

Міністерство освіти і науки України  
Державний економіко - технологічний університет  
транспорту

Кафедра фізики та електротехніки

Завдання та методичні вказівки  
до самостійної роботи  
з молекулярної фізики та термодинаміки

Для студентів технічних спеціальностей

Київ - 2017

УДК 53  
ВВК 22.3

Навчальний посібник "Завдання та методичні вказівки до самостійної роботи з молекулярної фізики та термодинаміки" розглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та електротехніки (Протокол №1 від 28.08.2016 року) та на засіданні методичної комісії факультету "Інфраструктура та рухомий склад залізниць" (Протокол №2 від 31.10.2016 року)

**Укладачі:** доцент Поліщук С.І.

**Рецензенти:** професор Завісляк І.В. та професор Чепілко М.М.

# Зміст

<b>1</b>	<b>Організація вивчення курсу загальної фізики в університеті</b>	<b>4</b>
1.1	Вказівки по виконанню та оформленню розрахунково - графічних та контрольних робіт з фізики . . . . .	6
1.2	Вказівки до розв'язку та оформлення задачі з фізики . . . . .	7
1.3	Приклад розв'язку задачі з фізики . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Питання для теоретичної підготовки з молекулярної фізики і термодинаміки та варіанти завдань для самостійної роботи</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Основні формули і співвідношення з молекулярної фізики і термодинаміки</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Приклади розв'язування задач з молекулярної фізики і термодинаміки</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Рекомендована література</b>	<b>40</b>

# 1. Організація вивчення курсу загальної фізики в університеті

В університеті загальний курс фізики вивчається протягом одного, двох чи трьох семестрів, у залежності від профілю факультету та форми навчання.

При вивченні кожного розділу фізики передбачаються такі види навантажень:

1. Теоретичне вивчення курсу.
2. Виконання лабораторних робіт та комп'ютерного моделювання фізичних явищ.
3. Виконання розрахунково - графічних або контрольних робіт.
4. Консультації.
5. Екзамени або заліки.

**Теоретичне вивчення загального курсу фізики** відбувається на лекціях та практичних заняттях згідно розкладу, складеного навчальною частиною університету, у відповідності з навчальним планом підготовки спеціалістів певного профілю. Відвідування студентами лекцій та практичних занять є обов'язковим.

**Лабораторні роботи та комп'ютерне моделювання фізичних явищ** проводяться у навчальних лабораторіях та комп'ютерних класах кафедри фізики та електротехніки згідно розкладу складеному навчальною частиною університету, у відповідності з навчальним планом підготовки спеціалістів певного профілю. Виконані практично, повністю оформлені та захищені лабораторні та комп'ютеризовані роботи відмічаються підписом викладача, який проводить заняття, і реєструються у спеціальному журналі, що зберігається в лабораторії. У кінці семестру, за умови успішного виконання циклу лабораторних та комп'ютеризованих робіт, студенту виставляється залік.

**Розрахунково - графічні роботи** з кожного розділу загальної фізики виконуються студентами стаціонарної форми навчання. Виконання розрахунково - графічної роботи вимагає від студента активного володіння матеріалом відповідного розділу фізики та математичним апаратом на "фізичному" рівні строгості. Рецензування розрахунково - графічних робіт виконується викладачем, який проводить практичні заняття.

**Контрольні роботи** з кожного розділу фізики, що складаються з восьми задач, виконуються студентами заочної форми навчання. Задачі, які входять

до складу контрольної роботи, вимагають від студента для успішного виконання контрольної роботи активного володіння матеріалом відповідного розділу фізики та математичним апаратом на "фізичному" рівні строгості. Рецензування контрольних робіт, як правило, виконується викладачем, який проводить практичні заняття. У випадку незаліку контрольної роботи студент повинен виправити помилки або ж розв'язати задачі знову і здати роботу на повторне рецензування.

**Консультації** проводяться ведучим лектором згідно з розкладом, узгодженим з навчальною частиною університету.

**Заліки та екзамени** з кожного розділу фізики студенти здають у період сесії, згідно з розкладом, складеним навчальною частиною університету. Студенти допускаються до заліків та екзаменів за умови повного виконання відповідної навчальної програми. У випадку неявки студента на екзамен з поважної причини чи отриманні незадовільної оцінки, заліки та екзамени можуть бути здані у дні перездач згідно з розкладом, складеним навчальною частиною університету, або ж по направленню, підписаному деканом факультету.

### **Критерії оцінки знань студентів при здачі іспитів з фізики**

1. Оцінка **відмінно** ставиться у тому випадку, коли студент при відповіді на питання екзаменаційного білету виявляє:
  - правильне розуміння суті розглядуваних фізичних явищ і закономірностей їх протікання, змісту фізичних законів і теорій;
  - вміння використовувати математичний апарат для аналітичного доведення справедливості фізичних законів та співвідношень між певними фізичними величинами, визначити межу застосування математичної моделі певних фізичних явищ;
  - будує відповідь за власним планом, супроводжує відповідь прикладами, вміє застосовувати знання у нестандартних ситуаціях та інших природничих науках;
  - правильно розв'язав задачу у загальному вигляді та виконав наближені обчислення з наперед заданою точністю.
2. Оцінка **добре** ставиться в тому випадку, якщо відповідь задовільняє основним вимогам до відповіді на оцінку **відмінно**, але у ній переважають прості відтворення означень та формулювань, здійснюється вона без чіткого власного плану. Не виявляється узагальнюючий погляд на дане явище або закон, не визначається межа застосування його математичної моделі.
3. Оцінка **задовільно** ставиться в тому випадку, якщо більша частина відповіді задовільняє основним вимогам до відповіді на оцінку **добре**, але у

ній є окремі прогалини, що не спотворюють зміст відповіді, яка у цілому має формальний репродуктивний характер, є помилки у розв'язку задач, який при цьому має правильний напрямок.

4. Оцінка **незадовільно** ставиться в тому випадку, коли студент:
  - відмовляється відповідати після ознайомлення із змістом отриманого завдання;
  - не володіє знаннями і навичками відповідно до вимог навчальної програми;
  - дав відповідь менше чим на два з трьох питань екзаменаційного білету, або хід його розв'язків задач був неправильним.

### 1.1. Вказівки по виконанню та оформленню розрахунково - графічних та контрольних робіт з фізики

До виконання контрольних робіт з курсу загальної фізики слід приступати лише після вивчення матеріалу, що відповідає даному розділу навчальної програми, уважного ознайомлення з правилами оформлення та розв'язку задач, приведеними у цьому посібнику.

1. За час навчання у університеті студенти денної форми навчання повинні виконати чотири розрахунково - графічні роботи. Що стосується студентів заочної форми навчання, то вони повинні виконати шість контрольних робіт.
2. У кожній контрольній роботі студент-заочник повинен розв'язати вісім задач того варіанту, який співпадає з останньою цифрою його шифру. Нумери задач, що входять до складу контрольної роботи, визначаються за таблицями варіантів для відповідної частини курсу загальної фізики, які має у своєму розпорядженні викладач, що веде практичні заняття.
3. Розрахунково - графічні та контрольні роботи виконуються на папері формату А4 чорнилом або ж набираються на комп'ютері, використовуючи текстовий редактор, спряжений з редактором математичних формул. Титульна сторінка роботи повинна бути оформлена у відповідності до стандарту оформлення науково - технічних документів (див.зразок 1).
4. Розрахунково - графічні та контрольні роботи здаються, як правило, на рецензію викладачу, який веде практичні заняття з академічною групою. На рецензію слід здавати одночасно не більше однією роботи. Для виключення помилок, що повторюються, чергову роботу слід здавати

на рецензію тільки після заліку попередньої розрахунково - графічної чи контрольної роботи.

5. Якщо розрахунково - графічна чи контрольна робота при перевірці була не зарахована, то необхідно виправити всі помилки, що містяться в розв'язках задач, дати відповіді на всі зауваження рецензента в письмовій формі у вигляді додатку до основного тексту розрахунково - графічної чи контрольної роботи, та подати їх на повторну перевірку.
6. Зараховані розрахунково - графічні чи контрольні роботи здаються екзаменатору. Студент повинен бути готовим під час здачі заліку чи екзамену дати пояснення по змісту розв'язаних задач, що входять до виконаної розрахунково - графічної чи контрольної роботи.

## 1.2. Вказівки до розв'язку та оформлення задачі з фізики

Розрахунково - графічні та контрольні роботи перевіряються викладачем університету коли студент, який виконав роботу, відсутній. Тому кожна задача повинна бути оформлена акуратно і включати всі необхідні пояснення, що демонструють глибину розуміння студентом відповідного розділу фізики.

При розв'язку задачі слід дотримуватися наступного плану:

1. Розв'язок кожної задачі слід починати з нової сторінки. Для зауважень викладача після розв'язку задачі необхідно залишити вільну сторінку.
2. Умови задач вносяться у текст розрахунково - графічної чи контрольної роботи без скорочень .
3. У тексті розрахунково - графічної чи контрольної роботи, у випадку необхідності, приводяться пояснюючі рисунки, виконані з використанням графічного приладдя або ж комп'ютерного графічного редактора.
4. Виписуються основні закони фізики і формули, на яких базується розв'язок задачі, та даються словесні пояснення змісту символів і позначень у формулах. Повністю приводяться фізичні аргументи та математичні викладки, які становлять зміст розв'язку задачі.
5. Розв'язок задачі отримується у загальному вигляді, який виражає шукану величину через символи фізичних величин, заданих у умові задачі.
6. Виконати перевірку розмірності отриманої формули, яка є символьним розв'язком задачі. Для цього потрібно підставити у символьний розв'язок задачі замість символів відповідні їм позначення одиниць у системі Сі.

Після всіх необхідних скорочень впевнитись у відповідності отриманого результату розмірності шуканої величини (див. приклад розв'язку задачі).

- Підставити у отриману формулу замість символів їхні числові значення, виражені у одиницях системи СІ. Виконати наближені обчислення, записати у відповіді числове значення і скорочену назву одиниці величини, що розраховується. При підстановці чисел в формулу та при записі відповіді числові величини треба виражати в вигляді добутку десяткового дробу з однією значущою цифрою перед точкою на відповідну степінь десяти. Наприклад, замість 4578 потрібно записати  $4.578 \cdot 10^3$ , а замість 0.0002347 записати  $2.347 \cdot 10^{-4}$  тощо.
- Зробити оцінку, де це можливо, правдоподібності отриманого результату. Наприклад, швидкість тіла не може бути більшою за швидкість тіла в вакуумі, коефіцієнт корисної дії не може бути більшим одиниці і тощо.
- У кінці кожної задачі потрібно написати *Відповідь*, привести символічне та розраховане числове значення шуканої фізичної величини з вказанням розмірності. Наприклад:

*Відповідь:*  $a = 12 \frac{M}{c^2}$ .

### 1.3. Приклад розв'язку задачі з фізики

**Умова задачі.** Кисень масою 16 г нагрівають при постійному тиску від 320 К до 340 К. Визначити зміну внутрішньої енергії газу, виконану газом роботу і кількість теплоти, яку одержав газ.

$m = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$	Будемо вважати кисень ідеальним газом. Внутрішня енергія ідеального газу
$T_1 = 320 \text{ К}$	
$T_2 = 340 \text{ К}$	
$M = 3,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	
$\Delta U = ?$	$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R,$
$A = ?$	де $i$ — кількість ступенів свободи молекул газу. Тоді зміна внутрішньої енергії при зміні температури від $T_1$ до $T_2$
$Q = ?$	

$$(1) \quad \Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$

Кисень  $O_2$  — двоатомний газ, для двоатомних газів  $i = 5$  (якщо враховувати ступені свободи, пов'язані лише з поступальним та обертальним рухом).



В ізобарному процесі при зміні об'єму газу від  $V_1$  до  $V_2$  газ виконує роботу

$$(2) \quad A = p(V_2 - V_1).$$

Зміну об'єму газу можна визначити, використавши рівняння Менделєєва-Клапейрона. Для двох вказаних станів газу можна записати:

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1.$$

$$pV_2 = \frac{m}{M}RT_2.$$

Одержуємо

$$V_1 = \frac{m}{pM}RT_1.$$

$$V_2 = \frac{m}{pM}RT_2.$$

Підставляючи вирази для  $V_1$  та  $V_2$  в рівняння (2), знаходимо:

$$(3) \quad A = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1).$$

Для знаходження кількості теплоти, яку одержав газ, можна скористатися першим законом термодинаміки

$$(4) \quad Q = \Delta U + A.$$

Підставляємо до формул (1), (3) та (4) чисельні значення фізичних величин і виконуючи обчислення, знаходимо:

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot 8,31 \cdot (340 - 320) \text{ Дж} = 208 \text{ Дж}.$$

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot 8,31 \cdot (340 - 320) \text{ Дж} = 83,1 \text{ Дж}, \quad Q = 208 + 83,1 = 291 \text{ Дж}.$$

Відповідь:  $\Delta U = 208 \text{ Дж}$ ;  $A = 83,1 \text{ Дж}$ ;  $Q = 291 \text{ Дж}$ .

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНФРАСТРУКТУРИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра фізики та електротехніки

Розрахунково - графічна робота

або

Контрольна робота  
з молекулярної фізики та термодинаміки

**Виконав:**

*15 листопада 2017 року*

*студент Прізвище І.Б.*

*шифр 2016-КІКС-0345*

**Перевірив:**

*20 листопада 2017 року*

*доцент Прізвище І.Б.*

## 2. Питання для теоретичної підготовки з молекулярної фізики і термодинаміки та варіанти завдань для самостійної роботи

**Молекулярно - кінетична теорія та термодинаміка.** Молекулярно - кінетичний та термодинамічний методи вивчення макроскопічних явищ. Тепловий рух молекул. Броунівський рух. Взаємодія молекул. Параметри системи. Рівноважні та нерівноважні процеси.

**Основи молекулярно - кінетичної теорії.** Маса та розміри молекул. Стала Авогадро. Ідеальний газ як молекулярно - кінетична модель реальних газів. Рівняння стану ідеального газу. Закони ідеального газу. Основне рівняння молекулярно - кінетичної теорії газів та його наслідки. Середня кінетична енергія поступального руху одноатомної молекули та її зв'язок з температурою. Тиск ідеального газу. Закон Дальтона. Внутрішня енергія ідеального газу. Розподіл енергії молекули по її ступеням вільності.

**Закони розподілу молекул.** Розподіл молекул газу за швидкостями. Функція розподілу Максвелла та її графік. Найбільш ймовірна, середня арифметична та середня квадратична швидкості молекул. Розподіл молекул за енергіями. Барометрична формула. Розподіл Больцмана.

**Явище переносу в газах.** Зіткнення між молекулами. Середня довжина вільного пробігу молекул, ефективний діаметр молекул. Дифузія. В'язкість. Теплопровідність.

**Основи термодинаміки.** Термодинамічна система, її параметри та стани. Робота та теплота. Перше начало термодинаміки. Робота газу при зміні об'єму. Робота газу при різних ізопроцесах. Теплоємність. Теплоємність ідеального газу при постійному об'ємі та при постійному тиску. Рівняння Майера. Адіабатичний процес. Політропний процес. Циклічні процеси. Зворотні та незворотні процеси. Тепловий двигун та його к.к.д. Цикл Карно, к.к.д. циклу Карно. Друге начало термодинаміки. Ентропія. Закон зростання ентропії. Фізичний зміст ентропії. Третє начало термодинаміки.

**Реальні гази.** Відхилення від законів ідеального газу. Взаємодія молекул. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Ізотерми Ван-дер-Ваальса. Порівняння ізотерм Ван-дер-Ваальса з ізотермами, одержаними експериментально.

**Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки**

**Варіант 0.**

1. Визначити кількість речовини  $\nu$  водню, який знаходиться в посудині об'ємом  $V=3$  л, якщо концентрація молекул газу в посудині  $n = 2 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{м}^3}$ .

2. Молярна внутрішня енергія  $U_0$  деякого двоатомного газу дорівнює 6.02 кДж. Визначити середню кінетичну енергію обертального руху однієї молекули цього газу. Газ вважати ідеальним.

3. Визначити питомі теплоємності газу, якщо його молярна маса  $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ , а відношення теплоємностей  $\frac{C_p}{C_V} = 1.67$ .

4. При ізобаричному розширенні деякої маси двоатомного газу, який знаходиться під тиском  $p = 10^5$  Па внутрішня енергія його змінилась на  $\Delta U = 490$  Дж. Знайти приріст об'єму газу.

5. Ідеальна теплова машина працює за зворотним циклом Карно. Температура нагрівника  $T_1 = 500$  К. Температура холодильника  $T_2 = 250$  К. Визначити термічний к.к.д. циклу, а також роботу  $A_1$  робочої речовини при ізотермічному розширенні, якщо при ізотермічному стиску виконана робота  $A_2 = 70$  Дж.

6. Обчислити середню довжину вільного пробігу молекули повітря при температурі  $17^\circ\text{C}$  і нормальному тиску. Ефективний діаметр молекул повітря прийняти рівним  $3 \cdot 10^{-8}$  см.

7. Дитячий гумовий м'ячик масою 0.3 кг, упав з висоти 2 м і підскочив від підлоги на висоту 1 м. Визначити зміну ентропії системи м'яч-підлога, якщо температура у кімнаті дорівнює  $21^\circ\text{C}$ .

8. Трубка має діаметр  $d_1 = 0.2$  см. На нижньому кінці трубки повисла крапля води, яка має у момент відриву форму кульки. Визначити діаметр  $d_2$  цієї кульки.

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 1.**

1. Визначити концентрацію  $n$  молекул кисню, який знаходиться в посудині об'ємом  $V=2$  л. Кількість речовини  $\nu$  кисню дорівнює  $0.2$  моль.

2. Визначити середню кінетичну енергію однієї молекули водяної пари при температурі  $500$  К.

3. Визначити молярні теплоємності газу, якщо його питомі теплоємності  $c_V = 10.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$  і  $c_p = 14.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$ .

4. До якого тиску необхідно стиснути суміш повітря з парами бензину у циліндрі двигуна, щоб суміш самоспалахнула, якщо початковий тиск  $p_0=100$  кПа, а початкова температура суміші  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Температура самоспалахування  $t_1 = 560^\circ\text{C}$ . Стискання адіабатичне, суміш вважати двоатомним ідеальним газом.

5. У скільки разів збільшиться к.к.д. циклу Карно при підвищенні температури нагрівника від  $T_1=380$  К до  $T_1'=560$  К? Температура холодильника  $T_2=280$  К.

6. Визначити, чому дорівнює діаметр пор ґрунту, якщо у них за нормальних умов існує технічний вакуум. Вважати, що діаметр молекул повітря становить  $3 \cdot 10^{-10}$  м.

7. Визначити зміну ентропії при перетворенні  $150$  г води, температура якої  $20^\circ\text{C}$ , у пару при температурі  $100^\circ\text{C}$ .

8. Визначити густину повітря всередині мильного пухиря радіусом  $5 \cdot 10^{-3}$  м, якщо атмосферний тиск  $10^5$  Па, а температура повітря  $17^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину  $40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

Варіант 2.

1. Визначити кількість речовини  $\nu$  і кількість  $N$  молекул кисню масою  $m=0.5$  кг.

2. Визначити середню квадратичну швидкість молекули газу, який знаходиться у посудині об'ємом 2 л під тиском 200 кПа. Маса газу 0.3 г.

3. В посудині об'ємом  $V=6$  л знаходиться при нормальних умовах двоатомний ідеальний газ. Визначити теплоємність цього газу при сталому об'ємі.

4. 0.035 кг азоту, який знаходиться при температурі  $t_0 = 17^\circ\text{C}$ , розширюється адіабатично, при цьому об'єм зростає у 8 разів. Знайти роботу, яку виконує азот при розширенні.

5. Теплова машина працює за зворотним циклом. Температура нагрівника  $T_1=500$  К. Обчислити термічний к.к.д. циклу і температуру  $T_2$  холодильника, якщо за рахунок 1 кДж теплоти, що отримує машина від нагрівника, вона виконує роботу  $A=350$  Дж.

6. Середня довжина вільного шляху  $\langle l \rangle$  молекули водню при деяких умовах дорівнює 2мм. Визначити густину водню при цих умовах. Ефективний діаметр молекули азоту  $3 \cdot 10^{-8}$  см.

7. Визначити зміну ентропії 10 г повітря при ізобарному розширенні від об'єму 3 л до об'єму 8 л.

8. Коефіцієнт поверхневого натягу на границі вода-масло дорівнює  $\alpha = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{М}}$ . Визначити, яку роботу треба виконати, щоб краплю масла масою  $m=1$  г роздробити всередині води на крапельки діаметром  $d_0 = 2 \cdot 10^{-4}$  см. Процес вважати ізотермічним. Для масла  $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{М}^3}$ .

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 3.**

1. У балоні об'ємом  $V=10$  л знаходиться гелій під тиском  $p_1=1$  МПа і при температурі  $T_1=300$  К. Після того як з балону було взято  $m=10$  г гелія, температура у балоні знизилась до  $T_2=290$  К. Визначити тиск  $p_2$  гелія, який залишився у балоні.

2. Водень знаходиться при температурі  $T = 300$  К. Знайти середню кінетичну енергію  $\langle \mathcal{E}_{об} \rangle$  обертального руху однієї молекули, а також сумарну кінетичну енергію всіх молекул цього газу. Кількість речовини водню  $\nu=0.5$  моль.

3. Визначити відносну молекулярну масу  $\mu_r$  і молекулярну масу  $\mu$  газу, якщо різниця його питомих теплоємностей  $c_p - c_V = 2.08 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .

4. Яка кількість теплоти поглинається при ізотермічному розширенні  $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  повітря, якщо тиск зменшується від  $p_1 = 6 \cdot 10^5$  Па до  $p_2 = 1 \cdot 10^5$  Па.

5. Ідеальна теплова машина, яка працює по циклу Карно, виконує за один цикл роботу  $1.5 \cdot 10^5$  Дж. Температура нагрівника  $T_1=400$  К, температура холодильника  $T_2=260$  К. Визначити к.к.д. машини, кількість теплоти  $Q$ , яку одержує машина за один цикл від нагрівника, і кількість теплоти, яка віддається за один цикл холодильнику.

6. Визначити коефіцієнти дифузії і внутрішнього тертя азоту, який перебуває під тиском  $10$  Па при температурі  $T=300$  К. Ефективний діаметр молекули азоту  $3 \cdot 10^{-8}$  см.

7. Визначити зміну ентропії  $10$  г повітря при ізобарному охолодженні від  $300$  К до  $250$  К.

8. У воду занурена на дуже малу глибину скляна трубка з діаметром внутрішнього каналу  $d$ . Визначити масу води, яка ввійшла в трубку. Коефіцієнт поверхневого натягу води  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 4.**

1. Визначити тиск  $p_1$  і  $p_2$  газу, у якому знаходиться  $N = 10^9$  молекул. Об'єм газу  $= 1 \text{ см}^3$ , а температура  $T_1 = 3 \text{ К}$  і  $T_2 = 1000 \text{ К}$ .

2. Знайти число молекул у  $1 \text{ м}^3$  і середню кінетичну енергію поступального руху однієї молекули газу, який знаходиться при тиску  $p = 0.2 \text{ МПа}$  і температурі  $127^\circ\text{С}$ .

3. Визначити показник адіабати ідеального газу, який при температурі  $T = 350 \text{ К}$  і тиску  $p = 0.4 \text{ МПа}$  займає об'єм  $V = 300 \text{ л}$ , теплоємність газу при постійному об'ємі  $857 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

4. Азот масою  $m = 0.1 \text{ кг}$  ізобарно нагріли від температури  $T_1 = 200 \text{ К}$  до температури  $T_2 = 400 \text{ К}$ . Визначити роботу  $A$ , яку виконує газ, одержану ним теплоту  $Q$  та зміну внутрішньої енергії азоту  $\Delta U$ .

5. Газ, який є робочим тілом у циклі Карно, одержав від нагрівника теплоту  $Q_1 = 4.38 \text{ кДж}$  і виконав роботу  $A = 2.4 \text{ кДж}$ . Визначити температуру нагрівника, якщо температура холодильника  $T_2 = 273 \text{ К}$ .

6. Водень знаходиться під тиском  $P = 20 \text{ мкПа}$  і має температуру  $T = 300 \text{ К}$ . Визначити середню довжину вільного пробігу  $\langle l \rangle$  молекули цього газу. Ефективний діаметр молекули водню  $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

7. Визначити зміну ентропії при ізотермічному розширенні  $10 \text{ г}$  кисню від об'єму  $25 \text{ л}$  до об'єму  $100 \text{ л}$ .

8. Визначити додатковий тиск всередині мильного пухиря діаметром  $d = 10 \text{ см}$ . Визначити, яку роботу треба виконати, щоб надути цей пухир. Коефіцієнт поверхневого натягу розчину мила у воді  $\sigma = 40 \cdot 10^{-3}$



Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 5.**

1. При температурі  $T=35^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p=708$  кПа густина деякого газу  $\rho=12.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Визначити відносну молекулярну масу газу.
2. Визначити, чому дорівнює кінетична енергія теплового і обертального руху всіх молекул, які знаходяться у 2 кг кисню при температурі 340 К.
3. Відносна молекулярна маса газу  $m=30$ , показник адіабати  $\gamma=1.4$ . Обчислити питомі теплоємності  $c_V$  і  $c_p$  цього газу.
4. Азот масою  $m=0.1$  кг ізобарно нагріли від температури  $T_1=200$  К до температури  $T_2=400$  К. Визначити роботу  $A$ , яку виконує газ, одержану ним теплоту  $Q$  та зміну внутрішньої енергії азоту  $\Delta U$ .
5. Газ, який є робочим тілом у циклі Карно, одержав від нагрівника теплоту  $Q_1=4.38$  кДж і виконав роботу  $A=2.4$  кДж. Визначити температуру нагрівника, якщо температура холодильника  $T_2=273$  К.
6. Водень знаходиться під тиском  $P=20$  мкПа і має температуру  $T=300$  К. Визначити середню довжину вільного пробігу  $\langle l \rangle$  молекули цього газу. Ефективний діаметр молекули водню  $2,3 \cdot 10^{-8}$  см.
7. Визначити зміну ентропії при ізотермічному розширенні 10 г кисню від об'єму 25 л до об'єму 100 л.
8. Визначити додатковий тиск всередині мильного пухиря діаметром  $d=10$  см. Визначити, яку роботу треба виконати, щоб надути цей пухир. Коефіцієнт поверхневого натягу розчину мила у воді  $\sigma = 40 \cdot 10^{-3}$

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 6.**

1. У балоні об'ємом  $V=3$  л знаходиться кисень масою  $m=10$  г. Визначити концентрацію молекул кисню у балоні.

2. Визначити, при якій температурі середня кінетична енергія  $\langle \mathcal{E}_{\text{п}} \rangle$  поступального руху молекули газу дорівнює  $4.14 \cdot 10^{-21}$  Дж.

3. Обчислити питомі теплоємності при сталому об'ємі  $C_V$  і при сталому тиску  $C_p$  неона і водню приймаючи ці гази за ідеальні.

4. Водень займає об'єм  $V_1=10$  м при тиску  $p_1=0.1$  МПа. Газ нагріли при сталому об'ємі до тиску  $p_2=0.3$  МПа. Визначити зміну внутрішньої енергії газу  $\Delta U$ , роботу  $A$ , яку виконує газ, і теплоту  $Q$ , яка надається газу.

5. Визначити роботу  $A_2$  ізотермічного стиску газу, який виконує цикл Карно. К.к.д. циклу  $\eta=0.4$ . Робота ізотермічного розширення дорівнює  $A=8$  Дж.

6. Визначити середню довжину вільного пробігу  $\langle l \rangle$  молекули азоту в посудині об'ємом  $V=5$  л. Маса газу  $m=0.5$  г. Ефективний діаметр молекули азоту  $3 \cdot 10^{-8}$  см.

7. Визначити зміну ентропії при охолодженні 5 г кисню від  $50^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$ , якщо процес відбувався при сталому об'ємі.

8. Скляна капілярна трубка з внутрішнім діаметром  $d = 2 \cdot 10^{-4}$  м і довжиною  $= 2 \cdot 10^{-1}$  м занурюється відкритим кінцем вертикально у воду. Верхній кінець трубки запаяний. Визначити, якої довжини  $x$  відрізок трубки мусить бути під водою, щоб рівні води у капілярі та зовні були однакові. Зовнішній тиск повітря  $P_0 = 1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$ . Для води  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{М}}$ . Крайовий кут  $\theta = 0^\circ$ .

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

Варіант 7.

1. У посудині об'ємом 50 л знаходиться азот при температурі  $17^{\circ}\text{C}$ . Частину газу випустили з посудини, при цьому тиск зменшився на 80 кПа. Визначити масу газу, який вийшов з балону. Температуру вважати незмінною.

2. Визначити середню кінетичну енергію  $\langle \mathcal{E}_{\text{об}} \rangle$  обертального руху однієї молекули кисню при температурі  $T=350\text{ К}$ , а також кінетичну енергію обертального руху всіх молекул кисню масою  $m=4\text{ г}$ .

3. Одноатомний газ при нормальних умовах займає об'єм  $V=5\text{ л}$ . Визначити теплоємність цього газу при сталому об'ємі.

4. Кисень масою  $m=200\text{ г}$  займає об'єм  $V_1=100\text{ л}$  і знаходиться під тиском  $p_1=200\text{ кПа}$ . При нагріванні газ розширився при сталому тиску до об'єму  $V_2=300\text{ л}$ , а далі його тиск зріс до  $p_2=500\text{ кПа}$  при незмінному об'ємі. Визначити зміну внутрішньої енергії  $\Delta U$  газу, виконану ним роботу і теплоту  $Q$ , яка передана газу. Побудувати графік процесу.

5. Газ, який виконує цикл Карно, віддав холодильнику теплоту  $Q_2=14\text{ кДж}$ . Визначити температуру  $T_1$  нагрівника, якщо при температурі холодильника  $T_2=280\text{ К}$  робота циклу  $A=6\text{ кДж}$ .

6. Визначити середнє число  $\langle Z \rangle$  зіткнень за час  $t=1\text{ с}$  і довжину вільного пробігу  $\langle l \rangle$  молекул гелію, якщо газ знаходиться під тиском  $P=2\text{ кПа}$  при температурі  $T=200\text{ К}$ . Ефективний діаметр атома гелію  $1,9 \cdot 10^{-8}\text{ см}$ .

7. Визначити зміну ентропії при охолодженні 5 г кисню від  $50^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , якщо процес відбувався при сталому тиску.

8. Крапля води масою  $m = 10^{-4}\text{ кг}$  введена між двома плоскими і паралельними між собою скляними пластинками. Визначити, чому дорівнює сила притягання  $F$  між пластинками, якщо відстань між ними дорівнює  $d = 10^{-6}\text{ м}$ . Коефіцієнт поверхневого натягу води  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . Вважати, що краєвий кут  $\theta$  дорівнює нулю.

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 8.**

1. У балоні знаходиться 16 мг кисню. Через отвір кожну секунду витікає 1 млрд. молекул. Визначити, за який час газ витече з балона.

2. Визначити повну кінетичну енергію, а також кінетичну енергію обертального руху однієї молекули аміаку  $NH_3$  при температурі  $t = 27^\circ C$ .

3. Триатомний газ під тиском  $p=240$  кПа і температурі  $T=20^\circ C$  займає об'єм  $V=10$  л. Визначити теплоємність  $c_p$  цього газу при сталому тиску.

4. Об'єм водню при ізотермічному розширенні збільшився у 3 рази. Визначити роботу  $A$ , яку виконав газ і теплоту  $Q$  одержану ним при цьому. Маса водню дорівнює 200 г, його температура 300 К.

5. У циклі Карно газ одержав від нагрівника теплоту  $Q=500$  Дж і виконав роботу  $A=100$  Дж. Температура нагрівника  $T_1=400$  К. Визначити температуру  $T_2$  холодильника.

6. В'язкість водню за нормальних умов  $8.6 \cdot 10^{-5}$  пуаз. Обчислити середню довжину вільного пробігу його молекул та їх ефективний діаметр.

7. Визначити зміну ентропії при нагріванні 100 г води від  $0^\circ C$  до  $100^\circ C$  і наступному перетворенню води у пару тієї ж температури.

8. Маса 100г крапель спирту, який витікає з капіляру  $m=0.71$  г. Визначити коефіцієнт поверхневого натягу спирту, якщо діаметр шийки краплі у момент відриву  $d=1$  мм.

Державний економіко - технологічний  
університет транспорту  
Кафедра фізики і електротехніки  
Контрольна робота з молекулярної фізики  
та термодинаміки

**Варіант 9.**

1. Сучасні прилади допускають розрідження газу до  $p = 1.33$  нПа. Визначити, скільки молекул знаходиться у  $1 \text{ см}^3$  такого газу при  $17^\circ\text{C}$ .

2. Визначити сумарну кінетичну енергію поступального руху всіх молекул газу, який знаходиться у посудині об'ємом  $V = 3$  л під тиском  $p = 540$  кПа.

3. Визначити питомі  $c_V$  і  $c_p$  та молярні  $C_V$  і  $C_p$  теплоємності азоту і гелію, приймаючи ці гази за ідеальні.

4. Водень масою  $m = 40$  г, який має температуру  $T_1 = 300$  К, адіабатично розширився, збільшивши об'єм у 3 рази. Потім при ізотермічному стиску об'єм газу зменшився у 2 рази. Визначити повну роботу  $A$ , яку виконує газ і кінцеву температуру  $T_2$  газу.

5. Газ, який виконує цикл Карно, віддав холодильнику 67% теплоти, яку одержав від нагрівника. Визначити температуру  $T_2$  холодильника, якщо температура нагрівника  $T_1 = 430$  К.

6. Визначити середнє число всіх зіткнень між молекулами, які відбуваються протягом  $1$  с у  $1 \text{ см}^3$  кисню при температурі  $17^\circ\text{C}$  і тиску  $5$  мм.рт.ст. Ефективний діаметр молекули кисню  $2.9 \cdot 10^{-8}$  см.

7. Визначити зміну ентропії  $0.056$  кг азоту, якщо він у початковому стані займав об'єм  $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  і мав температуру  $60^\circ\text{C}$ , а у кінцевому стані при температурі  $450^\circ\text{C}$  його об'єм дорівнює  $75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

8. Визначити зміну вільної енергії  $\Delta E$  поверхні мильної бульбашки при ізотермічному збільшенні його об'єму від  $V_1 = 10 \text{ см}^3$  до  $V_2 = 2V_1$ .

### 3. Основні формули і співвідношення з молекулярної фізики і термодинаміки

Кількість однорідної речовини (в молях)

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \quad \text{або} \quad \nu = \frac{m}{M}, \quad (3.1)$$

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

Якщо система являє собою суміш кількох газів, то кількість речовини системи

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A} \quad (3.2)$$

або

$$\nu = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n}, \quad (3.3)$$

де  $\nu_i$ ,  $N_i$ ,  $m_i$ ,  $M_i$  — відповідно кількість речовини, число молекул, маса та молярна маса  $i$ -ї компоненти суміші.

Концентрація  $n$  молекул

$$n = \frac{N}{V}, \quad (3.4)$$

де  $N$  — кількість молекул;  $V$  — об'єм, який займає газ.

Рівняння Менделєєва-Клапейрона (рівняння стану ідеального газу):

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT, \quad (3.5)$$

де  $p$  — тиск газу;  $V$  — об'єм газу;  $m$  — маса газу;  $M$  — молярна маса газу;  $R$  — молярна газова стала;  $T$  — термодинамічна температура;  $\nu$  — кількість речовини.

Тиск ідеального газу:

$$p = nkT, \quad (3.6)$$

де  $n$  — концентрація молекул;  $k = \frac{R}{N_A}$  — стала Больцмана;  $T$  — термодинамічна температура.

Закон Бойля-Маріотта для ізотермічного процесу (при  $m = \text{const}$  і  $T = \text{const}$ ):

$$pV = \text{const}, \quad (3.7)$$

або для двох станів газу

$$p_1V_1 = p_2V_2. \quad (3.8)$$

Закон Гей-Люссака для *ізобарного* процесу (при  $m = const$  і  $p = const$ ):

$$\frac{V}{T} = const, \quad (3.9)$$

або для двох станів газу

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}. \quad (3.10)$$

Закон Шарля для *ізохорного* процесу (при  $m = const$  і  $V = const$ ):

$$\frac{p}{T} = const \quad (3.11)$$

або для двох станів газу

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (3.12)$$

/vsp Закон Дальтона, що визначає тиск  $p$  суміші газів:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n, \quad (3.13)$$

де  $p_i$  — парціальний тиск компонентів суміші. Парціальним тиском називається тиск газу, який створював би цей газ, якби тільки він знаходився в посудині, зайнятій сумішшю.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів

$$p = \frac{2}{3} \langle \varepsilon_{\Pi} \rangle, \quad (3.14)$$

де  $\langle \varepsilon_{\Pi} \rangle$  — середня кінетична енергія поступального руху молекул газу:

$$\langle \varepsilon_{\Pi} \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad (3.15)$$

де  $k$  — стала Больцмана;  $T$  — термодинамічна температура.

Середнє значення повної кінетичної енергії (поступального і обертального руху) молекул газу

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad (3.16)$$

де  $i$  — кількість ступенів свободи молекул. Для одноатомних молекул  $i = 3$ , для двоатомних  $i = 5$ , для трьох- і багатоатомних молекул газів  $i = 6$ .

Швидкості молекул газу:

— середня квадратична (теплова)

$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (3.17)$$

— середня арифметична

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (3.18)$$

— найбільш імовірна

$$v_{\text{ім}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}, \quad (3.19)$$

де  $m_0$  — маса однієї молекули.

Середня кількість зіткнень  $\langle z \rangle$ , які здійснює одна молекула газу за одну секунду

$$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle, \quad (3.20)$$

де  $\langle v \rangle$  — середня арифметична швидкість молекул;  $n$  — концентрація молекул газу;  $d$  — ефективний діаметр молекул.

Кількість зіткнень між усіма молекулами газу за одну секунду

$$z = \frac{1}{2} \langle z \rangle N, \quad (3.21)$$

де  $N$  — кількість молекул.

Середня довжина вільного пробігу молекул  $\langle l \rangle$

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}. \quad (3.22)$$

Коефіцієнт дифузії в газі

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle. \quad (3.23)$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості газу

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (3.24)$$

де  $\rho$  — густина газу.

Коефіцієнт теплопровідності газу

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (3.25)$$

де  $c_v$  — питома теплоємність газу при постійному об'ємі.

Зв'язок між кінетичними коефіцієнтами:

$$\eta = \rho D, \quad \lambda = \eta c_v, \quad (3.26)$$



Внутрішня енергія ідеального газу

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT, \quad \text{або} \quad U = \frac{i}{2} pV, \quad (3.27)$$

де  $i$  — кількість ступенів свободи молекул газу.

Перший закон термодинаміки

$$Q = \Delta U + A, \quad (3.28)$$

де  $Q$  — кількість теплоти, надана термодинамічній системі (газу),  $\Delta U$  — зміна внутрішньої енергії системи;  $A$  — робота, виконана системою над зовнішнім середовищем (проти зовнішніх сил).

Молярна теплоємність ідеального газу при постійному об'ємі

$$C_v = \frac{i}{2} R. \quad (3.29)$$

Молярна теплоємність ідеального газу при постійному тиску

$$C_p = \frac{i + 2}{2} R. \quad (3.30)$$

Рівняння Майєра

$$C_p = C_v + R. \quad (3.31)$$

Зв'язок між молярними ( $C_v$  та  $C_p$ ) і питомими ( $c_v$  та  $c_p$ ) теплоємностями газу

$$c_p = \frac{C_p}{M} \quad c_v = \frac{C_v}{M}, \quad (3.32)$$

де  $M$  — молярна маса газу.

Робота газу при зміні об'єму від  $V_1$  до  $V_2$  в загальному випадку

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (3.33)$$

при ізобарному процесі

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (3.34)$$

при ізотермічному процесі

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (3.35)$$

при адіабатному процесі

$$A = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_1 - T_2) = \frac{m}{M} C_v(T_1 - T_2), \quad (3.36)$$

або

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right], \quad (3.37)$$

де  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  — показник адіабати,  $T_1$  та  $T_2$  — початкова і кінцева температури газу.

Рівняння адіабатного процесу в ідеальному газі (рівняння Пуассона):

залежність між тиском та об'ємом

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad \text{або} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma, \quad (3.38)$$

залежність між температурою та об'ємом

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad \text{або} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}, \quad (3.39)$$

залежність між температурою та тиском

$$T^\gamma p^{(1-\gamma)} = \text{const}, \quad \text{або} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (3.40)$$

Термічний коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) для циклічного (кругового) процесу

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (3.41)$$

де  $A = Q_1 - Q_2$  — робота, яка виконується термодинамічною системою за цикл;  $Q_1$  — кількість теплоти, одержана системою від нагрівника;  $Q_2$  — кількість теплоти, передана системою холодильнику.

Термічний к.к.д. циклу Карно

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (3.42)$$

де  $T_1$  та  $T_2$  — температури нагрівника і холодильника, відповідно.

Зміна ентропії ідеального газу

$$\Delta S = \frac{m}{M} \left( C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right), \quad (3.43)$$

де  $T_1$  та  $V_1$  — початкові значення температури та об'єму газу,  $T_2$  та  $V_2$  — їхні кінцеві значення.

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad \text{або} \quad \sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}, \quad (3.44)$$

де  $F$  — сила поверхневого натягу, що діє на контур довжиною  $l$ , що обмежує поверхню рідини;  $\Delta E$  — зміна вільної енергії поверхневої плівки рідини, пов'язана зі зміною  $\Delta S$  площі поверхні цієї плівки.

Формула Лапласа, яка визначає додатковий тиск, що створюється сферичною поверхнею рідини

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}, \quad (3.45)$$

де  $R$  — радіус кривизни поверхні.

Формула Лапласа, яка визначає додатковий тиск, що створюється циліндричною поверхнею рідини

$$\Delta p = \frac{\sigma}{R}. \quad (3.46)$$

Висота підйому рідини в капілярній трубці

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R}, \quad (3.47)$$

де  $\theta$  — крайовий кут ( $\theta = 0$  при повному змочуванні стінок трубки рідиною,  $\theta = \pi$  при повному незмочуванні).

Висота підйому рідини між двома близькими і паралельними одна до одної площинами

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g d}, \quad (3.48)$$

де  $d$  — відстань між площинами.

## 4. Приклади розв'язування задач з молекулярної фізики і термодинаміки

**Приклад №1.** Визначити кінетичні енергії поступального та обертального рухів усіх молекул, які містяться у 2 кг водню при температурі 127°C.

Молекула водню — двохатомна, зв'язок між атомами в молекулі будемо вважати жорстким. Кількість ступенів свободи, пов'язаних з поступальним рухом, становить  $i_{\text{п}} = 3$ , кількість ступенів свободи, пов'язаних з обертальним рухом двохатомної молекули, становить  $i_{\text{об}} = 2$ . В середньому на один ступінь свободи припадає енергія  $\frac{1}{2}kT$ , де  $k$  — постійна Больцмана. Тому середні кінетичні

енергії поступального та обертального руху однієї молекули

$$\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle = \frac{3}{2}kT; \quad \langle \varepsilon_{\text{об}} \rangle = \frac{2}{2}kT.$$

Число молекул в газі

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

$m = 2 \text{ кг}$		$T = 400 \text{ К}$
$M = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$		
$t = 127^\circ\text{C}$	$W_{\text{п}} = ?$	
	$W_{\text{об}} = ?$	

Тоді кінетична енергія поступального руху всіх молекул водню

$$W_{\text{п}} = \langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle N = \frac{3}{2}kT \frac{m}{M} N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

де  $R = kN_A$  — молярна газова стала.

Кінетична енергія обертального руху всіх молекул водню

$$W_{\text{об}} = \langle \varepsilon_{\text{об}} \rangle N = \frac{2}{2}kT \frac{m}{M} N_A = \frac{m}{M} RT.$$

Перевіряємо одиниці вимірювання шуканої величини:

$$[W_{\text{п}}] = \frac{[m]}{[M]} \cdot [R] \cdot [T] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right] = [\text{Дж}].$$

Підставляючи у формулу чисельні значення заданих величин і виконуючи обчислення, знаходимо:

$$W_{\text{п}} = \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 400 \text{ Дж} = 4,99 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

$$W_{\text{об}} = \frac{2}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 400 \text{ Дж} = 3,32 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

**Відповідь:** Кінетична енергія поступального руху всіх молекул водню  $W_{\text{п}} = 4,99 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ , кінетична енергія обертального руху всіх молекул  $W_{\text{об}} = 3,32 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

**Приклад №2.** Визначити середню довжину вільного пробігу молекул кисню

та число зіткнень за 1 с, які відбуваються між всіма молекулами кисню в посудині об'ємом 2 л при температурі  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p = 200\text{ кПа}$ . Ефективний діаметр молекул кисню  $d = 2,7 \cdot 10^{-10}\text{ м}$ .

$V = 2 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$ $T = 300\text{ К}$ $p = 2 \cdot 10^5\text{ Па}$ $d = 2,7 \cdot 10^{-10}\text{ м}$ $M = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	<p>Середня довжина вільного пробігу молекул <math>\langle l \rangle</math> визначається за формулою</p> $\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$ <p>де <math>n</math> — концентрація молекул газу, яку можна визначити з рівняння <math>p = nkT</math>:</p>
$\langle l \rangle = ?$ $Z = ?$	$n = \frac{p}{kT},$

де  $k$  — постійна Больцмана. Тоді

$$(1) \quad \langle l \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}.$$

Підставляючи у формулу (1) чисельні значення заданих величин і виконуючи обчислення, знаходимо:

$$\langle l \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (2,7 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 2 \cdot 10^5}\text{ м} = 6,4 \cdot 10^{-8}\text{ м}.$$

Кількість зіткнень між усіма молекулами газу за одну секунду

$$(2) \quad z = \frac{1}{2} \langle z \rangle N,$$

де  $N$  — кількість молекул газу;  $\langle z \rangle$  — середня кількість зіткнень, які здійснює одна молекула за одну секунду. Кількість молекул у посудині

$$(3) \quad N = nV = \frac{pV}{kT}.$$

Середня кількість зіткнень однієї молекули за одну секунду

$$(4) \quad \langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle},$$

де  $\langle v \rangle$  — середня арифметична швидкість молекул:

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

(5)

Підставляючи у формулу (2) вирази (3), (4) та (5), можна одержати робочу формулу для обчислення  $z$ , але така формула буде досить громіздкою. Тому спочатку обчислимо  $\langle v \rangle$  за формулою (5):

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 300}{3,14 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 4,46 \cdot 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Підставляючи у формулу (2) вирази (3) та (4), одержуємо

$$(6) \quad z = \frac{1}{2} \cdot \frac{\langle v \rangle pV}{\langle l \rangle kT}.$$

Перевіримо, чи дає одержана робоча формула одиницю вимірювання кількості зіткнень за одну секунду. Для цього замість символів фізичних величин підставляємо у формулу одиниці їх вимірювань:

$$[z] = \frac{[v][p][V]}{[l][k][T]} = \frac{\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{м} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \text{К}} = \frac{\frac{\text{м}^4}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}}{\text{м} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Одержана одиниця вимірювання є одиницею кількості зіткнень за одиницю часу.

Підставляємо до формули (6) чисельні значення фізичних величин і, виконуючи обчислення, знаходимо:

$$z = \frac{1}{2} \cdot \frac{4,46 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{6,4 \cdot 10^{-8} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \frac{1}{\text{с}} = 3,4 \cdot 10^{32} \frac{1}{\text{с}}.$$

*Відповідь:*  $\langle l \rangle = 6,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}; z = 3,4 \cdot 10^{32} \frac{1}{\text{с}}.$

**Приклад №3.** Кисень масою 16 г нагрівають при постійному тиску від 320 К до 340 К. Визначити зміну внутрішньої енергії газу, виконану газом роботу і кількість теплоти, яку одержав газ.

Будемо вважати кисень ідеальним газом. Внутрішня енергія ідеального газу

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R,$$

де  $i$  — кількість ступенів свободи молекул газу. Тоді зміна внутрішньої енергії при зміні температури від  $T_1$  до  $T_2$

$$(1) \quad \Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Кисень  $O_2$  — двоатомний газ, для двоатомних газів  $i = 5$  (якщо враховувати ступені свободи, пов'язані лише з поступальним та обертальним рухом).

$$m = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

$$T_1 = 320 \text{ К}$$

$$T_2 = 340 \text{ К}$$

$$M = 3,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

В ізобарному процесі при зміні об'єму газу від  $V_1$  до  $V_2$  газ виконує роботу

$$(2) \quad A = p(V_2 - V_1).$$

$\Delta U$  ?  
Зміну об'єму газу можна визначити, використавши рівняння Менделєєва-Клапейрона. Для двох вказаних станів газу можна записати:  
 $Q = ?$

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1.$$

$$pV_2 = \frac{m}{M} RT_2.$$

Одержуємо

$$V_1 = \frac{m}{pM} RT_1.$$

$$V_2 = \frac{m}{pM} RT_2.$$

Підставляючи вирази для  $V_1$  та  $V_2$  в рівняння (2), знаходимо:

$$(3) \quad A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Для знаходження кількості теплоти, яку одержав газ, можна скористатися першим законом термодинаміки

$$(4) \quad Q = \Delta U + A.$$

Підставляємо до формул (1), (3) та (4) чисельні значення фізичних величин і виконуючи обчислення, знаходимо:

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot 8,31 \cdot (340 - 320) \text{ Дж} = 208 \text{ Дж}.$$

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot 8,31 \cdot (340 - 320) \text{ Дж} = 83,1 \text{ Дж}.$$

$$Q = 208 + 83,1 = 291 \text{ Дж}.$$

Відповідь:  $\Delta U = 208 \text{ Дж}$ ;  $A = 83,1 \text{ Дж}$ ;  $Q = 291 \text{ Дж}$ .

**Приклад №4.** Об'єм аргону, який перебував під тиском 800 кПа, збільшився від 1 л до 2 л. Визначити зміну внутрішньої енергії газу, якщо розширення відбувалося: а) ізобарно; б) адіабатно.

$\begin{aligned} V_1 &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ V_2 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ p_1 &= 8 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ M &= 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \\ \hline \Delta U &= ? \end{aligned}$	<p>Будемо вважати аргон ідеальним газом. Внутрішня енергія ідеального газу може бути обчислена за формулою</p> $U = \frac{i}{2} pV,$
--	--

де  $i$  — кількість ступенів свободи молекул газу. Аргон — одноатомний газ, для одноатомного газу  $i = 3$ .

Зміна внутрішньої енергії при зміні об'єму в ізобарному процесі ( $p = \text{const}$ )

$$(1) \quad U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} p(V_2 - V_1).$$

В адіабатному процесі теплообміну із зовнішнім середовищем не відбувається, тобто  $Q = 0$ . Тому рівняння першого закону термодинаміки  $Q = \Delta U + A$  для адіабатного процесу набуває вигляду

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

звідки

$$\Delta U = -A.$$

Робота газу при зміні об'єму від  $V_1$  до  $V_2$  в адіабатному процесі

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$



де  $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$  — показник адіабати. Для аргону маємо  $\gamma = \frac{3+2}{3} = 1,67$ .

Оскільки згідно рівняння Менделєєва-Клапейрона  $\frac{m}{M}RT_1 = pV_1$ , то

$$(2) \quad \Delta U = -A = \frac{pV_1}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right].$$

Підставляючи чисельні значення у формули (1) та (2), одержуємо:

а) при ізобарному розширенні

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot (2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \text{ Дж} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

б) при адіабатному розширенні

$$\Delta U = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{1,67 - 1} \left[ \left( \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,67-1} - 1 \right] \text{ Дж} = -4,44 \cdot 10^2 \text{ Дж}.$$

Відповідь: а)  $\Delta U = 1,2 \cdot 10^3$  Дж; б)  $\Delta U = -4,44 \cdot 10^2$  Дж.

**Приклад №5.** Ідеальна теплова машина, яка працює за циклом Карно, виконує за один цикл роботу  $A = 73,5$  кДж. Температура нагрівника  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ , температура холодильника  $t_2 = 0^\circ\text{C}$ . Визначити термічний коефіцієнт корисної дії  $\eta$  машини, кількість теплоти  $Q_1$ , що отримується за один цикл від нагрівника, і кількість теплоти  $Q_2$ , що віддається за один цикл холодильнику.

$A = 7,35 \cdot 10^4$ Дж
$T_1 = 373$ К
$T_2 = 273$ К
$\eta = ?$
$Q_1 = ?$
$Q_2 = ?$

Термічний к.к.д. теплового двигуна, який працює за циклом Карно

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

де  $T_1$  та  $T_2$  — температури нагрівника і холодильника, відповідно.

Підставляючи чисельні значення, одержуємо:

$$\eta = \frac{373 - 273}{373} = 0,268.$$

За означенням, термічний к.к.д. для циклічного (кругового) процесу

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

Тому

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

Підставляючи чисельні значення, одержуємо:

$$Q_1 = \frac{7,35 \cdot 10^4}{0,268} \text{ Дж} = 2,74 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Робота, яка виконується термодинамічною системою за цикл  $A = Q_1 - Q_2$ .  
Тому

$$Q_2 = Q_1 - A.$$

Підставляючи чисельні значення, одержуємо:

$$Q_2 = 2,74 \cdot 10^5 \text{ Дж} - 7,35 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 2,01 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Відповідь:  $\eta = 0,268$ ;  $Q_1 = 2,74 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ ;  $Q_2 = 2,01 \cdot 10^5 \text{ Дж}$ .

**Приклад №6.** Визначити коефіцієнти дифузії та динамічної в'язкості азоту, який перебуває при температурі  $T = 300 \text{ К}$  і тиску  $p = 10^5 \text{ Па}$ .

$T = 300 \text{ К}$ $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ $\frac{M}{M} = 2,8 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	Коефіцієнт дифузії в газі визначається за формулою
$D = ?$ де $\langle v \rangle = ?$ — середня арифметична швидкість молекул	$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle,$

$$(2) \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}};$$

$\langle l \rangle$  — середня довжина вільного пробігу молекул

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

$n$  — концентрація молекул газу, яку можна визначити з рівняння  $p = nkT$ :

$$n = \frac{p}{kT},$$

де  $k$  — постійна Больцмана. Тоді

$$(3) \quad \langle l \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}.$$

Підставляючи вирази (2) та (3) в рівняння (1), одержуємо:

$$(4) \quad D = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \cdot \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} = \frac{2kT}{3\pi d^2 p} \cdot \sqrt{\frac{RT}{\pi M}}.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості газу може бути виражений через коефіцієнт дифузії:

$$\eta = D\rho,$$

де  $\rho$  — густина газу, яка може бути знайдена з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

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

Тоді

$$(5) \quad \eta = D \cdot \frac{pM}{RT}.$$

Перевіримо, чи дають одержані робочі формули (4) та (5) одиниці вимірювання шуканих величин. Для цього замість символів фізичних величин підставляємо у формули одиниці їх вимірювань:

$$\begin{aligned} [D] &= \frac{[k] \cdot [T]}{[d^2] \cdot [p]} \cdot \sqrt{\frac{[R] \cdot [T]}{[M]}} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \text{К}}{\text{м}^2 \cdot \text{Па}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}}} = \\ &= \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} \cdot \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}}{\text{кг}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \text{м} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Одержали одиницю вимірювання коефіцієнту дифузії.

$$\begin{aligned}
 [\eta] &= [D] \cdot \frac{[p] \cdot [M]}{[R] \cdot [T]} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Па} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \\
 &= \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot \frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.
 \end{aligned}$$

Одержали одиницю вимірювання коефіцієнту динамічної в'язкості.

Підставляючи числові значення в рівняння (4) та (5), одержуємо:

$$D = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{3 \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 1 \cdot 10^5} \cdot \sqrt{\frac{8,31 \cdot 300}{3,14 \cdot 2,8 \cdot 10^{-2}}} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 1,64 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

$$\eta = 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 2,8 \cdot 10^{-2}}{8,31 \cdot 300} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 1,84 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

Відповідь:  $D = 1,64 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ .

**Приклад №7.** Визначити зміну ентропії при ізотермічному розширенні аргону масою 10 г від тиску  $p_1 = 5 \cdot 10^5$  Па до тиску  $p_2 = 1 \cdot 10^5$  Па.

$$\begin{array}{l}
 m = 1 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \\
 p_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па} \\
 p_2 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} \\
 M = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \\
 \Delta S = ?
 \end{array}$$

Будемо вважати аргон ідеальним газом. Зміна ентропії ідеального газу визначається формулою

$$\Delta S = \frac{m}{M} (C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}),$$

де  $T_1$  та  $V_1$  — початкові значення температури та об'єму газу,  $T_2$  та  $V_2$  — їхні кінцеві значення.

При ізотермічному процесі  $T_1 = T_2$ , тому

$$(2) \quad \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln 1 = 0.$$

Початковий та кінцевий об'єми газу в умові не задані, але їх відношення можна знайти з рівняння закону Бойля-Маріотта для ізотермічного процесу:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

звідки

$$(3) \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

Підставляючи рівняння (2) та (3) в рівняння (1), одержуємо:

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Підставляючи чисельні значення, знаходимо:

$$\Delta S = \frac{1 \cdot 10^{-2}}{4,0 \cdot 10^{-2}} \cdot 8,31 \cdot \ln \frac{5 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 3,34 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

*Відповідь:* Зміна ентропії  $\Delta S = 3,34 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

**Приклад №8.** Визначити зміну ентропії при нагріванні води масою 2 г від температури  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  до температури  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  і наступному перетворенні води в пару тієї ж температури.

$m = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$	
$T_1 = 283 \text{ К}$	
$T_2 = 373 \text{ К}$	
$c = 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
$\lambda = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	
$\eta = ?$	
$\Delta S = ?$	

Визначимо окремо зміну ентропії  $\Delta S'$  при нагріванні води та зміну ентропії  $\Delta S''$  при перетворенні її в пару. Повна зміна ентропії визначиться сумою  $\Delta S' + \Delta S'' = \Delta S$ .

Зміна ентропії при переході зі стану 1 у стан 2 може бути знайдена за загальною формулою

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}.$$

При нескінченно малій зміні температури  $dT$  тіла йому надається кількість теплоти  $\delta Q = mcdT$ , де  $m$  — маса тіла,  $c$  — питома теплоємність тіла. Тоді зміна ентропії при нагріванні води

$$\Delta S' = \int_1^2 \frac{mcdT}{T} = mc \int_1^2 \frac{dT}{T} = mc \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right).$$

Перетворення води в пару відбувається при постійній температурі  $T_2$ . Тому

$$\Delta S'' = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_2} = \frac{1}{T_2} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q}{T_2},$$

де  $Q = \lambda m$  — кількість теплоти, передана воді при її перетворенні у пару,  $\lambda$  — питома теплота пароутворення. Одержуємо

$$\Delta S''' = \frac{\lambda m}{T_2}.$$

Повна зміна ентропії

$$\Delta S = mc \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{\lambda m}{T_2} = m\left(c \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{\lambda}{T_2}\right).$$

Підставляємо до формули чисельні значення фізичних величин і, виконуючи обчислення, знаходимо:

$$\Delta S = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (4,19 \cdot 10^3 \cdot \ln\left(\frac{373}{283}\right) + \frac{2,26 \cdot 10^6}{373}) \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 14,4 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

*Відповідь:* Зміна ентропії  $\Delta S = 14,4 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

**Приклад №9.** Визначити додатковий тиск  $\Delta p$  всередині мильної бульбашки діаметром  $d = 5$  см і роботу  $A$ , яку треба виконати, щоб видути цю бульбашку. Коефіцієнт поверхневого натягу мильної води  $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

$d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	
$\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	
$\Delta p = ?$	
$A = ?$	

Плівка мильної бульбашки має дві сферичні поверхні — зовнішню та внутрішню. Обидві поверхні здійснюють тиск на повітря, яке знаходиться всередині бульбашки. Оскільки товщина мильної плівки дуже мала, то діаметри обох поверхонь практично однакові. Оскільки додатковий тиск, що створюється сферичною по-

верхнею рідини, дорівнює

$$\Delta p_1 = \frac{2\sigma}{R},$$

то дві поверхні плівки створюють додатковий тиск

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R},$$

де  $R$  — радіус кривизни поверхонь бульбашки. Оскільки  $R = \frac{d}{2}$ , то

$$\Delta p = \frac{8\sigma}{d}.$$

Робота, яку треба виконати, щоб, розтягуючи плівку, збільшити площу її поверхні на  $\Delta S$ , дорівнює зміні вільної енергії поверхні плівки і визначається за формулою

$$A = \sigma \Delta S = \sigma(S - S_0).$$

В даному випадку  $S$  — спільна площа обох сферичних поверхонь мильної бульбашки;  $S_0$  — початкова площа поверхонь мильної плівки, з якої видули бульбашку. Оскільки  $S_0 \approx 0$ , то

$$A = \sigma S.$$

Площа поверхні кулі  $4\pi R^2$ , площа обох поверхонь

$$S = 2 \cdot 4\pi R^2 = 2\pi d^2.$$

Тоді

$$A = 2\pi d^2 \sigma.$$

Підставляючи числові значення в рівняння, одержуємо:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-2}} \text{ Па} = 6,4 \text{ Па}.$$

$$A = 2 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

Відповідь:  $\Delta p = 6,4 \text{ Па}$ ;  $A = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ .

## 5. Рекомендована література

1. Молекулярна фізика та термодинаміка (Теоретичний Курс), *М.М.Чепілко*, 2016, К: ДЕТУТ
2. Курс фізики, *Т.И.Трофимова*, 2000, М: Высшая школа
3. Курс фізики, *І.Є. Лопатинський, та інші*. 2002, Львів, Афіша
4. Сборник задач по курсу фізики, *Т.И.Трофимова* 1991, М: Высшая школа



Навчальне видання

*доцент Поліщук С.І.*

**Завдання та методичні вказівки до самостійної роботи  
з молекулярної фізики та термодинаміки**

**Для студентів технічних спеціальностей**

**Відповідальний за випуск: М.М. Чепілко**

---

Підписано до друку . Формат паперу 60x84/16. Обсяг: обл.-вид.арк.  
Папір для тиражувальних апаратів. Друк - різнографія. Замовлення . Тираж прим.

---

Надруковано у друкарні видавництва  
Державного економіко - технологічного університету транспорту,  
03049, м. Київ - 49, вул. Миколи Лукашевича, 19