101 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Па

$$h_2 = ?$$

Розв'язання

За законом Бойля – Маріотта (див. задачу 2.24)

$$(p_a + \rho q h_1)(h - h_1)S =$$

$$(p_a - \rho q h_2)(h - h_2)S.$$

Після алгебраїчних перетворень одержимо квадратне рівняння відносно

h_2 . Підстановка числових значень дає

$$h_2^2 - 1,16 h_2 + 0,06 = 0.$$

З двох коренів цього рівняння зміст має

$$h_2 = 0,05 \text{ м}.$$

Відповідь: $h_2 = 0,05 \text{ м}.$

2.26. Два балони з'єднані трубою з краном. Місткості їх відповідно $V_1 = 4 \text{ л}$ і $V_2 = 10 \text{ л}$, а тиск у них $p_1 = 43 \text{ кПа}$ і $p_2 = 86 \text{ кПа}$. Який тиск установиться в балонах у разі відкривання крану? Процес ізотермічний

<i>Дано</i>	<i>Розв'язання</i>
$V_1 = 4 \text{ л} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ $V_2 = 10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3$ $p_1 = 43 \text{ кПа} = 4,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $p_2 = 86 \text{ кПа} = 8,6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $T_1 = T_2 = T$	$p_1 V_1 = \frac{m_1}{M} RT, \quad p_2 V_2 = \frac{m_2}{M} RT,$ $m_1 + m_2 = (p_1 V_1 + p_2 V_2) \frac{M}{RT},$ $p(V_1 + V_2) = \frac{M}{M} RT,$ $p = \frac{(m_1 + m_2) RT}{M(V_1 + V_2)} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}.$
$p = ?$	

Відповідь: $p = 73,7 \text{ кПа}$.

2.27. Газ маси $m = 18,6 \text{ г}$ займає об'єм $V_1 = 3 \text{ л}$ при температурі $t_1 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити кінцеву густину ρ_2 цього газу, якщо при незмінному тиску його температуру знизили до $t_2 = -55 \text{ }^\circ\text{C}$.

<i>Дано</i>	<i>Розв'язання</i>
$m = 18,6 \text{ г} = 18,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ $V_1 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ $T_1 = 327 \text{ К}$ $p_1 = p_2$ $T_2 = 218 \text{ К}$	$\rho_2 = \frac{m}{V_2}, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$ $V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_1, \quad \rho_2 = \frac{m T_1}{T_2 V_1}$
$\rho_2 = ?$	

Відповідь: $\rho_2 = 9,3 \text{ кг/м}^3$.

2.28. Тиск в закритій пробкою пляшці $p_1 = 0,35 \text{ МПа}$ при температурі $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Площа перерізу пробки $S = 5 \text{ см}^2$. Щоб витягти пробку, треба прикласти силу $F = 6 \text{ Н}$. На скільки градусів треба нагріти пляшку, щоб пробка вилетіла?

<i>Дано</i>	<i>Розв'язання</i>
$V_1 = V_2$ $p_1 = 0,35 \text{ МПа} = 0,35 \cdot 10^6 \text{ Па}$ $T_1 = 283 \text{ К}$ $S = 5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ $F = 6 \text{ Н}$	$\Delta T = T_2 - T_1, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1,$ $\Delta T = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right), \quad p_1 S + F = p_2 S,$ $p_2 = p_1 + \frac{F}{S}, \quad \Delta T = \frac{T_1 F}{p_1 S}.$
$\Delta T = ?$	

Відповідь: $\Delta T = 9,7 \text{ К}$.

2.29. Визначити піднімальну силу F наповненої гелієм повітряної кулі, оболонка якої може вільно розтягуватися. Маса гелію $m_r = 120$ кг. Відносна молекулярна маса повітря $M_p = 29$, гелію $M_r = 4$.

Дано

$$\begin{aligned} m_r &= 120 \text{ кг} \\ M_r &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ M_p &= 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ F &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

Піднімальна сила дорівнює різниці між виштовхувальною архімедовою силою $F_{\text{Арх}}$ і силою тяжіння гелію маси m_r

$$F = F_{\text{Арх}} - m_r g.$$

Архімедова сила дорівнює вазі повітря, яке займає такий самий об'єм, що й гелій

$$F_{\text{Арх}} = \rho_p V g.$$

Виразивши об'єм гелію, як $V_r = \frac{m_r}{\rho_r}$, отримаємо

$$F = \rho_p \frac{m_r}{\rho_r} g - m_r g = m_r g \left(\frac{\rho_p}{\rho_r} - 1 \right).$$

Вважаємо, що тиск у середині повітряної кулі, заповненої гелієм, дорівнює тискові навколишнього повітря, тоді густину можна виразити з рівняння Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}.$$

Тоді $\frac{\rho_p}{\rho_r} = \frac{M_p}{M_r}$. Остаточно $F = m_r g \left(\frac{M_p}{M_r} - 1 \right)$.

Відповідь: $F = 7,36$ кН.

2.30. Автомобільну камеру місткості $V = 10$ л треба накачати до тиску $p = 0,2$ МПа. Скільки качань n треба зробити насосом, який при кожному качанні забирає $V_1 = 400$ см³ повітря, якщо камера спочатку була: а) пустою; б) заповненою повітрям наполовину; в) повністю заповненою повітрям за нормальних умов? Стискування вважати ізотермічним.

Дано

$$V = 10 \text{ л}$$

$$p = 0,2 \text{ МПа}$$

$$V_1 = 0,4 \text{ л}$$

$$p_a = 0,101 \text{ МПа}$$

$$n_1 = ? \quad n_2 = ?$$

$$n_3 = ?$$

Розв'язання

а) Під час кожного качання в камеру поступає повітря маси m_1 , яку можна визначити з рівняння Клапейрона

$$p_a V_1 = \frac{m_1}{M} RT, \quad m_1 = \frac{p_a V_1 M}{RT},$$

де p_a – атмосферний тиск.

Після n_1 качань у камері буде знаходитись повітря маси $n_1 m_1$, для якого знову можна записати рівняння Клапейрона

$$pV = \frac{n_1 m_1}{M} RT.$$

Підставивши m_1 , знайдемо $n_1 = \frac{pV}{p_a V_1}$.

б) У камері під атмосферним тиском міститься повітря, маса m^* якого знаходиться з рівняння $p_a \frac{V}{2} = \frac{m^*}{M} RT$, $m^* = \frac{p_a VM}{2RT}$.

Крім того, після n_2 качань додається повітря маси $n_2 m_1$.

Сумарна маса повітря в камері $m^* + n_2 m_1$, для якого знов запишемо рівняння Клапейрона

$$pV = \frac{m^* + n_2 m_1}{M} RT.$$

Після підстановки m^* та перетворень знайдемо

$$n_2 = \left(\frac{p}{p_a} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{V}{V_1} \right).$$

в) У камері міститься повітря масою m^{**} під атмосферним тиском

$$p_a V = \frac{m^{**}}{M} RT, \quad m^{**} = \frac{p_a VM}{RT}.$$

Після n_3 качань маса повітря в камері $m^{**} + n_3 m_1$

З рівняння Клапейрона

$$pV = \frac{m^{**} + n_3 m_1}{M} RT \quad \text{визначимо} \quad n_3 = \left(\frac{p}{p_a} - 1 \right) \frac{V}{V_1}.$$

Відповідь: $n_1 = 50$, $n_2 = 37$, $n_3 = 25$.

Вологість повітря

2.31. В об'ємі $V = 5 \text{ м}^3$ повітря міститься водяна пара маси $m = 80 \text{ г}$. Визначити абсолютну вологість повітря.

Відповідь: $\rho_a = \frac{m}{V} = 16 \text{ г/м}^3$.

2.32. Температура повітря $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, відносна вологість $\varphi = 75 \%$. Визначити масу водяної пари у 1 м^3 повітря.

Дано	Розв'язання
$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\varphi = 75 \%$	$\rho_a = \frac{\rho_n \varphi}{100\%}$
$\rho_a = ?$	Густина ρ_n насичуючої водяної пари при $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ знайдемо з таблиці, $\rho_n = 0,023 \text{ кг/м}^3$. Підставивши числові значення, одержимо $\rho_a = 0,017 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $\rho_a = 0,017 \text{ кг/м}^3$.

2.33. Температура повітря $t_1 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$, відносна вологість $\varphi = 60 \%$. Чи випаде вночі іній, якщо температура ґрунту знизиться до $t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$? Густина насичуючої водяної пари при $t_1 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $5,6 \text{ г/м}^3$, а при температурі $t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$ — $3,81 \text{ г/м}^3$.

Дано	Розв'язання
$t_1 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\varphi = 60 \%$	$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\%, \quad \rho_{a1} = \frac{\varphi \rho_{n1}}{100\%},$
$t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_{a1} = 3,36 \text{ г/м}^3, \quad \rho_{a1} < \rho_{n2},$
$\rho_{n1} = 5,6 \text{ г/м}^3$	Іній (або роса) випадає, коли абсолютна
$\rho_{n2} = 3,81 \text{ г/м}^3$	вологість повітря становиться більшою, ніж
Чи випаде іній?	густина насичуючої пари за даної температури.

У даному випадку іній не випадає.

Відповідь: Ні.

2.34. Відносна вологість повітря $\varphi = 80 \%$. Визначити абсолютну вологість ρ_a , якщо густина насичуючої водяної пари $\rho_n = 14,5 \text{ г/м}^3$.

Відповідь: $11,6 \text{ г/м}^3$.

2.35. При температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ відносна вологість повітря $\varphi = 58 \%$. При якій максимальній температурі t_p випадає роса? Скористатися таблицею значень густини і тиску насиченої пари при різних температурах.

Дано	Розв'язання
------	-------------

$t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	При температурі $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за таблицею густина насичуючої водяної пари $\rho_{н1} = 17,3\text{ г/м}^3$. Оскільки відносна вологість повітря $\varphi_1 = 58\%$, то маса водяної пари у 1 м^3 повітря (абсолютна вологість)
$\varphi_1 = 58\%$	
$t_p = ?$	

$$\rho_{a1} = \frac{\rho_{н1} \cdot \varphi}{100\%} = 0,58 \cdot 17,3 = 10,03\text{ г/м}^3.$$

У разі зниження температури цієї маси водяної пари у кубічному метрі повітря вистачає, щоб пара стала насичуючою – ця температура зветься точкою роси t_p . Отже

$$\rho_n(t_p) = \rho_{a1} = 10,03\text{ г/м}^3.$$

За таблицею навпроти значення $10,03\text{ г/м}^3$ знаходимо температуру $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це і є точка роси для такої кількості водяної пари.

Відповідь: $t_p = 11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.36. Яку масу Δm води потрібно випарити в об'ємі $V = 5000\text{ м}^3$ повітря, відносна вологість якого $\varphi_1 = 60\%$ при температурі $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, щоб збільшити відносну вологість до $\varphi_2 = 70\%$? Скористатися таблицею значень густини і тиску насиченої пари при різних температурах.

<i>Дано</i>		<i>Розв'язання</i>	
$V = 5\,000\text{ м}^3$	$\varphi_1 = \frac{\rho_{a1}}{\rho_{н1}} \cdot 100\%, \quad \rho_{н1} \text{ знаходимо за таблицею,}$ $\rho_{н1} = 17,3\text{ г/м}^3.$		
$\varphi_1 = 60\%$			
$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\varphi_2 = 70\%$			
$\Delta m = ?$		За умовою температура залишається сталою, отже і густина насичуючої пари для більшої відносної вологості залишається тією ж самою, але зростає абсолютна вологість. $\varphi_2 = \frac{\rho_{a2}}{\rho_{н1}} \cdot 100\%, \quad \rho_{a2} = \frac{\rho_{н1} \cdot \varphi_2}{100\%}$. Зростання абсолютної вологості	

$$\Delta \rho_a = \rho_{a2} - \rho_{a1} = \frac{\rho_{н1}}{100\%} (\varphi_2 - \varphi_1) = 1,73\text{ г/м}^3.$$

Стільки вологи потрібно випарити у кожний кубометр повітря, а у весь об'єм

$$\Delta m = \Delta \rho_a V = 8,65\text{ кг}.$$

Відповідь: $\Delta m = 8,65\text{ кг}$.

2.37. Температура повітря увечері була $t_1 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна

вологість $\varphi = 65\%$. Уночі температура повітря знизилась до $t_2 = 4\text{ }^\circ\text{C}$. Чи була роса вночі? Якщо була, то скільки водяної пари сконденсувалося з 1 м^3 повітря? При температурі t_1 густина насичуючої пари $\rho_{1\text{н}} = 15,4\text{ г/м}^3$, а при температурі t_2 – $\rho_{2\text{н}} = 6,4\text{ г/м}^3$.

Відповідь: Так. $\Delta m = 3,61\text{ г}$.

2.38. При температурі $t_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$ відносна вологість повітря $\varphi = 80\%$. Як зміниться відносна вологість при підвищенні температури до $t_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, якщо кількість пари в повітрі залишається без змін? Густина насичуючої пари при $t_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $\rho_{1\text{н}} = 9,4\text{ г/м}^3$, при $t_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ – $\rho_{2\text{н}} = 17,3\text{ г/м}^3$.

Відповідь: $\varphi_2 = 43,5\%$.

2.39. У герметично закритій посудині об'ємом $V = 10\text{ л}$ міститься водяна пара під тиском $p_1 = 1\text{ МПа}$ при температурі $t_1 = 200\text{ }^\circ\text{C}$. Під час охолодження посудини до температури $t_2 = 93\text{ }^\circ\text{C}$ на її стінках у вигляді роси випала вода масою $\Delta m = 41,5\text{ г}$. Яким при цьому став тиск p_2 пари?

Дано

$$V = 10\text{ л} = 10^{-2}\text{ м}^3$$

$$p_1 = 1\text{ МПа} = 10^6\text{ Па}$$

$$T_1 = 273 + t_1 = 473\text{ К}$$

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

$$T_2 = 273 + t_2 = 366\text{ К}$$

$$\Delta m = 41,5\text{ г} = 0,0415\text{ кг}$$

$$p_2 = ?$$

Розв'язання

Вважаємо, що ненасичена водяна пара описується рівнянням Клапейрона

$$p_1 V = \frac{m}{M} R T_1,$$

звідки $m = \frac{p_1 V M}{R T_1} = 0,0458\text{ кг}.$

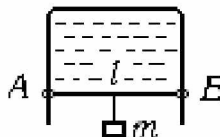
$$p_2 V = \frac{m - \Delta m}{M} R T_2,$$

$$p_2 = \frac{(m - \Delta m) R T_2}{M V}.$$

Відповідь: $p_2 = 72,66\text{ кПа}$.

Поверхневий натяг. Капілярні явища

2.40. Вертикальна прямокутна тонка дротяна рамка, одна сторона якої завдовжки $l = 3$ см є рухомою, опускається в мильний розчин і зтягується плівкою рідини. Щоб утримати рухому сторону в рівновазі, до неї підвішують невеликий тягарець маси $m = 250$ мг. Визначити за цими даними поверхневий натяг σ рідини.



Дано	Розв'язання
$l = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	Плівка має дві поверхні, тому довжина межі поверхневого шару становить $2l$. Сила поверхневого натягу $F_{\text{пл.}} = \sigma \cdot 2l$. Умова рівноваги
$m = 250 \text{ мг} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$	
$\sigma = ?$	

$$mg = 2\sigma l. \text{ Звідки } \sigma = \frac{mg}{2l}.$$

Відповідь: $\sigma = 40,9 \text{ мН/м}$.

2.41. Визначити роботу A , яку потрібно здійснити, щоб видути мильну бульку діаметра $d = 5$ см. Поверхневий натяг мильного розчину $\sigma = 40$ мН/м. Процес вважати ізотермічним.

Дано	Розв'язання
$d = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}, \Delta E = A, A = \sigma \Delta S,$ ΔS – загальна площа двох сферичних поверхонь (зовнішньої і внутрішньої) плівки мильної бульки.
$\sigma = 40 \text{ мН/м} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$	
$A = ?$	

$$\Delta S = 2S, S = \pi d^2, A = \sigma \cdot 2\pi d^2.$$

Відповідь: $A = 0,63 \text{ мДж}$.

2.42. Під час вимірювання поверхневого натягу крапельним методом загальна маса $n = 50$ краплин спирту, що витікають з капіляра, становить $m = 0,35$ г. Діаметр шийки краплини в момент відриву $d = 1$ мм. Визначити за цими даними поверхневий натяг σ

спирту.

Дано	Розв'язання
$n = 50$ $m = 0,35 \text{ г} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$ $d = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ $\sigma = ?$	$\sigma = \frac{F}{l}, \quad F = \frac{mg}{n}, \quad l = \pi d,$ $\sigma = \frac{mg}{n\pi d}.$

Відповідь: $\sigma = 21,87 \text{ мН/м}$.

2.43. Скляний капіляр занурений вертикально в гліцерин. Висота стовпчика гліцерину в трубці $h = 20 \text{ мм}$, діаметр каналу трубки $d = 1 \text{ мм}$, густина гліцерину $\rho = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Визначити поверхневий натяг σ гліцерину.

Дано	Розв'язання
$h = 20 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $d = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ $\rho = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\sigma = ?$	$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad \sigma = \frac{\rho g r h}{2}.$

Відповідь: $\sigma = 61,8 \text{ мН/м}$.

2.44. Скляний капіляр занурений вертикально в воду. Висота стовпчика води в трубці $h = 20 \text{ мм}$. Густина води $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, поверхневий натяг води $\sigma = 73 \text{ мН/м}$. Визначити діаметр каналу трубки d .

Відповідь: $d = 1,49 \text{ мм}$.

2.45. Капіляр з внутрішнім радіусом $r = 0,5 \text{ мм}$ занурений в гліцерин. Визначити масу гліцерину, що піднявся в капілярі. Поверхневий натяг гліцерину $\sigma = 62 \text{ мН/м}$.

Дано	Розв'язання
$r = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ $\sigma = 62 \text{ мН/м} = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ $m = ?$	$mg = F_{\text{п.н.}}, \quad F_{\text{п.н.}} = \sigma l, \quad l = 2\pi r,$ $m = \frac{2\pi r \sigma}{g}.$

Відповідь: $m = 19,85 \text{ мг}$.

2.46. Дві краплини ртуті радіуса $r = 1 \text{ мм}$ кожна зливаються в одну велику краплину. Яка енергія ΔE виділяється при цьому?

Поверхневий натяг ртуті $\sigma = 510$ мН/м. Процес вважати ізотермічним.

Дано	Розв'язання
$r = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$	$S_1 = 4\pi r^2, \quad V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3,$
$\sigma = 510 \text{ мН/м} = 0,51 \text{ Н/м}$	$V = 2V_1, \quad \frac{4}{3}\pi R^3 = 2\frac{4}{3}\pi r^3,$
$\Delta E = ?$	

$$R = \sqrt[3]{2}r, \quad S = 4\pi R^2 = 4\pi\sqrt[3]{4}r^2.$$

Зменшення поверхні під час зливання

$$\Delta S = 2S_1 - S = 8\pi r^2 - 4\pi\sqrt[3]{4}r^2 = 4\pi r^2(2 - \sqrt[3]{4}).$$

Зменшення поверхневої енергії

$$\Delta E = \sigma \Delta S = \sigma 4\pi r^2(2 - \sqrt[3]{4}).$$

Відповідь: $\Delta E = 2,64$ мкДж.

2.47. Повітряна бульбашка діаметра $d = 20$ мкм міститься у воді біля самої її поверхні. Визначити густину ρ повітря в бульбашці, якщо повітря над поверхнею води знаходиться за нормальних умов. Поверхневий натяг води $\sigma = 73$ мН/м, молярна маса повітря $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Дано	Розв'язання
$d = 20 \text{ мкм} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$	$p = p_0 + \Delta p, \quad \Delta p = \frac{2\sigma}{r} = \frac{4\sigma}{d},$
$\sigma = 73 \text{ мН/м} = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$	$p = p_0 + \frac{4\sigma}{d}, \quad pV = \frac{m}{M}RT_0,$
$p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$	
$T_0 = 273 \text{ К}$	
$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$	$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT_0} = \frac{(p_0 + \frac{4\sigma}{d})M}{RT_0}.$
$\rho = ?$	

Відповідь: $\rho = 1,48$ кг/м³.

2.48. Тиск повітря всередині мильної бульки на $\Delta p = 100$ Па більший за атмосферний. Поверхневий натяг мильного розчину $\sigma = 40$ мН/м. Визначити діаметр d бульки.

Відповідь: $d = 3,2$ мм. В к а з і в к а. Врахувати, що надлишковий тиск утворюється двома сферичними поверхнями.

Теплові явища. Основи термодинаміки

- Внутрішня енергія одноатомного ідеального газу

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV,$$

де m – маса газу, M – його молярна маса.

- Робота, що здійснюється газом при ізобарному розширенні

$$A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

- Кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла масою m ,

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

де c – питома теплоємність речовини, або

$$Q = \frac{m}{M} C(T_2 - T_1),$$

де C – молярна теплоємність речовини.

- Молярні теплоємності одноатомного ідеального газу у процесах при $V = \text{const}$ (C_V) і $p = \text{const}$ (C_p)

$$C_V = \frac{3}{2} R, C_p = \frac{5}{2} R, C_p = C_V + R.$$

- Кількість теплоти, необхідна для того, щоб розплавити кристалічне тіло, яке знаходиться при температурі плавлення (така ж виділяється під час твердіння)

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m,$$

де λ – питома теплота плавлення.

- Кількість теплоти, необхідна для перетворення у пару рідини, яка знаходиться при температурі кипіння (така ж виділяється під час конденсації)

$$Q_{\text{пар}} = rm,$$

де r – питома теплота пароутворення.

- Кількість теплоти, яка виділяється при згоранні палива

$$Q_{\text{зг}} = qm,$$

де q – питома теплота згорання.

- Перший закон термодинаміки: кількість теплоти, яка надана системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії та виконання нею роботи над зовнішніми тілами

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

- ККД теплового двигуна

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\%,$$

де Q_1 – кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівача, Q_2 – кількість теплоти, віддана холодильнику, A – виконана робота.

Граничне значення ККД теплового двигуна

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

де T_1 – температура нагрівача, T_2 – температура холодильника.

Деякі фізичні параметри

- *Питома теплосмність c*

води $4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К),

льоду $2,09 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

- *Питома теплота плавлення λ льоду $3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг.*
- *Питома теплота пароутворення r води $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг.*

1. Ви дізналися, що в основі термодинаміки лежить поняття *внутрішньої енергії*.

Внутрішня енергія U — сума кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини і потенціальної енергії їх взаємодії

Способи зміни внутрішньої енергії

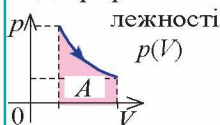
Теплопередача

Кількість теплоти:

- нагрівання/охолодження речовини: $Q = c m \Delta T = C \Delta T$
- плавлення/кристалізація речовини: $Q = \lambda m$
- пароутворення/конденсація речовини: $Q = L m$, $Q = r m$

Робота

Чисельно дорівнює площі фігури під графіком залежності



Внутрішня енергія ідеального одноатомного газу

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R T = \frac{3}{2} p V$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

2. Ви ознайомились із законом збереження та перетворення енергії в термодинаміці.

Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$

Адіабатний процес:

$$Q = 0, \\ A = -\Delta U$$

Ізотермічний процес:

$$\Delta U = 0, \\ Q = A$$

Ізобарний процес:

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

Ізохорний процес:

$$A = 0, \\ Q = \Delta U$$

3. Ви згадали *принцип дії теплових двигунів*:



4. Ви дізналися про *принцип роботи холодильного пристрою*:



5. Ви з'ясували, чому *ККД теплової машини завжди менший від 100 %*, дізналися, як розрахувати ККД η і визначити *холодильний коефіцієнт k* .

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\eta_{\max} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}$$

$$k = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$k_{\max} = \frac{T_{\text{х}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}$$

Робота і кількість теплоти. Перший закон термодинаміки

2.49. На скільки градусів Δt температура води біля підніжжя водоспаду вища, ніж біля його вершини? Висота водоспаду $h = 120$ м. Вважати, що на нагрівання води витрачається вся її потенціальна енергія.

Дано	Розв'язання
$h = 120$ м	$E_p = Q, \quad E_p = mgh,$
$c = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)	$Q = cm \Delta t, \quad \Delta t = \frac{gh}{c}.$
$\Delta t = ?$	

Відповідь: $\Delta t = 0,28$ °С.

2.50. Свинцева куля масою $m_1 = 20$ г, яка летіла зі швидкістю $v_1 = 500$ м/с, попала у нерухому мідну кулю масою $m_2 = 5$ кг і прилипла до

неї. На скільки градусів Δt нагріються кулі, якщо вважати, що вся кінетична енергія свинцевої кулі йде на нагрівання?

Дано

$$m_1 = 20 \text{ г} = 0,02 \text{ кг}$$

$$v_1 = 500 \text{ м/с}$$

$$c_1 = 130 \text{ Дж/(кг·К)}$$

$$m_2 = 5 \text{ кг}$$

$$c_2 = 390 \text{ Дж/(кг·К)}$$

$$\Delta t = ?$$

Розв'язання

$$E_k = Q,$$

$$E_k = \frac{m_1 v_1^2}{2},$$

$$Q = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \Delta t,$$

$$\Delta t = \frac{m_1 v_1^2}{2(c_1 m_1 + c_2 m_2)}.$$

Відповідь: $\Delta t = 1,28^\circ\text{C}$.

2.51. Свинцева куля, що летіла зі швидкістю $v_1 = 500 \text{ м/с}$, пробила тонку дошку. На скільки градусів Δt нагрілась куля, якщо вона вилетіла з дошки зі швидкістю $v_2 = 300 \text{ м/с}$, а на нагрівання кулі пішло $\eta = 50\%$ теплоти, що виділилася?

Дано

$$v_1 = 500 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 300 \text{ м/с}$$

$$c = 130 \text{ Дж/(кг·К)}$$

$$\eta = 50\%$$

$$\Delta t = ?$$

Розв'язання

$$\eta \Delta E_k = Q,$$

$$\Delta E_k = \frac{m}{2} (v_1^2 - v_2^2),$$

$$\eta \frac{m}{2} (v_1^2 - v_2^2) = cm \Delta t,$$

$$\Delta t = \frac{\eta (v_1^2 - v_2^2)}{2c}.$$

Відповідь: $\Delta t = 307,7^\circ\text{C}$.

2.52. Один кіломоль одноатомного газу нагрівається на 100 К при постійному об'ємі. Визначити кількість теплоти Q , яка була надана газу.

Дано

$$\Delta T = 100 \text{ К}$$

$$\nu = 10^3 \text{ моль}$$

$$V = \text{const}$$

$$Q = ?$$

Розв'язання

$$Q = \nu C_V \Delta T,$$

$$C_V = \frac{3}{2} R.$$

$$Q = \frac{3}{2} R \nu \Delta T.$$

Відповідь: $Q = 1,25 \text{ МДж}$.

2.53. Аеростат об'ємом $V = 5 \text{ м}^3$ заповнений гелієм під тиском $p = 0,1 \text{ МПа}$. Під час нагрівання температура газу в аеростаті піднялась

від $t_1 = 27^\circ\text{C}$ до $t_2 = 42^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти Q надано газу? Тиск навколишнього повітря нормальний.

Дано

$$\begin{aligned} V &= 5 \text{ м}^3 \\ p &= 0,1 \text{ МПа} = 10^5 \text{ Па} \\ T_1 &= 300 \text{ К} \\ T_2 &= 315 \text{ К} \\ Q &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

Оболонка аеростату знаходиться під сталим тиском навколишнього повітря, отже процес нагрівання гелію є ізобарним. Для ізобарного процесу

$$Q = \nu C_p \Delta T, \quad C_p = \frac{5}{2} R,$$

$$\begin{aligned} pV &= \nu RT_1, \quad \nu = \frac{pV}{RT_1}, \quad \Delta T = T_2 - T_1, \\ Q &= -\frac{5}{2} pV \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right). \end{aligned}$$

Відповідь: $Q = 62,5 \text{ кДж}$.

2.54. При якому тиску p внутрішня енергія одноатомного ідеального газу в об'ємі $V = 2 \text{ м}^3$ становить $U = 450 \text{ кДж}$?

Дано

$$\begin{aligned} V &= 2 \text{ м}^3 \\ U &= 4,5 \cdot 10^5 \text{ Дж} \\ p &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

$$U = \frac{3}{2} pV, \quad p = \frac{2U}{3V}.$$

Відповідь: $p = 150 \text{ кПа}$.

2.55. Під час ізобарного розширення водню масою $m = 20 \text{ г}$ його об'єм зріс у 2 рази. Початкова температура газу $T_1 = 300 \text{ К}$. Визначити роботу A розширення газу, зміну ΔU внутрішньої енергії і кількість теплоти Q , наданої газу.

Дано

$$\begin{aligned} p &= \text{const} \\ M &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ m &= 0,02 \text{ кг} \\ \frac{V_2}{V_1} &= 2 \\ c &= 1,43 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \\ T_1 &= 300 \text{ К} \\ A &= ? \quad \Delta U = ? \quad Q = ? \end{aligned}$$

Розв'язання

$$\begin{aligned} A &= p(V_2 - V_1), \quad V_2 = 2V_1, \quad A = pV_1, \\ pV_1 &= \frac{m}{M} RT_1, \quad A = \frac{m}{M} RT_1, \\ \frac{V_2}{V_1} &= \frac{T_2}{T_1}, \quad T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1}, \\ Q &= cm(T_2 - T_1) = cmT_1 \left(\frac{V_2}{V_1} - 1 \right), \end{aligned}$$

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

Відповідь: $A = 24,93$ кДж, $Q = 85,8$ кДж, $\Delta U = 60,87$ кДж.

2.56. Вуглекислий газ CO_2 у кількості чотирьох молів був нагрітий на $\Delta T = 100$ К при постійному тиску. Визначити роботу A розширення, зміну ΔU внутрішньої енергії газу і надану газу кількість теплоти Q .

Дано

$$p = \text{const}$$

$$M = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\nu = 4 \text{ моли}$$

$$\Delta T = 100 \text{ К}$$

$$c = 0,83 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$A = ? \Delta U = ? Q = ?$$

Розв'язання

$$A = p(V_2 - V_1),$$

$$pV_1 = \nu RT_1, \quad pV_2 = \nu RT_2,$$

$$A = p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1) = \nu R \Delta T,$$

$$Q = cM \Delta T = c\nu M \Delta T,$$

$$\Delta U = Q - A = \nu \Delta T (cM - R).$$

Відповідь: $A = 3,32$ кДж, $Q = 14,61$ кДж, $\Delta U = 11,29$ кДж.

2.57. У вертикальному циліндрі під рухомим поршнем міститься кисень масою $m = 2$ кг. Для підвищення температури кисню на $\Delta T = 5$ К йому було надано $Q = 9\,160$ Дж теплоти. Визначити питому теплоємність c кисню, роботу A , яку він виконує під час розширення, і збільшення ΔU його внутрішньої енергії.

Дано

$$m = 2 \text{ кг}$$

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

$$\Delta T = 5 \text{ К}$$

$$Q = 9\,160 \text{ Дж}$$

$$c = ? A = ? \Delta U = ?$$

Розв'язання

$$Q = cM \Delta T, \quad c = \frac{Q}{m \Delta T},$$

Під час нагрівання кисень піднімає поршень і, отже, тиск його залишається постійним. Для ізобарного нагрівання

$$A = p(V_2 - V_1) = \nu R \Delta T, \text{ (див. задачу 2.56), } \nu = \frac{m}{M}. \Delta U = Q - A$$

Відповідь: $c = 916$ Дж/(кг·К), $A = 2,6$ кДж, $\Delta U = 6,56$ кДж.

2.58. Під час ізобарного нагрівання $m = 12$ г гелію він виконує роботу $A = 1$ кДж. На скільки градусів ΔT змінилася температура газу і яка кількість теплоти Q була йому надана?

Відповідь: $\Delta T = 40,1$ К, $Q = 2,5$ кДж.

2.59. Кисень масою $m = 10$ г має початкову температуру $T_1 = 370$ К. Газ охолоджують при постійному об'ємі так, що його тиск зменшується у $n = 3$ рази. Потім газ розширюється при постійному

тиску. Температура газу у кінцевому стані дорівнює первісній. Визначити роботу A , виконану газом, та зміну ΔU його внутрішньої енергії.

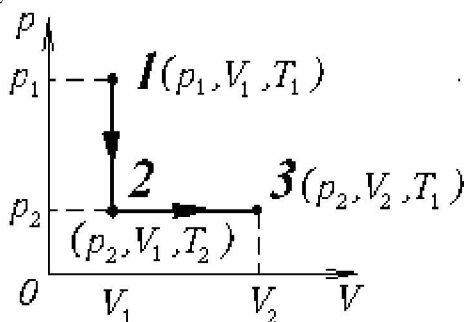
Дано

$$\begin{aligned} m &= 10 \text{ г} \\ M &= 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ T_1 &= 370 \text{ К} \\ 1 \rightarrow 2, V &= \text{const} \\ \frac{p_1}{p_2} &= n = 3 \\ \frac{p_2}{p_1} &= n = 3 \\ 2 \rightarrow 3, p &= \text{const} \\ T_3 &= T_1 \end{aligned}$$

$$A = ? \quad \Delta U = ?$$

Розв'язання

Графіки обох процесів зображені на рисунку.



Запишемо рівняння стану для кожного з трьох станів 1, 2, 3.

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

Звідки, з урахуванням того, що $p_1/p_2 = n$, знаходимо, що $V_2 = nV_1$, або

$$\Delta V = V_2 - V_1 = (n - 1)V_1.$$

Під час охолодження при постійному об'ємі (процес $1 \rightarrow 2$ на рисунку) робота не виконується, $A = 0$, оскільки $\Delta V = 0$. Під час розширення при постійному тиску (процес $2 \rightarrow 3$ на рисунку) виконується робота

$$A = p_2 \Delta V = p_2 V_1 \frac{(n-1)}{n} = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{1} \frac{(n-1)}{n} = 641 \text{ Дж.}$$

Оскільки кінцева температура співпадає з початковою, внутрішня енергія не змінюється, $\Delta U = 0$.

Відповідь: $A = 641 \text{ Дж}$, $\Delta U = 0$.

Зміна внутрішньої енергії тіл під час теплообміну. Рівняння теплового балансу

2.60. Щоб виготовити лід у кімнатному холодильнику потрібен час $\tau_1 = 5 \text{ хв}$ для охолодження води від температури $t_1 = 4^\circ\text{C}$ до

температури $t_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і ще час $\tau_2 = 1\text{ год } 40\text{ хв}$, щоб перетворити її у лід. Визначити за цими даними питому теплоту λ плавлення льоду.

Дано

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 5\text{ хв} \\ t_1 &= 4\text{ }^{\circ}\text{C} \\ t_2 &= 0\text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_1 &= 4,19 \cdot 10^3\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)} \\ \tau_2 &= 100\text{ хв} \\ \lambda &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

Вважаємо, що кількість теплоти, яку віднімає холодильник у тіла, пропорційна часові охолодження, $Q \sim \tau$.
Тоді

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2}.$$

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_1 - t_2), \quad Q_2 = \lambda m_2, \quad \lambda = \frac{c_1 (t_1 - t_2) \tau_2}{\tau_1}.$$

Відповідь: $\lambda = 335,2\text{ кДж/кг}$.

2.61. Змішано m_1 кг води при температурі $t_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і m_2 кг води при температурі $t_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура суміші $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити відношення m_2/m_1 .

Дано

$$\begin{aligned} t_1 &= 50\text{ }^{\circ}\text{C} \\ t_2 &= 0\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \theta &= 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \frac{m_2}{m_1} &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

$$Q_1 = Q_2,$$

$$c_B m_1 (t_1 - \theta) = c_B m_2 (\theta - t_2),$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{t_1 - \theta}{\theta - t_2}.$$

Відповідь: $m_2/m_1 = 1,5$.

2.62. Яку кількість теплоти Q необхідно надати льоду маси $m_1 = 0,5\text{ кг}$ при температурі $t_1 = -21\text{ }^{\circ}\text{C}$ для перетворення його у воду з температурою $t_2 = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Дано

$$\begin{aligned} m_1 &= 0,5\text{ кг} \\ c_{\text{л}} &= 2,09 \cdot 10^3\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)} \\ t_1 &= -21\text{ }^{\circ}\text{C} \\ c_{\text{в}} &= 4,19 \cdot 10^3\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)} \\ t_2 &= 77\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \lambda &= 3,35 \cdot 10^5\text{ Дж/кг} \\ Q &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання

$$Q_1 = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1),$$

$$Q_2 = \lambda m_1, \quad Q_3 = c_{\text{в}} m_1 (t_2 - 0).$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

Відповідь: $Q = 350,76\text{ кДж}$.

2.63. Суміш, яка містить $m_1 = 5$ кг льоду і $m_2 = 10$ кг води при температурі $t_1 = 0$ °С, необхідно нагріти до температури $t_2 = 100$ °С. Визначити необхідну для цього кількість теплоти Q .

Дано	Розв'язання
$m_1 = 5$ кг	$Q = Q_1 + Q_2,$
$\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг	
$m_2 = 10$ кг	$Q_1 = \lambda m_1,$
$t_1 = 0$ °С	$Q_2 = c_{\text{в}}(m_1 + m_2)(t_2 - t_1).$
$t_2 = 100$ °С	
$c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)	
$Q = ?$	Відповідь: $Q = 7,96$ МДж.

2.64. Ванну місткістю $V = 100$ л потрібно наповнити водою, яка має температуру $\theta = 30$ °С, використовуючи воду з температурою $t_1 = 80$ °С і лід з температурою $t_2 = -20$ °С. Визначити масу $m_{\text{л}}$ льоду, який треба покласти у ванну. Теплоємністю ванни і втратами теплоти нехтувати.

Дано	Розв'язання
$\rho_{\text{в}} = 10^3$ кг/м ³	Позначимо кінцеву масу води у ванні m .
$V = 100$ л = $0,1$ м ³	$m = \rho_{\text{в}} V.$
$c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)	Коли лід розтане, він перетвориться у воду такої самої маси, отже маса води з температурою
$\theta = 30$ °С	$t_1 = 80$ °С, яку потрібно використати, дорівнює $m - m_{\text{л}}$.
$t_1 = 80$ °С	Рівняння теплового балансу
$t_2 = -20$ °С	$c_{\text{а}}(m - m_{\text{л}})(t_1 - \theta) = c_{\text{л}}m_{\text{л}}(0 - t_2) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{а}}m_{\text{л}}$
$c_{\text{л}} = 2,09 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)	
$\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг	
$m_{\text{л}} = ?$	

Після алгебраїчних перетворень одержимо

$$m_{\text{л}} = \frac{\tilde{n}_{\text{л}} \rho_{\text{л}} V (t_1 - \theta)}{c_{\text{л}} t_1 - c_{\text{в}} t_2 + \lambda}.$$

Відповідь: $m_{\text{л}} = 29,42$ кг.

2.65. У посудину з $m_{\text{в}} = 10$ кг води при температурі $t_1 = 10$ °С, поклали кусок льоду, температура якого $t_2 = -50$ °С, після чого температура льодяної маси стала дорівнювати $\theta = -4$ °С.

Визначити масу $m_{\text{л}}$ льоду, покладеного в посудину.

Дано

Розв'язання

$$m_{\text{в}} = 10 \text{ кг}$$

$$t_1 = 10 \text{ °С}$$

$$t_2 = -50 \text{ °С}$$

$$\theta = -4 \text{ °С}$$

$$\lambda = 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$c_{\text{л}} = 2,09 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$m_{\text{л}} = ?$$

$Q_1 = c_{\text{л}} m_{\text{л}} (\theta - t_2)$, поглинає лід, нагріваючись; $Q_2 = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_1 - 0)$, віддає вода, охолоджуючись; $Q_3 = \lambda m_{\text{в}}$, віддає вода, твердіючи; $Q_4 = c_{\text{л}} m_{\text{в}} (0 - \theta)$, віддає лід, що утворився з води, охолоджуючись.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$m_{\text{л}} = \frac{c_{\text{в}} t_1 + \lambda - c_{\text{л}} \theta}{c_{\text{л}} (\theta - t_2)} m_{\text{в}}.$$

Відповідь: $m_{\text{л}} = 40,07$ кг.

2.66. Крізь воду пропускають водяну пару, температура якої $t = 100$ °С. Яку масу m водяної пари необхідно взяти для нагрівання $m_1 = 80$ кг води від $t_1 = 15$ °С до $t_2 = 40$ °С?

Дано

Розв'язання

$$r = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$t = 100 \text{ °С}$$

$$c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$m_1 = 80 \text{ кг}$$

$$t_1 = 15 \text{ °С}$$

$$t_2 = 40 \text{ °С}$$

$$m = ?$$

$Q_1 = r m$, виділяється під час конденсації пари; $Q_2 = c_{\text{в}} m (t - t_2)$, виділяється під час охолодження води, що утворилася з пари; $Q_3 = c_{\text{в}} m_1 (t_2 - t_1)$, поглинається водою, крізь яку пропускають пару;

$$Q_1 + Q_2 = Q_3,$$

$$m = \frac{c_{\text{в}} (t_2 - t_1)}{r + c_{\text{в}} (t - t_2)} m_1.$$

Відповідь: $m = 3,34$ кг.

2.67. У теплоізольованій посудині міститься суміш води маси $m_{\text{в}} = 500$ г і льоду маси $m_{\text{л}} = 80$ г при температурі $t_1 = 0$ °С. У посудину подають суху насичену пару маси $m_{\text{п}} = 10$ г при температурі $t_2 = 100$ °С. Якою буде температура θ після встановлення теплової рівноваги?

Дано	Розв'язання
$m_{\text{в}} = 500 \text{ г} = 0,5 \text{ кг}$ $m_{\text{л}} = 80 \text{ г} = 0,08 \text{ кг}$ $m_{\text{п}} = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг}$ $t_1 = 0^\circ \text{C}$ $t_2 = 100^\circ \text{C}$ $\lambda = 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ $c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ $r = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ $\theta = ?$	$rm_{\text{п}} + c_{\text{в}}m_{\text{п}}(t_2 - \theta) =$ $= m_{\text{л}}\lambda + m_{\text{л}}c_{\text{в}}(m_{\text{в}} + m_{\text{л}})(\theta - t_1),$ $\theta = \frac{m_{\text{п}}(r + c_{\text{в}}t_2) - \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}(m_{\text{в}} + m_{\text{л}})t_1}{c_{\text{в}}(m_{\text{в}} + m_{\text{л}} + m_{\text{п}})}$ Відповідь: $\theta \cong 0$ °С.

ККД теплового двигуна

2.68. Чому дорівнює ККД η автомашини з двигуном потужністю $N = 20$ кВт, якщо для надання швидкості $v = 72$ км/год двигун споживає $V = 10$ л бензину на шляху $s = 100$ км? Густина бензину $\rho = 0,7 \cdot 10^3$ кг/м³, його питома теплота згорання $q = 44$ МДж/кг.

Дано	Розв'язання
$N = 20 \text{ кВт} = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт}$ $v = 72 \text{ км/год} = 20 \text{ м/с}$ $V = 10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3$ $s = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$ $\rho = 0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $q = 44 \text{ МДж/кг} = 4,4 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$ $\eta = ?$	$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{витр}}} \cdot 100\%, \quad A_{\text{кор}} = Fs,$ $F = \frac{N}{v}, \quad A_{\text{витр}} = Q = qm, \quad m = \rho V,$ $\eta = \frac{Ns}{vq\rho V} \cdot 100\%.$

Відповідь: $\eta = 32,5$ %.

2.69. Теплова машина виконує за один цикл роботу $A = 4,82$ кДж і віддає холодильнику кількість теплоти $Q_2 = 23,48$ кДж. Визначити ККД циклу.

Дано

Розв'язання

$A = 4,82 \text{ кДж}$ $Q_2 = 23,48 \text{ кДж}$ $\eta = ?$	$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\%, \quad Q_1 = A + Q_2, \quad \eta = \frac{A}{A + Q_2} \cdot 100\%$
---	---

Відповідь: $\eta = 17 \%$.

2.70. Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, за певний час одержала від нагрівача $Q_1 = 12 \text{ кДж}$ енергії. Температура нагрівача $t_1 = 218 \text{ }^\circ\text{C}$, холодильника $t_2 = 92 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити ККД машини, виконану нею роботу A та кількість теплоти Q_2 , яка передана холодильнику.

<i>Дано</i> $Q_1 = 12 \text{ кДж}$ $T_1 = t_1 + 273 = 491 \text{ К}$ $T_2 = t_2 + 273 = 365 \text{ К}$ $\eta = ? \quad A = ? \quad Q_2 = ?$	<i>Розв'язання</i> $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\%,$ $A = \frac{\eta Q_1}{100\%}, \quad Q_2 = Q_1 - A.$
---	---

Відповідь: $\eta = 25,7 \%$, $A = 3,08 \text{ кДж}$, $Q_2 = 8,92 \text{ кДж}$.

2.71. У парову машину надходить пара, температура якої $t_1 = 240 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура в конденсаторі $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Яку теоретично максимально можливу роботу можна одержати, витративши кількість теплоти $Q = 3,8 \text{ кДж}$?

Відповідь: $A = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = 1,78 \text{ кДж}.$

2.72. Парова машина потужністю $N = 17,8 \text{ кВт}$ споживає за одну годину роботи вугілля масою $m = 10,1 \text{ кг}$ з питомою теплотою згорання $q = 33 \text{ МДж/кг}$. Температура котла $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодильника $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити фактичний ККД η машини і порівняти його з ККД η' ідеальної теплової машини, яка працює за циклом Карно з тими ж температурами нагрівача і холодильника

Дано

Розв'язання

$$\begin{aligned}
 N &= 17,8 \text{ кВт} = 1,78 \cdot 10^4 \text{ Вт} \\
 t &= 1 \text{ год} = 3600 \text{ с} \\
 m &= 10,1 \text{ кг} \\
 q &= 33 \text{ МДж/кг} = \\
 &3,3 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} \\
 T_1 &= 273 + t_1 = 473 \text{ К} \\
 T_2 &= 273 + t_2 = 333 \text{ К} \\
 \hline
 \eta &= ? \quad \eta' = ?
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{A_{\text{кор}}}{Q_{\text{вирт}}} \cdot 100\%, \quad A_{\text{кор}} = Nt, \\
 Q_{\text{вирт}} &= qm, \quad \eta = \frac{Nt}{qm} \cdot 100\%, \\
 \eta' &= \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%.
 \end{aligned}$$

Відповідь: $\eta = 19,23 \%$, $\eta' = 29,6 \%$.

2.73. Температура нагрівача ідеальної теплової машини $t_1 = 117^\circ\text{C}$, а холодильника $t_2 = 7^\circ\text{C}$. Від нагрівача за час $\tau = 30 \text{ с}$ машина отримує кількість теплоти $Q_1 = 1,6 \text{ МДж}$. Обчислити ККД машини, її потужність та кількість теплоти, що віддається холодильнику щосекунди.

$$\begin{aligned}
 &\text{Дано} \\
 T_1 &= 273 + t_1 = 390 \text{ К} \\
 T_2 &= 273 + t_2 = 280 \text{ К} \\
 Q_1 &= 1,6 \text{ МДж} = 1,6 \cdot 10^6 \\
 &\text{Дж} \\
 \tau &= 30 \text{ с} \\
 \hline
 \eta &= ? \quad N = ? \quad \frac{Q_2}{\tau} = ?
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Розв'язання} \\
 \eta &= \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%, \quad N = \frac{A}{\tau} = \frac{\eta Q_1}{\tau \cdot 100\%}, \\
 \eta &= \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \cdot 100\%, \\
 Q_2 &= Q_1 \left(1 - \frac{\eta}{100\%}\right), \\
 \frac{Q_2}{\tau} &= \frac{Q_1}{\tau} \left(1 - \frac{\eta}{100\%}\right).
 \end{aligned}$$

Відповідь: $\eta = 28,21 \%$, $N = 15,05 \text{ кВт}$, $Q_2/\tau = 38,29 \text{ кВт}$.

2.74. Холодильник за час $\tau = 1 \text{ год}$ перетворює в лід при температурі 0°C воду маси $m = 3 \text{ кг}$ з початковою температурою $t = 20^\circ\text{C}$. Яку потужність P споживає холодильник від електромережі, якщо він віддає повітрю в кімнаті в одиницю часу енергію $Q_\tau = 800 \text{ Дж/с}$?

Дано

Розв'язання

$$\tau = 1 \text{ год} = 3\,600 \text{ с}$$

$$t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$m = 3 \text{ кг}$$

$$c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) \quad \lambda =$$

$$3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$$

$$Q_{\tau} = 800 \text{ Дж}/\text{с}$$

$$P = ?$$

У холодильних машинах за рахунок зовнішньої роботи теплота від тіла, що охолоджується, передається в навколишнє середовище. З закону збереження енергії випливає, що сума кількості теплоти, яка відбирається в холодильній камері від води під час її охолодження, а потім перетворення в лід, та енергії, отриманої від мережі,

буде дорівнювати кількості теплоти, що передається повітрю в кімнаті

$$cm(t - t_0) + \lambda m + P\tau = Q_{\tau}\tau,$$

звідки

$$P = Q_{\tau} - m(c(t - t_0) + \lambda)/\tau.$$

Відповідь: $P = 451 \text{ Вт}$.

Література

1. Фізика. Задачі з розв'язаннями: Навч. посібник І. П. Гаркуша, З.П. Мокляк, Ю. О. Буслов – Дніпропетровськ; Національна гірнича академія України, 2003. — 000 с

2. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / [В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Харків : Вид-во «Ранок», 2018. — 272 с. : іл.

НОТАТКИ