

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет

Укладачі: Гур'євська О.М., Ковальов С.Г.

Збірник задач з фізики. Частина 2.

Геометрична оптика і фотометрія. Хвильова та квантова оптика.  
Фізика атома та атомного ядра. Молекулярна фізика та  
термодинаміка.

Навчальний посібник

Кропивницький 2026

**УДК 53 (075.8)**

**ББК 22.2я73**

Затверджено Вченою радою ЦНТУ (протокол № 10 від 25 травня 2026 р.), як навчальний посібник для студентів інженерних спеціальностей.

Укладачі:

**Гур'євська О.М.**, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики

**Ковальов С.Г.**, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики

Гур'євська, О. М., Ковальов, С. Г. (2026). *Збірник задач з фізики. Частина 2. Геометрична оптика і фотометрія. Хвильова та квантова оптика. Фізика атома та атомного ядра. Молекулярна фізика та термодинаміка: навчальний посібник [Електронне видання]*. Кропивницький: Центральноукраїнський національний технічний університет. – 86 с.

Даний навчальний посібник містить збірник задач з фізики, що охоплює розділи геометричної оптики і фотометрії, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра, молекулярної фізики та термодинаміки. Його мета – допомогти студентам у засвоєнні основних фізичних понять і законів, а також у розвитку навичок розв'язання типових задач. Посібник рекомендований для студентів вищих навчальних закладів, що вивчають загальний курс фізики. Електронне видання

## Зміст

Геометрична оптика і фотометрія	4
Хвильова оптика	14
Квантова фізика	33
X властивості речовини	45
Модель атома Резерфорда Бора	49
Фізика ядра та атома	53
Елементарні частинки	58
Молекулярна фізика і термодинаміка	62

## Геометрична оптика і фотометрія

### Сферичне дзеркало

Для сферичного дзеркала оптична сила  $D$  визначається формулою:

$$1/a_1 + 1/a_2 = 2/R = 1/F = D,$$

де  $a_1$  та  $a_2$  — відстані предмета і зображення від дзеркала,  $R$  — радіус кривизни дзеркала,  $F$  — його фокусна відстань.

Відстані, що відраховуються від дзеркала за напрямком променя, вважаються додатними, а проти променя — від'ємними. Якщо  $F$  виражено в метрах, то  $D$  виражається в діоптріях (дптр):  $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

### Закон заломлення світла

При переході променя з одного середовища в інше має місце закон заломлення світла:

$$\sin i / \sin \beta = n = v_1/v_2,$$

де  $i$  — кут падіння,  $\beta$  — кут заломлення,  $n$  — показник заломлення другого середовища відносно першого,  $v_1$  та  $v_2$  — швидкості поширення світла у першому та другому середовищах.

### Тонка лінза

Для тонкої лінзи, поміщеної в однорідне середовище, оптична сила  $D$  визначається формулою:

$$1/a_1 + 1/a_2 = (n-1)(1/R_1 - 1/R_2) = 1/F = D,$$

де  $a_1$  та  $a_2$  — відстані предмета і зображення від лінзи,  $n$  — показник заломлення матеріалу лінзи,  $R_1$  та  $R_2$  — радіуси кривизни поверхонь лінзи.

Правило знаків для лінз таке саме, як і для дзеркал.

Оптична сила двох тонких лінз, складених разом:

$$D = D_1 + D_2,$$

де  $D_1$  та  $D_2$  — оптичні сили лінз.

## **Лінійне збільшення**

Поперечне лінійне збільшення в дзеркалах і лінзах:

$$k = y_2/y_1 = a_2/a_1,$$

де  $y_1$  — висота предмета,  $y_2$  — висота зображення.

## **Збільшення оптичних приладів**

Збільшення лупи:

$$k = L/F,$$

де  $L$  — відстань найкращого зору,  $F$  — фокусна відстань лупи.

Збільшення мікроскопа:

$$k = L \cdot d \cdot D_1 \cdot D_2,$$

де  $L$  — відстань найкращого зору,  $d$  — відстань між фокусами об'єктива і окуляра,  $D_1$  та  $D_2$  — оптичні сили об'єктива й окуляра.

Збільшення телескопа:

$$k = F_1/F_2,$$

де  $F_1$  та  $F_2$  — фокусні відстані об'єктива й окуляра.

## **Фотометрія**

Світловий потік  $\Phi$  визначається енергією, що переноситься світловими хвилями через дану площу в одиницю часу:

$$\Phi = dW/dt.$$

Сила світла  $I$  чисельно дорівнює світловому потоку, що припадає на одиницю тілесного кута:

$$I = d\Phi/d\omega.$$

Освітленість  $E$  характеризується світловим потоком, що припадає на одиницю площі:

$$E = d\Phi/dS.$$

Точкове джерело силою світла  $I$  створює на майданчику, що знаходиться від нього на відстані  $r$ , освітленість:

$$E = (I/r^2) \cos \alpha,$$

де  $\alpha$  — кут падіння променів.

Світність  $R$  чисельно дорівнює світловому потоку, що випускається одиницею площі тіла, що світиться:

$$R = d\Phi/dS.$$

Якщо світність тіла зумовлена його освітленістю:

$$R = \rho E,$$

де  $\rho$  — коефіцієнт відбиття.

Яскравість  $B$  поверхні, що світиться, — це величина, чисельно рівна відношенню сили світла з елемента поверхні до площі проєкції цього елемента на площину, перпендикулярну до напрямку спостереження:

$$B = dI / (dS \cos \theta),$$

де  $\theta$  — кут між нормаллю до елемента поверхні та напрямком спостереження.

Якщо тіло випромінює за законом Ламберта (яскравість не залежить від напрямку), то світність  $R$  і яскравість  $B$  пов'язані співвідношенням:

$$R = \pi B.$$

1. Радіус кривизни ввігнутого дзеркала  $R = 16$  см. На відстані  $a_1 = 24$  см від дзеркала розміщено предмет висотою  $y_1 = 2$  см. Знайти положення та висоту  $y_2$  зображення. Дати креслення.
2. Радіус кривизни ввігнутого дзеркала  $R = 30$  см. Предмет висотою  $y_1 = 1,5$  см розміщено на відстані  $a_1 = 20$  см від дзеркала. Знайти положення та висоту  $y_2$  зображення. Дати креслення.
3. Ввігнуте дзеркало має радіус кривизни  $R = 40$  см. Предмет висотою  $y_1 = 3$  см знаходиться на відстані  $a_1 = 60$  см від дзеркала. Знайти положення та висоту зображення. Дати креслення.
4. Радіус кривизни опуклого дзеркала  $R = 24$  см. На відстані  $a_1 = 18$  см від дзеркала розміщено предмет висотою  $y_1 = 2$  см. Визначити положення та висоту зображення. Дати креслення.
5. Ввігнуте дзеркало має фокусну відстань  $F = 15$  см. Предмет висотою  $y_1 = 4$  см розташовано на відстані  $a_1 = 10$  см від дзеркала (між фокусом і дзеркалом). Знайти положення та висоту зображення. Дати креслення.
6. Предмет висотою  $y_1 = 2,5$  см розміщено на відстані  $a_1 = 45$  см від ввігнутого дзеркала з радіусом кривизни  $R = 36$  см. Знайти положення зображення та його висоту  $y_2$ . Визначити характер зображення. Дати креслення.
7. Опукле дзеркало має радіус кривизни  $R = 50$  см. Предмет висотою  $y_1 = 5$  см знаходиться на відстані  $a_1 = 75$  см від дзеркала. Знайти положення та висоту зображення. Порівняти з результатом для ввігнутого дзеркала з тим самим  $R$ . Дати креслення.
8. Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі втричі більша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 20$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
9. Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі вчетверо більша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 25$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.

- 10.** Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі вдвічі менша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 18$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
- 11.** Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі вдвічі більша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 24$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
- 12.** Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі в 1,5 раза більша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 10$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
- 13.** Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі вп'ятеро більша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 36$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
- 14.** Висота зображення предмета у ввігнутому дзеркалі втричі менша за висоту самого предмета. Відстань між предметом і зображенням  $a_1 + a_2 = 12$  см. Знайти фокусну відстань  $F$  та оптичну силу  $D$  дзеркала.
- 15.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Місяця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 12$  м?
- 16.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Сонця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 20$  м?
- 17.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Сонця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 8$  м?
- 18.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Місяця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 24$  м?
- 19.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Сонця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 5$  м?
- 20.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення зірки, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 30$  м?
- 21.** Де буде знаходитись і який розмір  $u_2$  матиме зображення Сонця, отримуване в рефлекторі, радіус кривизни якого  $R = 10$  м?

- 22.** Показник заломлення скла  $n = 1,65$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) скло — повітря; б) вода — повітря; в) скло — вода.
- 23.** Показник заломлення скла  $n = 1,70$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) скло — повітря; б) вода — повітря; в) скло — вода.
- 24.** Показник заломлення алмазу  $n = 2,42$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) алмаз — повітря; б) алмаз — вода; в) алмаз — скло ( $n = 1,52$ ).
- 25.** Показник заломлення скла  $n = 1,46$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) скло — повітря; б) вода — повітря; в) скло — вода.
- 26.** Показник заломлення скла  $n = 1,58$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) скло — повітря; б) вода — повітря; в) скло — вода.
- 27.** Показник заломлення рубіну  $n = 1,76$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) рубін — повітря; б) рубін — вода; в) рубін — скло ( $n = 1,52$ ).
- 28.** Показник заломлення кварцу  $n = 1,54$ . Знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття  $\beta$  для поверхні розділу: а) кварц — повітря; б) вода — повітря; в) кварц — вода.
- 29.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 15^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 15^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,5$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 30.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 20^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 20^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,6$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.

- 31.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 10^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 15^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,7$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 32.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 12^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 12^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,55$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 33.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 8^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 10^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,65$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 34.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 15^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 20^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,5$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 35.** Переломлюючий кут рівнобедреної призми  $\gamma = 10^\circ$ . Монохроматичний промінь падає на бокову грань під кутом  $i = 12^\circ$ . Показник заломлення матеріалу призми  $n = 1,75$ . Знайти кут відхилення  $\delta$  променя від початкового напрямку.
- 36.** Радіуси кривизни поверхонь двояковвігнутої лінзи  $R_1 = R_2 = 40$  см. Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,5$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 37.** Радіуси кривизни поверхонь двояковипуклої лінзи  $R_1 = R_2 = 30$  см. Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,6$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 38.** Радіуси кривизни поверхонь плоско-випуклої лінзи  $R_1 = 20$  см,  $R_2 = \infty$ . Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,5$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 39.** Радіуси кривизни поверхонь двояковипуклої лінзи  $R_1 = 25$  см,  $R_2 = 50$  см. Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,7$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 40.** Радіуси кривизни поверхонь двояковвігнутої лінзи  $R_1 = 30$  см,  $R_2 = 60$  см. Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,5$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.

- 41.** Радіуси кривизни поверхонь опукло-ввігнутої лінзи  $R_1 = 20$  см,  $R_2 = 30$  см. Показник заломлення матеріалу лінзи  $n = 1,6$ . Знайти оптичну силу  $D$  лінзи.
- 42.** Дві тонкі лінзи з оптичними силами  $D_1 = 3$  дптр та  $D_2 = -1$  дптр складені разом. Знайти оптичну силу  $D$  системи та її фокусну відстань  $F$ .
- 43.** Світло від електричної лампочки з силою світла  $I = 150$  кд падає під кутом  $\alpha = 30^\circ$  на робоче місце, створюючи освітленість  $E = 100$  лк. На якій відстані  $r$  від робочого місця знаходиться лампочка? На якій висоті  $h$  від робочого місця вона висить?
- 44.** Світло від електричної лампочки з силою світла  $I = 300$  кд падає під кутом  $\alpha = 60^\circ$  на робоче місце, створюючи освітленість  $E = 120$  лк. На якій відстані  $r$  від робочого місця знаходиться лампочка? На якій висоті  $h$  від робочого місця вона висить?
- 45.** Світло від електричної лампочки з силою світла  $I = 250$  кд падає під кутом  $\alpha = 45^\circ$  на робоче місце, створюючи освітленість  $E = 200$  лк. На якій відстані  $r$  від робочого місця знаходиться лампочка? На якій висоті  $h$  від робочого місця вона висить?
- 46.** Світло від електричної лампочки з силою світла  $I = 100$  кд падає під кутом  $\alpha = 30^\circ$  на робоче місце, створюючи освітленість  $E = 75$  лк. На якій відстані  $r$  від робочого місця знаходиться лампочка? На якій висоті  $h$  від робочого місця вона висить?
- 47.** Електрична лампочка висить на висоті  $h = 2$  м над робочим місцем. Сила світла лампочки  $I = 200$  кд. Знайти освітленість  $E$  робочого місця безпосередньо під лампочкою та на відстані  $d = 1,5$  м від цієї точки.
- 48.** Електрична лампочка з силою світла  $I = 180$  кд створює на робочому місці освітленість  $E = 90$  лк при куті падіння  $\alpha = 45^\circ$ . Знайти відстань  $r$  від лампочки до робочого місця та висоту  $h$  підвісу лампочки.
- 49.** Дві електричні лампочки з силами світла  $I_1 = 100$  кд та  $I_2 = 150$  кд висять на одній висоті  $h = 3$  м. Знайти освітленість  $E$  точки на підлозі, що знаходиться рівновіддалено від обох лампочок на горизонтальній відстані  $d = 2$  м від кожної.

- 50.** У центрі квадратної кімнати площею  $S = 16 \text{ м}^2$  висить лампа. На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість у кутах кімнати була найбільшою?
- 51.** У центрі квадратної кімнати площею  $S = 36 \text{ м}^2$  висить лампа. На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість у кутах кімнати була найбільшою?
- 52.** У центрі прямокутної кімнати розміром  $4 \times 6 \text{ м}$  висить лампа. На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість у найвіддаленіших кутах кімнати була найбільшою?
- 53.** У центрі квадратної кімнати площею  $S = 9 \text{ м}^2$  висить лампа. На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість у кутах кімнати була найбільшою?
- 54.** У центрі квадратної кімнати площею  $S = 49 \text{ м}^2$  висить лампа з силою світла  $I = 200 \text{ кд}$ . Знайти оптимальну висоту  $h$  підвісу лампи та максимальну освітленість  $E$  у кутах кімнати.
- 55.** У центрі прямокутної кімнати розміром  $3 \times 5 \text{ м}$  висить лампа з силою світла  $I = 150 \text{ кд}$ . На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість у найвіддаленіших кутах кімнати була найбільшою? Знайти цю освітленість.
- 56.** У центрі круглої кімнати радіусом  $R = 3 \text{ м}$  висить лампа з силою світла  $I = 250 \text{ кд}$ . На якій висоті  $h$  від підлоги повинна знаходитись лампа, щоб освітленість біля стін кімнати була найбільшою? Знайти цю освітленість.
- 57.** На лист білого паперу площею  $S = 15 \times 20 \text{ см}^2$  перпендикулярно до поверхні падає світловий потік  $\Phi = 90 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  паперового листа, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,80$ .
- 58.** На лист білого паперу площею  $S = 25 \times 40 \text{ см}^2$  перпендикулярно до поверхні падає світловий потік  $\Phi = 200 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  паперового листа, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,70$ .

- 59.** На поверхню площею  $S = 10 \times 10 \text{ см}^2$  перпендикулярно падає світловий потік  $\Phi = 50 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  поверхні, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,60$ .
- 60.** На лист сірого паперу площею  $S = 20 \times 20 \text{ см}^2$  перпендикулярно до поверхні падає світловий потік  $\Phi = 80 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  паперового листа, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,50$ .
- 61.** На поверхню площею  $S = 30 \times 50 \text{ см}^2$  перпендикулярно падає світловий потік  $\Phi = 300 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  поверхні, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,85$ .
- 62.** На лист паперу площею  $S = 10 \times 15 \text{ см}^2$  перпендикулярно до поверхні падає світловий потік  $\Phi = 60 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  паперового листа, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,65$ .
- 63.** На матову скляну поверхню площею  $S = 40 \times 60 \text{ см}^2$  перпендикулярно падає світловий потік  $\Phi = 480 \text{ лм}$ . Знайти освітленість  $E$ , світність  $R$  та яскравість  $B$  поверхні, якщо коефіцієнт відбиття  $\rho = 0,90$ .

## Хвильова оптика

### Ефект Доплера для світла

За принципом Доплера частота  $\nu'$  світла, що сприймається реєструючим приладом, пов'язана з частотою  $\nu$ , надсилуваною джерелом світла, співвідношенням:

$$\nu' = \nu \sqrt{(1 - v/c) / (1 + v/c)},$$

де  $v$  — швидкість реєструючого приладу відносно джерела,  $c$  — швидкість поширення світла. Додатне значення  $v$  відповідає видаленню джерела світла.

При  $v \ll c$  формулу можна подати у наближеному вигляді:

$$\nu' \approx \nu / (1 + v/c) \approx \nu c / (c + v).$$

### Інтерференція світла

Відстань між інтерференційними смугами на екрані, розташованому паралельно двом когерентним джерелам світла:

$$l = (L / d) \lambda,$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі світла,  $L$  — відстань від екрана до джерел світла,  $d$  — відстань між джерелами (при цьому  $L \gg d$ ).

### Інтерференція в плоскопаралельних пластинках

Результат інтерференції світла в плоскопаралельних пластинках (у прохідному світлі):

Підсилення світла:

$$2hn \cos \beta = 2k (\lambda/2) \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

Послаблення світла:

$$2hn \cos \beta = (2k + 1) (\lambda/2) \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де  $h$  — товщина пластинки,  $n$  — показник заломлення,  $\beta$  — кут заломлення,  $\lambda$  — довжина хвилі світла. У відбитому світлі умови підсилення та послаблення світла є оберненими до умов у прохідному світлі.

## Кільця Ньютона

Радіуси світлих кілець Ньютона (у прохідному світлі):

$$r_k = \sqrt{(kR\lambda)} \quad (k = 1, 2, \dots);$$

радіуси темних кілець:

$$r_k = \sqrt{(2k-1) R\lambda/2)} \quad (k = 1, 2, \dots),$$

де  $R$  — радіус кривизни лінзи. У відбитому світлі розташування світлих і темних кілець є оберненим до їх розташування в прохідному світлі.

## Дифракція від щілини

Положення мінімумів освітленості при дифракції від щілини, на яку нормально падає пучок паралельних променів:

$$a \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

де  $a$  — ширина щілини,  $\varphi$  — кут дифракції,  $\lambda$  — довжина хвилі падаючого світла.

## Дифракційна решітка

У дифракційній решітці максимуми світла спостерігаються в напрямках, що складають з нормаллю до решітки кут  $\varphi$ , який задовольняє співвідношенню:

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де  $d$  — стала решітки,  $\varphi$  — кут дифракції,  $\lambda$  — довжина хвилі падаючого світла,  $k$  — порядок спектра. Стала решітки  $d = 1/N_0$ , де  $N_0$  — число щілин решітки, що припадає на одиницю довжини решітки.

Розрізнявальна здатність дифракційної решітки:

$$\lambda / \Delta\lambda = kN,$$

де  $N$  — загальне число щілин решітки,  $k$  — порядок спектра,  $\lambda$  та  $\lambda + \Delta\lambda$  — довжини хвиль двох близьких спектральних ліній, що ще розрізняються решіткою.

Кутова дисперсія дифракційної решітки:

$$d\varphi/d\lambda.$$

Лінійна дисперсія дифракційної решітки:

$$D = F \cdot (d\varphi/d\lambda),$$

де  $F$  — фокусна відстань лінзи, що проєктує спектр на екран.

### **Відбиття від діелектричного дзеркала. Формули Френеля**

При відбитті природного світла від діелектричного дзеркала мають місце формули Френеля:

$$I_{\perp} = 0,5 I_0 [\sin(i - \beta) / \sin(i + \beta)]^2,$$

$$I_{\parallel} = 0,5 I_0 [\operatorname{tg}(i - \beta) / \operatorname{tg}(i + \beta)]^2,$$

де  $I_{\perp}$  — інтенсивність світлових коливань у відбитому промені, що здійснюються перпендикулярно до площини падіння;  $I_{\parallel}$  — інтенсивність коливань, паралельних площині падіння;  $I_0$  — інтенсивність падаючого природного світла;  $i$  — кут падіння,  $\beta$  — кут заломлення.

### **Закон Брюстера**

Якщо  $i + \beta = 90^\circ$ , то  $I_{\parallel} = 0$ . У цьому випадку кут падіння  $i$  і показник заломлення  $n$  діелектричного дзеркала пов'язані співвідношенням:

$$\operatorname{tg} i = n \quad (\text{закон Брюстера}).$$

### **Закон Малюса**

Інтенсивність світла, що пройшло через поляризатор і аналізатор:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi \quad (\text{закон Малюса}),$$

де  $\varphi$  — кут між головними площинами поляризатора та аналізатора,  $I_0$  — інтенсивність світла, що пройшло через поляризатор.

- 64.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами гелієвої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка  $\alpha$ -частинок максимальне доплерівське зміщення лінії гелію ( $\lambda = 447,1$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 0,6$  нм?
- 65.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами гелієвої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка  $\alpha$ -частинок максимальне доплерівське зміщення лінії гелію ( $\lambda = 492,2$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 1,0$  нм?
- 66.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами гелієвої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка  $\alpha$ -частинок максимальне доплерівське зміщення лінії гелію ( $\lambda = 587,6$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 0,8$  нм?
- 67.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами гелієвої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка  $\alpha$ -частинок максимальне доплерівське зміщення лінії гелію ( $\lambda = 492,2$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 1,2$  нм?
- 68.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами водневої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка протонів максимальне доплерівське зміщення лінії водню ( $\lambda = 486,1$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 0,9$  нм?
- 69.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами гелієвої розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка  $\alpha$ -частинок максимальне доплерівське зміщення лінії гелію ( $\lambda = 667,8$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 0,5$  нм?
- 70.** Яка різниця потенціалів  $U$  була прикладена між електродами неонові розрядної трубки, якщо при спостереженні вздовж пучка іонів максимальне доплерівське зміщення лінії неону ( $\lambda = 540,1$  нм) отрималось рівним  $\Delta\lambda = 0,7$  нм?

- 71.** У скільки разів збільшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо зелений світлофільтр ( $\lambda_1 = 500$  нм) замінити фіолетовим ( $\lambda_2 = 400$  нм)?
- 72.** У скільки разів зменшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо червоний світлофільтр ( $\lambda_1 = 650$  нм) замінити синім ( $\lambda_2 = 450$  нм)?
- 73.** У досліді Юнга відстань між щілинами  $d = 0,5$  мм, відстань до екрана  $L = 1$  м. Знайти відстань між сусідніми інтерференційними смугами для зеленого світла ( $\lambda = 550$  нм) та для червоного світла ( $\lambda = 700$  нм). У скільки разів вони відрізняються?
- 74.** У досліді Юнга використовується жовте світло ( $\lambda_1 = 580$  нм). У скільки разів зміниться відстань між інтерференційними смугами, якщо жовтий світлофільтр замінити ультрафіолетовим ( $\lambda_2 = 360$  нм)?
- 75.** У досліді Юнга відстань між щілинами  $d = 1$  мм, відстань до екрана  $L = 2$  м. Знайти ширину інтерференційної смуги для синього світла ( $\lambda = 450$  нм). У скільки разів вона менша, ніж для червоного світла ( $\lambda = 630$  нм)?
- 76.** У скільки разів збільшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо синій світлофільтр ( $\lambda_1 = 450$  нм) замінити оранжевим ( $\lambda_2 = 600$  нм)?
- 77.** У досліді Юнга при освітленні щілин монохроматичним світлом ( $\lambda = 500$  нм) відстань між сусідніми смугами  $l = 2$  мм, відстань до екрана  $L = 1,5$  м. Знайти відстань між щілинами  $d$ . У скільки разів зміниться ширина смуги, якщо замінити світлофільтр на червоний ( $\lambda = 700$  нм)?
- 78.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,4$  мм, відстань до екрана  $L = 4$  м. У синьому світлі отримались інтерференційні смуги, розташовані на відстані  $l = 4$  мм одна від одної. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  синього світла.
- 79.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,6$  мм, відстань до екрана  $L = 6$  м. Інтерференційні смуги

розташовані на відстані  $l = 5$  мм одна від одної. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  світла.

**80.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 1,0$  мм, відстань до екрана  $L = 3$  м. У червоному світлі отримались інтерференційні смуги, розташовані на відстані  $l = 2$  мм одна від одної. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  червоного світла.

**81.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,5$  мм, відстань до екрана  $L = 4$  м. Знайти відстань між інтерференційними смугами  $l$  для жовтого світла ( $\lambda = 589$  нм).

**82.** У досліді з дзеркалами Френеля інтерференційні смуги розташовані на відстані  $l = 3$  мм одна від одної. Відстань до екрана  $L = 3$  м, довжина хвилі світла  $\lambda = 600$  нм. Знайти відстань  $d$  між уявними зображеннями джерела світла.

**83.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,8$  мм, відстань до екрана  $L = 5$  м. У фіолетовому світлі отримались інтерференційні смуги, розташовані на відстані  $l = 2,5$  мм одна від одної. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  фіолетового світла.

**84.** У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла  $d = 0,3$  мм, відстань до екрана  $L = 7$  м. Знайти відстань між інтерференційними смугами  $l$  для зеленого світла ( $\lambda = 530$  нм) та для червоного світла ( $\lambda = 660$  нм). У скільки разів вони відрізняються?

**85.** На мильну плівку падає біле світло під кутом  $i = 30^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у зелений колір ( $\lambda = 550$  нм)? Показник заломлення мильної води  $n = 1,33$ .

**86.** На мильну плівку падає біле світло під кутом  $i = 60^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у синій колір ( $\lambda = 450$  нм)? Показник заломлення мильної води  $n = 1,33$ .

**87.** На скляну плівку падає біле світло під кутом  $i = 45^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у червоний колір ( $\lambda = 650$  нм)? Показник заломлення скла  $n = 1,50$ .

- 88.** На мильну плівку падає біле світло перпендикулярно до її поверхні. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у жовтий колір ( $\lambda = 580$  нм)? Показник заломлення мильної води  $n = 1,33$ .
- 89.** На масляну плівку на поверхні води падає біле світло під кутом  $i = 45^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у фіолетовий колір ( $\lambda = 420$  нм)? Показник заломлення масла  $n = 1,46$ .
- 90.** На мильну плівку падає біле світло під кутом  $i = 45^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки відбиті промені будуть пофарбовані у помаранчевий колір ( $\lambda = 620$  нм)? Показник заломлення мильної води  $n = 1,33$ .
- 91.** На скляну плівку падає біле світло під кутом  $i = 30^\circ$  до поверхні плівки. При якій найменшій товщині  $h$  плівки прохідні промені будуть максимально послаблені для зеленого кольору ( $\lambda = 520$  нм)? Показник заломлення скла  $n = 1,52$ .
- 92.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець  $r_k = 3,0$  мм і  $r_{k+1} = 3,35$  мм. Радіус кривизни лінзи  $R = 6,4$  м. Знайти порядкові номери кілець і довжину хвилі  $\lambda$  падаючого світла.
- 93.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець  $r_k = 2,0$  мм і  $r_{k+1} = 2,24$  мм. Радіус кривизни лінзи  $R = 4,0$  м. Знайти порядкові номери кілець і довжину хвилі  $\lambda$  падаючого світла.
- 94.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом ( $\lambda = 589$  нм), що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіус кривизни лінзи  $R = 5,0$  м. Знайти радіуси п'ятого та десятого темних кілець.

- 95.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у прохідному світлі. Радіуси двох сусідніх світлих кілець  $r_k = 5,0$  мм і  $r_{k+1} = 5,39$  мм. Радіус кривизни лінзи  $R = 8,0$  м. Знайти порядкові номери кілець і довжину хвилі  $\lambda$  падаючого світла.
- 96.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом ( $\lambda = 500$  нм), що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіус кривизни лінзи  $R = 6,4$  м. Знайти радіуси третього та сьомого темних кілець.
- 97.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється білим світлом, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Радіус кривизни лінзи  $R = 5,0$  м. Знайти радіуси третього світлого кільця для червоного ( $\lambda = 650$  нм) та фіолетового ( $\lambda = 400$  нм) світла у відбитому світлі.
- 98.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіус десятого темного кільця  $r_{10} = 4,0$  мм. Радіус кривизни лінзи  $R = 6,4$  м. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  падаючого світла та радіус п'ятого темного кільця.
- 99.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 550$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Знайти товщину  $h$  повітряного шару між лінзою та скляною пластинкою в тому місці, де спостерігається шосте темне кільце у відбитому світлі.
- 100.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 480$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Знайти товщину  $h$  повітряного шару між лінзою та скляною пластинкою в тому місці, де спостерігається десяте темне кільце у відбитому світлі.
- 101.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 600$  нм, що падає по нормалі

до поверхні пластинки. Знайти товщину  $h$  повітряного шару між лінзою та скляною пластинкою в тому місці, де спостерігається третє світле кільце у відбитому світлі.

**102.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 630$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Знайти товщину  $h$  повітряного шару в місці спостереження п'ятого темного кільця у відбитому світлі. Радіус кривизни лінзи  $R = 5,0$  м.

**103.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 589$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Простір між лінзою та пластинкою заповнений рідиною з показником заломлення  $n = 1,40$ . Знайти товщину  $h$  шару рідини в місці спостереження четвертого темного кільця у відбитому світлі.

**104.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 500$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Знайти товщину  $h$  повітряного шару між лінзою та скляною пластинкою в тому місці, де спостерігається восьме темне кільце у відбитому світлі. Радіус кривизни лінзи  $R = 4,0$  м.

**105.** Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 660$  нм, що падає по нормалі до поверхні пластинки. Простір між лінзою та пластинкою заповнений водою ( $n = 1,33$ ). Знайти товщину  $h$  шару води в місці спостереження шостого темного кільця у відбитому світлі та порівняти з випадком повітряного шару.

**106.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 550$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 4$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 2$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**107.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 500$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 3$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 1,5$  м

від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**108.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 600$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 5$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 4$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**109.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 450$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 2$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 1$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**110.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 630$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 6$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 5$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**111.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 589$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 4$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 2,5$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**112.** Світло від монохроматичного джерела ( $\lambda = 700$  нм) падає нормально на діафрагму з діаметром отвору  $d = 7$  мм. За діафрагмою на відстані  $l = 6$  м від неї знаходиться екран. Яке число  $k$  зон Френеля вкладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним чи світлим?

**113.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 3$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 600$  нм). Посередині між екраном та

джерелом світла поміщена діафрагма з круглим отвором. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець, що спостерігаються на екрані, буде найбільш темним?

**114.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 6$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 500$  нм). Посередині між екраном та джерелом світла поміщена діафрагма з круглим отвором. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець буде найбільш світлим?

**115.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 2$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 550$  нм). Діафрагма з круглим отвором поміщена на відстані  $0,5$  м від джерела. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець буде найбільш темним?

**116.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 5$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 450$  нм). Посередині між екраном та джерелом світла поміщена діафрагма з круглим отвором. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець буде найбільш темним?

**117.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 8$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 630$  нм). Посередині між екраном та джерелом світла поміщена діафрагма з круглим отвором. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець буде найбільш світлим?

**118.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 4$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 589$  нм). Діафрагма з круглим отвором поміщена на відстані  $1$  м від джерела. При якому радіусі  $R$  отвору в отворі вкладатиметься рівно три зони Френеля? Яким буде центр дифракційної картини?

**119.** Дифракційна картина спостерігається на відстані  $l = 10$  м від точкового джерела монохроматичного світла ( $\lambda = 700$  нм). Посередині між екраном та джерелом світла поміщена діафрагма з круглим отвором. При якому радіусі  $R$  отвору центр дифракційних кілець буде найбільш темним? Яке число зон Френеля вкладатиметься в отворі?

- 120.** На щілину шириною  $a = 4\lambda$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатися третій дифракційний мінімум світла?
- 121.** На щілину шириною  $a = 8\lambda$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатися другий дифракційний мінімум світла?
- 122.** На щілину шириною  $a = 0,1$  мм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda = 600$  нм. Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатися перший дифракційний мінімум світла?
- 123.** На щілину шириною  $a = 5\lambda$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під якими кутами  $\varphi$  будуть спостерігатися перший та другий дифракційні мінімуми світла?
- 124.** На щілину шириною  $a = 0,2$  мм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda = 500$  нм. Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатися другий дифракційний мінімум світла? Знайти ширину центрального максимуму на екрані, що знаходиться на відстані  $L = 1$  м від щілини.
- 125.** На щілину шириною  $a = 3\lambda$  падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Під яким кутом  $\varphi$  буде спостерігатися перший дифракційний мінімум? Скільки всього мінімумів можна спостерігати з кожного боку від центрального максимуму?
- 126.** На щілину шириною  $a = 0,3$  мм падає нормально паралельний пучок білого світла. Знайти кути  $\varphi$  першого дифракційного мінімуму для фіолетового ( $\lambda = 400$  нм) та червоного ( $\lambda = 700$  нм) світла. На якій лінійній відстані розташовані ці мінімуми на екрані, що знаходиться на відстані  $L = 0,5$  м від щілини?
- 127.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Натрієва лінія ( $\lambda_1 = 589$  нм) дає в спектрі першого порядку кут дифракції  $\varphi_1 = 20^\circ$ . Деяка лінія дає в спектрі другого порядку кут дифракції  $\varphi_2 = 30^\circ$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_2$  цієї лінії та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини решітки.

- 128.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Натрієва лінія ( $\lambda_1 = 589$  нм) дає в спектрі першого порядку кут дифракції  $\varphi_1 = 15^\circ$ . Деяка лінія дає в спектрі третього порядку кут дифракції  $\varphi_2 = 35^\circ$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_2$  цієї лінії та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини решітки.
- 129.** На дифракційну решітку нормально падає пучок монохроматичного світла ( $\lambda = 600$  нм). Кут дифракції другого порядку  $\varphi = 25^\circ$ . Знайти сталу решітки  $d$  та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини решітки. Під яким кутом спостерігається третій порядок?
- 130.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Зелена лінія ртуті ( $\lambda_1 = 546$  нм) дає в спектрі першого порядку кут дифракції  $\varphi_1 = 18^\circ 30'$ . Деяка лінія дає в спектрі другого порядку кут дифракції  $\varphi_2 = 28^\circ$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_2$  цієї лінії та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини решітки.
- 131.** На дифракційну решітку з числом штрихів  $N_0 = 500 \text{ мм}^{-1}$  нормально падає пучок білого світла. Знайти кути дифракції для фіолетового ( $\lambda = 400$  нм) та червоного ( $\lambda = 700$  нм) світла в спектрі першого порядку. Яка кутова ширина спектру першого порядку?
- 132.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Натрієва лінія ( $\lambda_1 = 589$  нм) дає в спектрі другого порядку кут дифракції  $\varphi_1 = 24^\circ$ . Деяка лінія дає в спектрі першого порядку кут дифракції  $\varphi_2 = 10^\circ$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_2$  цієї лінії та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини решітки.
- 133.** На дифракційну решітку з числом штрихів  $N_0 = 400 \text{ мм}^{-1}$  нормально падає монохроматичне світло ( $\lambda = 550$  нм). Знайти кути дифракції для спектрів першого, другого та третього порядків. Який найвищий порядок спектра можна спостерігати з цією решіткою?
- 134.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої воднем. Зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ( $\lambda_\varphi = 410$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\varphi 1} = 25^\circ 12'$  і  $\varphi_{\varphi 2} = 37^\circ 48'$ . Після цього зорова труба встановлюється на червоні лінії по

обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{кр1} = 21^\circ 30'$  і  $\varphi_{кр2} = 41^\circ 30'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{кр}$  червоної лінії спектра водню.

**135.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої неоном. Зорова труба встановлюється на жовті лінії ( $\lambda_{ж} = 585$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{ж1} = 30^\circ 6'$  і  $\varphi_{ж2} = 33^\circ 54'$ . Після цього зорова труба встановлюється на зелені лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{з1} = 28^\circ 24'$  і  $\varphi_{з2} = 35^\circ 36'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{з}$  зеленої лінії спектра неону.

**136.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої гелієм. Зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ( $\lambda_{ф} = 389$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{ф1} = 20^\circ 18'$  і  $\varphi_{ф2} = 43^\circ 42'$ . Після цього зорова труба встановлюється на жовті лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{ж1} = 26^\circ 54'$  і  $\varphi_{ж2} = 37^\circ 6'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{ж}$  жовтої лінії спектра гелію.

**137.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої аргоном. Зорова труба встановлюється на сині лінії ( $\lambda_{с} = 470$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{с1} = 22^\circ 48'$  і  $\varphi_{с2} = 41^\circ 12'$ . Після цього зорова труба встановлюється на червоні лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{кр1} = 18^\circ 6'$  і  $\varphi_{кр2} = 45^\circ 54'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{кр}$  червоної лінії спектра аргону.

**138.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої гелієм. Зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ( $\lambda_{ф} = 389$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі другого

порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{ф1}} = 24^\circ 12'$  і  $\varphi_{\text{ф2}} = 39^\circ 48'$ . Після цього зорова труба встановлюється на зелені лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі другого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{з1}} = 28^\circ 30'$  і  $\varphi_{\text{з2}} = 35^\circ 30'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{\text{з}}$  зеленої лінії спектра гелію.

**139.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої ртуттю. Зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ( $\lambda_{\text{ф}} = 405$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{ф1}} = 26^\circ 18'$  і  $\varphi_{\text{ф2}} = 37^\circ 42'$ . Після цього зорова труба встановлюється на жовті лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{ж1}} = 31^\circ 24'$  і  $\varphi_{\text{ж2}} = 32^\circ 36'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{\text{ж}}$  жовтої лінії спектра ртуті.

**140.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла з розрядної трубки, наповненої гелієм. Зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ( $\lambda_{\text{ф}} = 389$  нм) по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{ф1}} = 29^\circ 0'$  і  $\varphi_{\text{ф2}} = 35^\circ 0'$ . Після цього зорова труба встановлюється на оранжеві лінії по обидва боки від центральної полоси в спектрі першого порядку. Відліки по лімбу вправо від нульового поділу дали  $\varphi_{\text{о1}} = 33^\circ 12'$  і  $\varphi_{\text{о2}} = 30^\circ 48'$ . Знайти довжину хвилі  $\lambda_{\text{о}}$  оранжевої лінії спектра гелію.

**141.** Яка повинна бути стала  $d$  дифракційної решітки, щоб у першому порядку були розрізнені лінії спектра натрію  $\lambda_1 = 589,0$  нм і  $\lambda_2 = 589,6$  нм? Ширина решітки  $a = 2$  см.

**142.** Яка повинна бути стала  $d$  дифракційної решітки, щоб у другому порядку були розрізнені лінії спектра водню  $\lambda_1 = 656,3$  нм і  $\lambda_2 = 656,8$  нм? Ширина решітки  $a = 4$  см.

**143.** Яка повинна бути стала  $d$  дифракційної решітки, щоб у першому порядку були розрізнені лінії спектра ртуті  $\lambda_1 = 577,0$  нм і  $\lambda_2 = 579,1$  нм? Ширина решітки  $a = 5$  см.

- 144.** Дифракційна решітка має сталу  $d = 2$  мкм і ширину  $a = 3$  см. Знайти розрізнявальну здатність решітки в спектрі першого та другого порядків. Чи можна розрізнити лінії натрію  $\lambda_1 = 589,0$  нм і  $\lambda_2 = 589,6$  нм у першому порядку?
- 145.** Яка повинна бути стала  $d$  дифракційної решітки, щоб у третьому порядку були розрізнені лінії спектра гелію  $\lambda_1 = 587,5$  нм і  $\lambda_2 = 587,6$  нм? Ширина решітки  $a = 6$  см.
- 146.** Дифракційна решітка має ширину  $a = 4$  см і число штрихів  $N_0 = 600$  мм<sup>-1</sup>. Знайти розрізнявальну здатність решітки в спектрі першого, другого та третього порядків. Яку найменшу різницю довжин хвиль  $\Delta\lambda$  можна розрізнити поблизу  $\lambda = 500$  нм у другому порядку?
- 147.** Яка повинна бути мінімальна ширина  $a$  дифракційної решітки зі сталою  $d = 3$  мкм, щоб у другому порядку були розрізнені лінії спектра калію  $\lambda_1 = 404,4$  нм і  $\lambda_2 = 404,7$  нм?
- 148.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Червона лінія ( $\lambda_1 = 650$  нм) видна в спектрі другого порядку під кутом  $\varphi = 40^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі третього порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка? Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  цієї решітки для довжини хвилі  $\lambda_1 = 650$  нм у спектрі другого порядку.
- 149.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Жовта лінія ( $\lambda_1 = 580$  нм) видна в спектрі третього порядку під кутом  $\varphi = 45^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі четвертого порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка? Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для  $\lambda_1 = 580$  нм у спектрі третього порядку.
- 150.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Зелена лінія ( $\lambda_1 = 546$  нм) видна в спектрі другого порядку під кутом  $\varphi = 30^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі третього порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка? Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для  $\lambda_1 = 546$  нм у спектрі другого порядку.

- 151.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Фіолетова лінія ( $\lambda_1 = 410$  нм) видна в спектрі четвертого порядку під кутом  $\varphi = 50^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі п'ятого порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка? Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для  $\lambda_1 = 410$  нм у спектрі четвертого порядку.
- 152.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Синя лінія ( $\lambda_1 = 470$  нм) видна в спектрі третього порядку під кутом  $\varphi = 45^\circ$ . Знайти сталу решітки  $d$  та число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини. Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі другого порядку? Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для  $\lambda_1 = 470$  нм у спектрі третього порядку.
- 153.** На дифракційну решітку нормально падає пучок білого світла. Стала решітки  $d = 2$  мкм. Знайти кутову дисперсію  $d\varphi/d\lambda$  для довжини хвилі  $\lambda = 550$  нм у спектрах першого, другого та третього порядків. Під яким кутом видна ця лінія в кожному з порядків?
- 154.** На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Помаранчева лінія ( $\lambda_1 = 610$  нм) видна в спектрі другого порядку під кутом  $\varphi = 35^\circ$ . Яка спектральна лінія  $\lambda_2$  видна під цим самим кутом у спектрі третього порядку? Яке число штрихів  $N_0$  на одиницю довжини має дифракційна решітка? Знайти лінійну дисперсію цієї решітки для  $\lambda_1 = 610$  нм у спектрі другого порядку, якщо фокусна відстань лінзи  $F = 0,5$  м.
- 155.** Знайти показник заломлення  $n$  скла, якщо при відбитті від нього світла відбитий промінь буде повністю поляризований при куті заломлення  $\beta = 25^\circ$ .
- 156.** Знайти показник заломлення  $n$  скла, якщо при відбитті від нього світла відбитий промінь буде повністю поляризований при куті заломлення  $\beta = 35^\circ$ .
- 157.** Знайти показник заломлення  $n$  рідини, якщо кут Брюстера для її поверхні становить  $i_B = 53^\circ$ . Під яким кутом  $\beta$  заломлюється промінь, що падає під кутом Брюстера?
- 158.** Промінь світла падає на поверхню скла під кутом Брюстера  $i_B = 58^\circ$ . Знайти показник заломлення  $n$  скла та кут заломлення  $\beta$ . Під яким кутом до відбитого променя поширюється заломлений промінь?

- 159.** Знайти кут Брюстера  $i_B$  для поверхні розділу вода — скло, якщо показник заломлення води  $n_1 = 1,33$ , а скла  $n_2 = 1,50$ .
- 160.** Природне світло падає на поверхню скла ( $n = 1,65$ ) під кутом Брюстера. Знайти ступінь поляризації відбитого світла та інтенсивності складових  $I_{\perp}$  і  $I_{\parallel}$  відбитого променя, якщо інтенсивність падаючого світла  $I_0 = 100 \text{ Вт/м}^2$ .
- 161.** Промінь світла переходить з води ( $n_1 = 1,33$ ) у скло ( $n_2 = 1,52$ ). Знайти кут Брюстера  $i_B$  для цієї межі розділу. Порівняти з кутом Брюстера для межі повітря — скло.
- 162.** Знайти кут  $\varphi$  між головними площинами поляризатора та аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, що проходить через поляризатор і аналізатор, зменшується у 6 разів.
- 163.** Знайти кут  $\varphi$  між головними площинами поляризатора та аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, що проходить через поляризатор і аналізатор, зменшується у 3 рази.
- 164.** Природне світло інтенсивністю  $I_0 = 800 \text{ Вт/м}^2$  проходить через поляризатор і аналізатор. Кут між їхніми головними площинами  $\varphi = 30^\circ$ . Знайти інтенсивність світла після аналізатора.
- 165.** Природне світло інтенсивністю  $I_0$  проходить через два поляризатори, головні площини яких утворюють кут  $\varphi = 60^\circ$ . У скільки разів зменшиться інтенсивність світла після проходження через обидва поляризатори?
- 166.** Знайти кут  $\varphi$  між головними площинами поляризатора та аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, що проходить через поляризатор і аналізатор, зменшується у 8 разів.
- 167.** Природне світло проходить послідовно через три поляризатори. Кут між головними площинами першого і другого поляризаторів  $\varphi_1 = 30^\circ$ , між другим і третім  $\varphi_2 = 45^\circ$ . У скільки разів зменшиться інтенсивність світла після проходження через усі три поляризатори?
- 168.** Два поляризатори розташовані так, що їхні головні площини утворюють кут  $\varphi = 45^\circ$ . Інтенсивність природного світла після проходження через обидва

поляризатори  $I = 50 \text{ Вт/м}^2$ . Знайти початкову інтенсивність  $I_0$  природного світла.

**169.** Промені природного світла проходять крізь плоскопаралельну скляну пластинку ( $n = 1,60$ ), падаючи на неї під кутом  $i_{\text{Б}}$  повної поляризації. Знайти ступінь поляризації  $P$  променів, що пройшли крізь пластинку.

**170.** Промені природного світла проходять крізь плоскопаралельну скляну пластинку ( $n = 1,50$ ), падаючи на неї під кутом  $i_{\text{Б}}$  повної поляризації. Знайти ступінь поляризації  $P$  променів, що пройшли крізь пластинку та кут Брюстера  $i_{\text{Б}}$ .

**171.** Промені природного світла проходять крізь стопу з трьох плоскопаралельних скляних пластинок ( $n = 1,54$ ), падаючи на них під кутом  $i_{\text{Б}}$  повної поляризації. Знайти ступінь поляризації  $P$  променів, що пройшли крізь стопу.

**172.** Промені природного світла проходять крізь плоскопаралельну пластинку з кварцу ( $n = 1,54$ ), падаючи на неї під кутом  $i_{\text{Б}}$  повної поляризації. Знайти ступінь поляризації  $P$  та інтенсивності складових  $I_{\perp}$  і  $I_{\parallel}$  світла, що пройшло крізь пластинку, якщо інтенсивність падаючого світла  $I_0 = 200 \text{ Вт/м}^2$ .

**173.** Промені природного світла проходять крізь плоскопаралельну скляну пластинку ( $n = 1,70$ ), падаючи на неї під кутом  $i_{\text{Б}}$  повної поляризації. Знайти кут Брюстера  $i_{\text{Б}}$ , кут заломлення  $\beta$  та ступінь поляризації  $P$  променів, що пройшли крізь пластинку.

**174.** Стопа з п'яти плоскопаралельних скляних пластинок ( $n = 1,54$ ) освітлюється природним світлом під кутом Брюстера. Знайти ступінь поляризації  $P$  світла, що пройшло крізь стопу. Порівняти з результатом для однієї пластинки.

**175.** Промені природного світла інтенсивністю  $I_0 = 400 \text{ Вт/м}^2$  проходять крізь плоскопаралельну скляну пластинку ( $n = 1,54$ ) під кутом Брюстера. Знайти інтенсивності складових  $I_{\perp}$  і  $I_{\parallel}$  у відбитому та заломленому променях. Знайти ступінь поляризації  $P$  заломленого променя.

## Квантова фізика

Енергія фотона:

$$E = h \cdot \nu$$

де  $h$  - стала планка,  $\nu$  – частота хвилі.

Релятивіські маса та імпульс фотона:

$$m = \frac{E}{c^2},$$

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c}.$$

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту

$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} = A + \cdot e$$

де  $A$  – робота виходу електрона з металу,  $U_{zn}$  – зупиняюча напруга для електрона,  $m$  – маса електрона,  $v_{max}$  - швидкість електрона,  $e$  – заряд електрона.

Тиск світла при нормальному падінні:

$$p = \frac{I}{c}(1 + \rho)$$

$I$  – густина світлового потоку,  $\rho$  – коефіцієнт відбивання світла.

Короткохвильова межа суцільного рентгенівського спектру, утвореного гальмуванням електронів:

$$h \cdot \nu_0 = U \cdot e$$

де  $U$  різниця потенціалів прикладена до електродів рентгенівської трубки.

Ефекти Комптона:

$$\Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

де  $\lambda_0 = \frac{h}{m \cdot c}$  – комптонівська довжина хвилі,  $\varphi$  – кут розсіювання.

Інтенсивність рентгенівських променів при проходженні через речовину, яка їх поглинає:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

де  $I_0$  - інтенсивність рентгенівського випромінювання,  $\mu = \rho \cdot \mu_m$ , лінійний коефіцієнт поглинання,  $\rho$  - густина речовини,  $\mu_m$  - масовий коефіцієнт поглинання.

Енергетична світність абсолютно чорного тіла (закон Стефана - Больцмана):

$$R_e = \sigma \cdot T^4$$

де  $\sigma$  - постійна Стефана Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>),  $T$  - термодинамічна температура абсолютно чорного тіла.

Закон зміщення Віна:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

де  $b$  - постійна Віна.

Формула Планка:

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4 \pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT} - 1\right)}$$

де  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ .

Максимальна випромінювальна здатність:

$$\varphi_{\lambda max} = C \cdot T^5$$

де  $C = 1,30 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^3 K^5}$

176. Знайти енергію фотона: червоного  $\lambda = 0,7$ , мкм, зеленого  $\lambda = 0,55$  мкм, фіолетового  $\lambda = 0,4$  мкм, інфрачервоного  $\lambda = 10$  мкм випромінювання.
177. У скільки разів енергія фотона  $\lambda = 550$  нм більша за середню кінетичну енергію поступального руху молекули кисню при кімнатній температурі ( $17^\circ\text{C}$ )?
178. Чи належить до складу видимого світла випромінювання, фотони якого мають енергію  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж?
179. Визначити довжину хвилі, якщо відповідний їй фотон має енергію  $10^{-19}$  Дж. До якої частини спектра належить ця довжина хвилі?
180. За допомогою індукційного прискорювача електронів (бетатрона) можна отримати фотони  $\gamma$ -променів з енергією 100 МеВ. Яка довжина хвилі цих променів?
181. Визначити частоту світла і порівняти енергії фотонів, що відповідають довжинам хвиль:  $\lambda = 280$  нм,  $\lambda = 254$  нм.
182. Визначити релятивістську масу фотона: променистої енергії для  $\lambda = 0,40$  мкм і  $\lambda = 2$ , нм,  $\gamma$ -променів  $\lambda = 2,3$  пм.
183. Якою повинна бути довжина хвилі падаючого фотона, щоб його релятивістська маса дорівнювала масі спокою електрона?
184. Яка довжина хвилі відповідає фотону, релятивістська маса якого  $1,66 \cdot 10^{-30}$  кг?
185. Енергія фотона 1 МеВ. Визначити імпульс фотона.
186. Вважаючи, що потужність лампи розсіюється в усі сторони у вигляді випромінювання і що середня довжина хвилі становить 0,5 мкм, знайти число фотонів, які падають за 1 с на поверхню площею 1 см<sup>2</sup>, розташовану перпендикулярно до променів на відстані 50 см від лампи. Потужність лампи - 25 Вт.
187. Точкове джерело світла споживає потужність  $N = 100$  Вт і рівномірно випромінює світло в усі сторони. Довжина хвилі випромінюваного світла  $\lambda = 589$  нм. ККД джерела - 0,1%. Обчислити число фотонів, які випромінює джерело за 1 с.

188. Флуктуації слабких світлових потоків були вперше виявлені візуальним методом і досліджені С. І. Вавиловим. Число фотонів у світловому потоці змінюється від 90 до 120 за 1 с (частота однакова). Визначити при цьому зміну потужності світлових потоків.
189. При якій температурі середня кінетична енергія теплового руху молекул одноатомного газу дорівнює енергії фотонів рентгенівських променів ( $\lambda=0,1$  нм)?
190. Один із результатів досліду А. Г. Столетова був сформульований так: «Розрядну дію мають промені з найвищим показником заломлення, довжина яких менша за 295 нм». На основі цього знайти роботу виходу електронів з поверхні молібдену.
191. Чи буде спостерігатися фотоелектричний ефект у літій, якщо його освітлювати монохроматичним світлом з довжиною хвилі 589 нм?
192. Визначити червону межу фотоелектричного ефекту для платини, срібла, вольфраму, танталу та цезію.
193. Червона межа фотоелектричного ефекту для заліза, ртуті, літій, натрію, калію визначається відповідно довжинами хвиль: 262, 274, 517, 540, 620 нм. Знайти роботу виходу електронів з цих металів і виразити її в електрон-вольтах.
194. На поверхню металу падають  $\gamma$ -промені ( $\lambda = 1,2$  пм). Порівняно з енергією  $\gamma$ -фотонів, робота виходу настільки мала, що нею можна знехтувати. Якою буде швидкість вилітаючих електронів, якщо обчислити її за рівнянням Ейнштейна для фотоелектричного ефекту? Чим пояснити отриманий результат?
195. Яка максимальна швидкість електронів, що вилітають з поверхні молібдену при освітленні його променями з довжиною хвилі 200 нм?
196. Якої довжини електромагнітну хвилю слід направити на поверхню цинку, щоб максимальна швидкість електронів, що вилітають з металу, становила 0,8 Мм/с?

197. На поверхню нікелю падає монохроматичне світло ( $\lambda = 200$  нм). Червона межа фотоефекту для нікелю - 248 нм. Визначити енергію падаючого фотона, роботу виходу електронів, максимальну кінетичну енергію електронів і їхню швидкість.
198. Червона межа фотоефекту для платини становить приблизно 198 нм. Якщо платину прокалити при високій температурі, то червона межа фотоефекту зміниться на 220 нм. Наскільки електрон-вольт прокалювання зменшує роботу виходу електронів?
199. На незаряджену металеву пластинку, приєднану до електрометра, направили пучок рентгенівських променів. Коли пластинка зарядилася до потенціалу 124 В, випромінювання електронів припинилося. Визначити довжину хвилі рентгенівських променів. Роботою виходу електронів можна знехтувати.
200. Червона межа фотоефекту рубідію - 810 нм. Яку затримуючу напругу потрібно прикласти до фотоелемента, щоб жоден з електронів, випромінюваних рубідієм під дією ультрафіолетових променів з довжиною хвилі 100 нм, не зміг подолати затримуюче поле?
201. Ізольована металева пластинка освітлюється світлом з довжиною хвилі 450 нм. Робота виходу електронів з металу - 2 еВ. До якого потенціалу зарядиться пластинка при безперервній дії світла?
202. Фотоелектрони, вирвані з поверхні деякого металу світлом з частотою  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, повністю затримуються потенціалом 6,6 В, а вирвані світлом з частотою  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц потенціалом 16,5 В. Знайти постійну Планка.
203. У класичних дослідах П. М. Лебедева з експериментального визначення світлового тиску потік променистої енергії спрямовується на кришечки дуже чутливих крутильних терезів. Обчислити тиск, який відчували закріплені та дзеркальні кришечки вимірювальної установки, якщо потік падаючої світлової енергії дорівнює  $1,05$  кДж/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ).

204. 2. Густина потоку світлової енергії на поверхні становить  $7 \text{ кВт/м}^2$ . Знайти світловий тиск для випадків, коли поверхня: повністю відбиває всі промені; повністю поглинає всі промені, що падають на неї.
205. 3. Тиск випромінювання на плоске дзеркало становить  $0,2 \text{ Па}$ . Визначити інтенсивність світла, що падає на поверхню дзеркала з коефіцієнтом відбиття  $0,6$ . Вважати, що світловий потік падає нормально на поверхню дзеркала.
206. 4. Астроном Ф. А. Бредіхін пояснив форму хвостів комет тиском сонячного світла. Знайти: світловий тиск сонячного випромінювання на абсолютно чорне тіло, розташоване на тій самій відстані від Сонця, що й Земля; яку масу повинна мати частинка в хвості комети, розташована на цій відстані, щоб сила світлового тиску на неї урівноважувалась силою тяжіння з боку Сонця. Площа частинки, що відбиває всі промені, які на неї падають, вважати рівною  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ , а сонячну сталу - тобто променисту енергію, яку Сонце щоденно посилає через поверхню площею  $1 \text{ м}^2$ , розташовану перпендикулярно до сонячних променів і знаходиться поблизу Землі за межами її атмосфери -  $C = 1,4 \text{ кВт/м}^2$ .
207. 5. Світловий потік потужністю  $N = 9 \text{ Вт}$  нормально падає на поверхню площею  $S = 10 \text{ см}^2$ , коефіцієнт відбиття якої  $\rho = 0,8$ . Який тиск відчуває при цьому дана поверхня?
208. 6. На поверхню площею  $S = 10 \text{ см}^2$  падає пучок фотонів інтенсивністю  $n = 10^{16} \text{ с}^{-1}$ . Довжина хвилі падаючого світла  $\lambda = 500 \text{ нм}$ . Визначити світловий тиск на поверхню, якщо коефіцієнт відбиття поверхні  $\rho = 0,7$ .
209. 7. Електрична лампа розрахована на потужність  $N = 45 \text{ Вт}$ . Обчислити тиск променистої енергії на дзеркальну поверхню з коефіцієнтом відбиття  $\rho = 1$ , розташовану нормально до падаючих променів на відстані  $r = 1 \text{ м}$  від лампи.
210. 8. Невелика електрична дуга, яка витрачає на випромінювання потужність  $N = 600 \text{ Вт}$ , розташована в центрі кривизни ввігнутого дзеркала

площею  $S = 300 \text{ см}^2$ . Припускаючи, що дуга випромінює рівномірно в усіх напрямках, визначити силу тиску світла на дзеркало. Радіус кривизни дзеркала  $r = 10 \text{ см}$ ; дзеркало вважати ідеально відбивним.

211. 9. Колба електричної лампи являє собою сферу радіусом  $r = 3 \text{ см}$ . Частина стінки колби зсередини посріблена. Лампа споживає потужність  $N = 60 \text{ Вт}$ , 80% якої витрачається на випромінювання. Визначити, у скільки разів тиск газу в колбі ( $p_g = 13,3 \text{ кПа}$ ) менший за світловий тиск на посріблену частину стінки колби з коефіцієнтом відбиття  $\rho' = 0,8$ .

212. 10. Визначити діаметр кулеподібного супутника, що рухається навколо Землі, якщо сила тиску сонячного світла на супутник дорівнює  $11,2 \text{ мН}$ , коефіцієнт відбиття світла від поверхні супутника  $\rho' = 1$ , сонячна стала  $S = 1,4 \text{ кВт/м}^2$  (див. задачу 31.32). Поглинання сонячного світла в атмосфері знехтувати.

213. Визначити швидкість електрона в рентгенівській трубці, який пройшов різницю потенціалів  $10 \text{ кВ}$ .

214. Найменша довжина хвилі суцільного спектра рентгенівських променів, отриманого внаслідок гальмування електронів на антикатоді рентгенівської трубки,  $\lambda = 0,5 \text{ нм}$ . Яка найбільша швидкість електронів?

215. Антикато́д рентгенівської трубки бомбардується електронами зі швидкістю  $100 \text{ Мм/с}$ . Визначити максимальну частоту випромінювання в суцільному рентгенівському спектрі з урахуванням залежності релятивістської маси електрона від його швидкості.

216. Найменша довжина хвилі рентгенівських променів, отриманих від трубки, яка працює при напрузі  $40 \text{ кВ}$ , дорівнює  $31 \text{ пм}$ . Обчислити за цими даними сталу Планка.

217. Рентгенівська трубка працює при напрузі  $30 \text{ кВ}$ . Знайти найменше значення довжини хвилі рентгенівського випромінювання.

218. Відомо, що ефект Комптона спостерігається при розсіюванні фотонів на вільних електронах. Які електрони в речовині можна вважати вільними? Чому ефект Комптона не спостерігається при розсіюванні видимого світла?

219. У теорії ефекту Комптона зміна довжини хвилі при розсіюванні виявляється незалежною від природи розсіювальної речовини. Чи є цей висновок строгим?
220. Знайти зміну довжини хвилі світла при його розсіюванні під кутом  $90^\circ$  на вільних протонах, які спочатку перебували в стані спокою.
221. Обчислити комптонівське зміщення та відносну зміну довжини хвилі для видимого світла ( $\lambda = 500$  нм) і  $\gamma$ -променів ( $\lambda = 5$  пм) при розсіюванні на вільних електронах, які спочатку перебували в стані спокою. Кут розсіювання  $90^\circ$ .
222. Фотон при зіткненні з релятивістським електроном розсіявся під кутом  $60^\circ$ , а електрон втратив майже всю кінетичну енергію. Знайти зміну довжини хвилі фотона при розсіюванні, якщо до зіткнення він мав енергію  $0,51$  МеВ.
223. Визначити максимальні комптонівські зміни довжини хвилі при розсіюванні фотонів на вільних електронах і ядрах атомів водню, які спочатку перебували в стані спокою.
224. Рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі  $56,3$  пм розсіюється графітовою плиткою. Визначити довжину хвилі променів, розсіяних під кутом  $120^\circ$  до початкового напрямку рентгенівських променів.
225.  $\gamma$ -промені з довжиною хвилі  $2,7$  пм зазнають комптонівського розсіювання. У скільки разів довжина хвилі випромінювання, розсіяного під кутом  $180^\circ$  до початкового напрямку, більша за довжину хвилі падаючого випромінювання?
226. Фотон жорсткого рентгенівського випромінювання ( $\lambda = 24$  пм) при зіткненні з вільним електроном передав йому  $9\%$  своєї енергії. Визначити довжину хвилі розсіяного рентгенівського випромінювання.
227. Зміна довжини хвилі рентгенівських променів при комптонівському розсіюванні становить  $2,4$  пм. Обчислити кут розсіювання та енергію, передану електрону віддачі, якщо довжина хвилі рентгенівських променів до взаємодії  $10,0$  пм.

228. Яку енергію набуває комптонівський електрон при розсіюванні фотона під кутами  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $180^\circ$ , якщо довжина хвилі падаючого фотона - 3 пм?
229. Фотон з енергією  $E = 0,75$  МеВ розсіявся на вільному електроні під кутом  $\theta = 60^\circ$ . Знайти енергію розсіяного фотона  $E'$ , кінетичну енергію та імпульс електрона віддачі. Кінетичною енергією електрона до зіткнення знехтувати.
230. Рентгенівські промені з довжиною хвилі  $\lambda = 1,24$  пм проходять шар заліза товщиною  $d = 1,5$  см. У скільки разів зменшиться інтенсивність рентгенівських променів? Масовий коефіцієнт поглинання заліза для цієї довжини хвилі  $\mu_m = 5,6 \times 10^4$  м<sup>2</sup>/кг.
231. Яка температура печі, якщо відомо, що з отвору в ній площею 4 см<sup>2</sup> за 1 с випромінюється енергія 22,7 Дж? Випромінювання вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла.
232. Земля внаслідок випромінювання в середньому щохвилини втрачає з поверхні площею 1 м<sup>2</sup> енергію 5,4 кДж. За якої температури абсолютно чорне тіло випромінювало б таку ж енергію?
233. Обчислити енергію, що випромінюється з поверхні Сонця площею 1 м<sup>2</sup> за 1 хв, прийнявши температуру його поверхні рівною 5800 К. Вважати, що Сонце випромінює як абсолютно чорне тіло.
234. Знайти потужність, яку випромінює абсолютно чорна куля радіусом 10 см, що знаходиться в кімнаті при температурі 20 °С.
235. Температура абсолютно чорного тіла становить 127 °С. Після підвищення температури сумарна потужність випромінювання збільшилася в 3 рази. На скільки підвищилася при цьому температура?
236. Котел з водою при температурі 97 °С випромінює енергію на руку спостерігача, поверхня якої має температуру 27 °С. У скільки разів більше енергії отримає тіло при температурі 0 °С за той самий час і на тій самій відстані? Випромінювання вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла.

237. Яку енергію випромінює протягом доби кам'яна оштукатурена будівля з поверхнею загальною площею  $1000 \text{ м}^2$ , якщо температура випромінюючої поверхні  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Відношення енергетичної світності кам'яної оштукатуреної будівлі до абсолютно чорного тіла для даної температури  $k = 0,8$ .
238. Сталева болванка, температура якої  $127 \text{ }^\circ\text{C}$ , випромінює за  $1 \text{ с}$   $4 \text{ Дж}$  енергії з поверхні площею  $1 \text{ см}^2$ . Визначити відношення енергетичної світності сталевий болванки до енергетичної світності абсолютно чорного тіла при даній температурі, вважаючи, що воно однакове для всіх тіл.
239. Знехтувавши втратами на теплопровідність, знайти потужність електричного струму, необхідну для розжарювання нитки діаметром  $1 \text{ мм}$  і довжиною  $20 \text{ см}$  до температури  $2500 \text{ К}$ . Вважати, що нитка випромінює як абсолютно чорне тіло і в усталеному режимі все тепло, що виділяється в нитці, втрачається через випромінювання.
240. Площа поверхні вольфрамової нитки розжарювання вакуумної лампи потужністю  $25 \text{ Вт}$  -  $0,403 \text{ см}^2$ , а її температура -  $2177 \text{ }^\circ\text{C}$ . У скільки разів менше енергії випромінює лампа, ніж абсолютно чорне тіло з такою ж площею поверхні при тій самій температурі? Вважати, що в усталеному режимі все тепло, що виділяється в нитці, втрачається через випромінювання.
241. Сонячна стала  $C = 1,4 \text{ кВт/м}^2$  (див. задачу -тиск світла №4). Вважаючи, що Сонце випромінює як абсолютно чорне тіло, визначити температуру його випромінюючої поверхні.
242. Абсолютно чорна пластинка, що знаходиться поблизу Землі за межами її атмосфери, освітлюється променями, які падають на неї перпендикулярно. Визначити усталену температуру пластинки, якщо сонячна стала  $C = 1,4 \text{ кВт/м}^2$  (див. задачу -тиск світла №4).
243. Залізна куля діаметром  $10 \text{ см}$ , нагріта до температури  $1227 \text{ }^\circ\text{C}$ , охолоджується на відкритому повітрі. Через який час її температура знизиться до  $1000 \text{ К}$ ? При розрахунку прийняти, що відношення енергетичної

світності заліза до абсолютно чорного тіла - 0,5. Теплопровідністю повітря знехтувати.

244. При стисканні у вакуумі тонкої вольфрамової нитки сильним електричним струмом на мить виникає дуже висока температура. Довжина хвилі, при якій випромінювальна здатність цієї нитки максимальна, становить 145,0 нм. Визначити температуру нитки розжарювання в момент її стискання.

245. У якій області спектра лежить довжина хвилі, що відповідає максимальній випромінювальній здатності Сонця, якщо температура його поверхні - 5800 К?

246. Температура поверхні зорі - 12 000 К. Чи можна визначити цю температуру за законом зміщення Віна, якщо максимум випромінювальної здатності припадає на довжину хвилі коротшу за 290 нм?

247. Скільки енергії випромінює абсолютно чорне тіло за 1 с з світної поверхні площею 1 см<sup>2</sup>, якщо максимум випромінювальної здатності припадає на довжину хвилі 725,0 нм?

248. Температура абсолютно чорного тіла змінюється від 727 до 1727 °С. У скільки разів зміниться при цьому енергія, яку випромінює тіло?

249. У випромінюванні абсолютно чорного тіла максимум випромінювальної здатності припадає на довжину хвилі 680 нм. Скільки енергії випромінює це тіло площею 1 см<sup>2</sup> за 1 с і якою буде втрата його маси за 1 с внаслідок випромінювання?

250. Довжина хвилі, що відповідає максимуму випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, становить 720,0 нм, площа випромінюючої поверхні - 5,0 см<sup>2</sup>. Визначити потужність випромінювання.

251. У скільки разів збільшиться потужність випромінювання абсолютно чорного тіла, якщо максимум випромінювальної здатності зміститься з 700,0 до 600,0 нм?

252. Під час роботи електричної лампи розжарювання вольфрамовий волосок нагрівся, внаслідок чого довжина хвилі, на яку припадає максимум

випромінювальної здатності, змінилася з 1,4 до 1,1 мкм. У скільки разів при цьому збільшилася максимальна випромінювальна здатність, якщо прийняти його за абсолютно чорне тіло? Наскільки змінилася при цьому температура волоска?

253. Температура абсолютно чорного тіла змінилася при нагріванні з 1327 до 1727 °С. Наскільки змінилася при цьому довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності, і у скільки разів збільшилася максимальна випромінювальна здатність?

## Хвильові властивості речовини

Основні співвідношення квантової теорії.

Довжина хвилі де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Принцип невизначеності Гейзенберга:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2},$$

де:  $\Delta p_x$  - невизначеність проекції імпульсу частинки на вісь  $x$ ,  $\Delta x$  невизначеність її координати,  $\Delta E$  - невизначеність енергії даного квантового стану,  $\Delta t$  - час перебування системи в цьому стані.

Рівняння Шредінгера:

$$-\frac{\hbar}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t},$$

де:  $m$  - маса частинки,  $\hbar$  - зведена стала Планка,  $\psi(x, y, z, t)$  - повна хвильова функція,  $U$  - потенціальна енергія частинки.

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$$

Хвильова функція відповідає умовам нормування:

$$\int \psi^* \psi dV = 1$$

Закон Мозлі:

$$w = \frac{3}{4} R^* (Z - \sigma)^2$$

Де  $R^* = 2 \pi c R$ ,  $R$  - постійна Рідберга,  $Z$  - порядковий номер елемента з якого виготовлено антикатод,  $\sigma$  - уточнення, рівне для легких елементів одиниці.

255. Швидкість так званих теплових нейтронів, середня кінетична енергія яких близька до середньої енергії атомів газу при кімнатній температурі, становить 2,5 км/с. Знайти довжину хвилі де Бройля для таких нейтронів.
256. У телевізійній трубці проєкційного типу електрони розганяються до швидкості  $10^8$  м/с. Визначити довжину хвилі катодних променів без урахування та з урахуванням залежності маси від швидкості.
257. Обчислити довжину хвилі де Бройля для протона з кінетичною енергією 100 еВ.
258. Знайти довжину хвилі де Бройля для  $\alpha$ -частинки, нейтрона та молекули азоту, що рухаються із середньоквадратичною швидкістю при температурі 25 °С.
259. Обчислити кінетичну енергію електрона, молекули кисню та частинки з радіусом 0,1 мкм і густиною 2000 кг/м<sup>3</sup>, якщо кожній з цих частинок відповідає довжина хвилі де Бройля 100 нм.
260. Електрон пройшов прискорюючу різницю потенціалів 510 кВ. Визначити довжину хвилі де Бройля з урахуванням релятивістських ефектів.
261. При гальмуванні електронів на антикатоді рентгенівської трубки виникає гальмівний рентгенівський спектр з короткохвильовою межею  $\lambda_0 = 10^{-10}$  м. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, вважаючи його релятивістським.
262. Якою кінетичною енергією володіє протон з довжиною хвилі де Бройля, рівною граничній довжині хвилі рентгенівських променів, що виникають у трубці при різниці потенціалів  $U = 40$  еВ?
263. На грань кристала нікелю падає під кутом  $\varphi = 64^\circ$  до поверхні грані паралельний пучок електронів, що рухаються з однаковою швидкістю. Прийняти відстань між відповідними площинами, паралельними грані кристала,  $d = 200$  нм. Користуючись рівнянням Вульфа — Брега, знайти швидкість електронів, якщо вони зазнають інтерференційного відбиття 1-го порядку.

264. Електронний пучок із сталою швидкістю падає на поверхню фториду літію LiF. Знайти прискорюючу різницю потенціалів, при якій спостерігається другий дифракційний максимум під кутом  $\varphi = 1^\circ 30'$ . Вважати відстань між відповідними атомними площинами  $d = 380$  пм.
265. Невизначеність швидкості електронів, що рухаються вздовж осі абсцис, становить  $\Delta v = 10^2$  м/с. Якою буде при цьому невизначеність координати  $x$ , що визначає місцеположення електрона?
266. Молекули водню беруть участь у тепловому русі при  $T = 300$  К. Знайти невизначеність координати  $\Delta x$  молекул водню.
267. Яка невизначеність швидкості електрона в атомі водню? У скільки разів знайдене значення швидкості більше за швидкість електрона на першій борівській орбіті? Вважати, що найбільша похибка у визначенні координати електрона буде того ж порядку, що й розмір атома водню ( $\approx 10^{-10}$  м).
268. Користуючись умовами задачі 32.14, оцінити довжину хвилі де Бройля електрона в атомі водню.
269. Тривалість збудженого стану атома водню відповідає приблизно  $\tau = 10^{-7}$  с. Яка невизначеність енергії в цьому стані?
270. Найменша невизначеність, з якою можна знайти координату електрона в атомі водню, порядку  $10^{-10}$  м. Знайти відповідну величину кінетичної енергії електрона в незбудженому атомі водню.
271. 1 Знайти довжину хвилі  $K\alpha$ -лінії алюмінію.
272. 2. Якщо відомо, що довжина хвилі  $K\alpha$ -лінії заліза дорівнює 193 пм, обчислити довжину хвилі  $K\alpha$ -лінії міді.
273. 3. Скільки елементів міститься в ряді між тими, у яких довжини хвиль  $K\alpha$ -ліній становлять 193 пм і 154 пм?
274. 4. Визначити інтервал довжин хвиль між  $K\alpha$ -лінією та короткохвильовою межею суцільного рентгеновського спектра з мідним антикатодом при напрузі 20 кВ.

275. 5. Приймаючи для молибдену поправку  $\sigma = 1$ , знайти, при якій найменшій напрузі на рентгенівській трубці з молибденовим катодом проявляться лінії серії  $K\alpha$ .

## Модель атома Резерфорда - Бора

Момент імпульсу електрона, що рухається навколо ядра, кратний  $\hbar$ :

$$L = m \cdot v_k \cdot r_k = k \cdot \hbar,$$

де  $m$  - маса електрона,  $v_k$  - його швидкість на  $k$ -й орбіті,  $r_k$  - радіус цієї орбіти,  $k=1,2,3,\dots$  - ціле додатне число (головне квантове число).

Енергія світлового фотона дорівнює різниці енергій тих стаціонарних станів, між якими здійснюється квантовий перехід електрона:

$$\hbar \cdot \omega = E_n - E_k,$$

де  $E_n$  - енергія електрона на орбіті  $n$ ,  $E_k$  — його енергія на орбіті  $k$ ,  $\omega$  — частота випромінювання.

Якщо  $E_n > E_k$ , фотон випромінюється; при  $E_n < E_k$  спостерігається поглинання фотона з частотою  $\omega$ .

Дозволені значення внутрішньої енергії воднеподібного атома:

$$E_k = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{Z^2}{k^2}.$$

276. Користуючись уявленнями моделі атома Резерфорда — Бора, вивести формулу швидкості руху електрона по орбіті. Обчислити його швидкість на двох перших кругових електронних орбітах в атомі водню.
277. Електрон рухається по другій орбіті атома водню. Знайти довжину хвилі де Бройля.
278. Стаціонарна електронна орбіта є стійким станом. Користуючись умовами квантування, вивести формулу радіуса дозволеної електронної орбіти. Знайти радіуси двох перших орбіт електрона в атомі водню.
279. За допомогою умов квантування вивести формулу доцентрового прискорення електрона на орбіті. Знайти його прискорення на двох перших орбітах в атомі водню.
280. На якій орбіті швидкість електрона в атомі водню дорівнює 734 км/с?
281. Визначити для першої та другої кругових орбіт атома водню значення сили кулонівського притягання та напруженості електричного поля.
282. У скільки разів збільшиться радіус орбіти електрона в атомі водню, що перебуває в основному стані, при його збудженні фотоном з енергією 12,09 еВ?
283. Атом водню випромінює фотон з частотою  $\nu$ . Знайти зміну довжини хвилі фотона, що виникає внаслідок віддачі, яку зазнає атом при випромінюванні.
284. Фотон з частотою  $\omega$  поглинається нерухомим атомом масою  $m_0$ . Знайти швидкість атома після поглинання фотона.
285. Перехід електрона в атомі водню з  $n$ -ї на  $k$ -ту орбіту ( $k = 1$ ) супроводжується випромінюванням фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 102,6$  нм. Знайти радіус  $n$ -ї орбіти.
286. Атом водню переведено з нормального стану у збуджений, що характеризується головним квантовим числом 2. Знайти енергію, необхідну для переведення атома водню у вказаний збуджений стан.

287. Кожній дозволений електронній орбіті відповідає певний енергетичний рівень, енергія якого може бути представлена у вигляді суми потенціальної енергії  $E_p$  та кінетичної  $E_k$  електрона. Вивести формулу повної енергії електрона на орбіті.
288. Незважаючи на успіх моделі атома Резерфорда — Бора, вона має низку недоліків. Крім того, в ній містяться деякі довільні припущення, які довелося ввести для пояснення експериментальних результатів. Згідно з де Бройлем, електрону відповідає хвиля з довжиною  $\lambda = h/(mv)$ . Визначити довжини хвиль де Бройля електрона на першій і третій орбітах в атомі водню. Показати, що на електронних орбітах атома водню укладається ціле число хвиль де Бройля.
289. Визначити межі серії водневих ліній, розташованих у далекій ультрафіолетовій частині спектра (серія Лаймана).
290. Визначити енергію фотона, що відповідає найменшій довжині хвилі в ультрафіолетовій серії водню.
291. Знайти довжини хвиль першої, другої та третьої ліній видимої серії водню (серія Бальмера).
292. Яка довжина хвилі четвертої за порядком спектральної лінії в інфрачервоній області спектра водню (серія Пашена)?
293. Експериментально встановлено, що друга спектральна лінія водневої серії Брекетта відповідає довжині хвилі 2,63 мкм. На основі цих даних встановити наближене значення сталої Рідберга.
294. Найбільша довжина хвилі спектральної водневої лінії серії Лаймана 121,6 нм. Обчислити найбільшу довжину хвилі в серії Бальмера.
295. При переході електрона водневого атома з однієї з можливих орбіт на іншу, ближчу до ядра, енергія атома зменшується на 1,892 еВ. Визначити довжину хвилі випромінювання.
296. Яку роботу потрібно виконати, щоб видалити електрон з другої орбіти атома водню за межі притягання його ядром?

297. Атом водню переведено з нормального стану у збуджений, що характеризується головним квантовим числом 3. Які спектральні лінії можуть з'явитися в спектрі водню при переході атома із збудженого стану в нормальний?

298. Які спектральні лінії з'являться у видимій області спектра при збудженні атомів водню електронами з енергією 13,0 еВ?

**299.** Атом водню освітлюється ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 91,2 нм. Визначити, які спектральні лінії з'являться в спектрі водню.

### Фізика ядра атома:

$$R = 1,23 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ м.}$$

Енергія зв'язку ядра:

$$E_{зв} = \Delta m \cdot c^2.$$

Дефект маси ядра:

$$\Delta = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - \frac{A}{Z} m_{я},$$

де:  $Z$  - зарядове число (кількість протонів),  $m_p$  - маса протона,  $m_n$  - маса нейтрона,  $m_{я}$  - маса нуклона в ядрі (середня).

Якщо брати не масу ядра  $\frac{A}{Z} m_{я}$ , а масу атома  $\frac{A}{Z} m_a$ , і замість маси протона  $m_p$  - масу атома гідрогену  $m_H$ , то:

$$\Delta m = Z m_H + (A - Z) m_n - \frac{A}{Z} m_a.$$

Закон радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

де:  $N_0$  — кількість радіоактивних атомів у початковий момент часу  $t=0$ ,  $N$  - кількість атомів у момент часу  $t$ ,  $\lambda$  - стала радіоактивного розпаду.

Період напіврозпаду:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

де  $\lambda$  - стала розпаду.

Активність радіоактивного препарата:

$$a = a_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

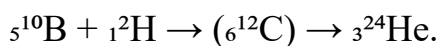
де  $a_0$  - початкова активність.

300. Скільки протонів і нейтронів міститься в ядрах ізотопів вуглецю:  $^{10}_6\text{C}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ ;  $^{13}_6\text{C}$ ;  $^{14}_6\text{C}$ ;  $^{15}_6\text{C}$ ;  $^{16}_6\text{C}$ ;  $^{17}_6\text{C}$ ?
301. У скільки разів радіус ядра урану  $^{238}_{92}\text{U}$  більший за радіус ядра атома водню?
302. Знайти густину ядерної речовини. Вважати, що в ядрі з масовим числом  $A$  усі нуклони (нейтрони і протони) щільно упаковані в межах його радіуса.
303. Радіус Сонця - 6,95 Мм, а середня густина - 1410 кг/м<sup>3</sup>. Яким був би радіус Сонця, якщо при тій самій масі його густина дорівнювала б густині ядерної речовини?
304. Обчислити енергію зв'язку ядра бору  $^{11}_5\text{B}$ .
305. Енергія зв'язку дейтрона (ядра важкого водню)  $^2_1\text{H}$  - 2,2 МеВ. Визначити масу ядра і масу нейтрального атома в атомних одиницях маси.
306. Обчислити енергію зв'язку ядер  $^2_1\text{H}$  і  $^3_2\text{He}$ . Яке з цих ядер є більш стійким?
307. Знайти енергію зв'язку ядер урану  $^{235}_{92}\text{U}$  і  $^{238}_{92}\text{U}$ . Яке з цих ядер є більш стійким?
308. Обчислити енергію зв'язку, що припадає на один нуклон, у ядрі берилію  $^9_4\text{Be}$ .
309. Порівняти енергію зв'язку, що припадає в середньому на один нуклон, у ядрах дейтерію  $^2_1\text{H}$ , заліза  $^{56}_{26}\text{Fe}$ , ксенону  $^{131}_{54}\text{Xe}$  та урану  $^{238}_{92}\text{U}$ .
310. Зразок містить 1000 радіоактивних атомів з періодом напіврозпаду  $T$ . Скільки атомів залишиться через проміжок часу  $T/2$ ?
311. Зразок радіоактивного радону  $^{222}_{86}\text{Rn}$  містить  $10^{10}$  радіоактивних атомів з періодом напіврозпаду 3,825 доби. Скільки атомів розпадається за одну добу?
312. Визначити сталу радіоактивного розпаду радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Яка частка від початкової кількості атомів розпадеться за 3100 років?
313. Через який час у препараті полонію  $^{210}_{84}\text{Po}$  розпадеться 75,0% наявних атомів, якщо радіоактивні продукти розпаду постійно видаляються?

314. За який час відбудеться розпад полонію  $^{210}_{84}\text{Po}$  масою 2 мг, якщо на початку його маса становить 0,2 г?
315. Визначити період напіврозпаду вісмуту  $^{213}_{83}\text{Bi}$ , якщо відомо, що вісмут масою 1,0 г випромінює  $4,58 \cdot 10^{15}$   $\beta$ -частинок за 1 с.
316. Скільки ядер розпадається за 1 с у препараті радіоактивного ізотопу іридію  $^{192}_{77}\text{Ir}$  і скільки атомів цього препарату залишиться через 30,0 діб, якщо початкова його маса дорівнює 5,0 г?
317. Скільки  $\alpha$ -частинок випромінює торій  $^{232}_{90}\text{Th}$  масою 1 г за 1 с?
318. Радіоактивний препарат з активністю  $3,7 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$  поміщено в калориметр теплоємністю 4,19 Дж/К. Знайти підвищення температури в калориметрі за 1 годину, якщо відомо, що це радіоактивна речовина випромінює  $\alpha$ -частинки з енергією 5,3 МеВ.
319. Скільки ядер розпадається за 1 с у шматку урану  $^{238}_{92}\text{U}$  масою 1,0 кг? Яка активність цього урану?
320. Флуоресцентний екран площею  $0,03 \text{ см}^2$  знаходиться на відстані 1 см від порошинки радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$  масою 18 пг. Скільки спалахів за 1 хвилину виникне на екрані?
321. Частинка, що містить радій  $^{226}\text{Ra}$  знаходиться на відстані 1,2 см від флуоресцентного екрана. Яку масу має ця частинка, якщо протягом 1 хвилини на площі екрана  $0,602 \text{ см}^2$  зареєстровано 47 сцинтиляцій? (Продукти розпаду дуже швидко відкачуються насосом.)
322. Пацієнту внутрішньовенно ввели розчин об'ємом  $1 \text{ см}^3$ , що містить штучний радіоізоотоп натрію  $^{24}\text{Na}$  з активністю  $a_0 = 2000 \text{ с}^{-1}$ . Активність крові об'ємом  $1 \text{ см}^3$ , взятої через 5 годин, виявилася  $a = 0,27 \text{ с}^{-1}$ . Визначити об'єм крові людини.
323. Родовища радіоактивних елементів завжди супроводжуються свинцем, який є кінцевим продуктом їх розпаду. Відомо, що торієвий ряд закінчується ізотопом свинцю  $^{208}\text{Pb}$ . Вважаючи вік торієвої руди  $4 \cdot 10^9$  років, визначити, скільки свинцю  $^{208}\text{Pb}$  утворилося в цій руді на 1 кг торію  $^{232}\text{Th}$ , що там знаходився.

324. Елемент торій  $^{232}\text{Th}$  у результаті радіоактивного розпаду перетворюється на ізоотоп свинцю  $^{208}\text{Pb}$ . Скільки  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок випромінюється при цьому кожним атомом?
325. Радіоактивний елемент нептуній  $^{241}\text{Np}$ , родоначальник штучно отриманого радіоактивного ряду нептунію, у результаті розпаду перетворюється на стабільний ізоотоп вісмуту  $^{209}\text{Bi}$ . Знайти кількість  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів.
326. Радіоактивний ізоотоп кремнію  $^{27}\text{Si}$  розпадається, перетворюючись на алюміній  $^{27}\text{Al}$ . Яка частинка при цьому випромінюється?
327. У який елемент перетворюється уран  $^{238}\text{U}$  після трьох  $\alpha$ - і двох  $\beta$ -перетворень?
328. Речовина радіоактивного елемента, зазнавши ряду перетворень, втратила одну  $\alpha$ - і дві  $\beta$ -частинки та перетворилася на ядро урану  $^{234}\text{U}$ . Знайти початковий радіоактивний елемент.
329. У який елемент перетворюється радій  $^{226}\text{Ra}$  після п'яти  $\alpha$ - і чотирьох  $\beta$ -розпадів?
330. Радій масою 1 г випромінює за 1 с  $3,7 \cdot 10^{10}$   $\alpha$ -частинок зі швидкістю  $v = 15$  Мм/с. Знайти повну енергію, що виділяється при  $\alpha$ -розпаді за 1 годину.
331. При обстрілі  $\alpha$ -частинками ядра азоту  $^{14}\text{N}$  можливе захоплення такої частинки ядром атома. На мить утворюється надзвичайно нестійке ядро фтору, яке одразу розпадається і перетворюється на стійке ядро кисню. Ця ядерна реакція була вперше здійснена у 1919 році Резерфордом. Написати рівняння реакції та визначити, виділяється чи поглинається енергія при цій реакції. Знайти енергію, що виділяється або поглинається в результаті реакції.
332. Знайти енергію, що поглинається при ядерній реакції:
- $$^4_2\text{He} + ^9_4\text{Be} \rightarrow ({}^{13}_6\text{C}) \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}.$$
333. Ядро берилію  $^9_4\text{Be}$ , захоплюючи дейтрон, перетворюється на ядро бору  $^{10}_5\text{B}$ . Написати рівняння реакції та визначити енергію, що виділяється.

334. При обстрілі ядер бору  ${}^5_{10}\text{B}$  ядрами важкого водню  ${}^1_2\text{H}$  відбувається ядерна реакція:

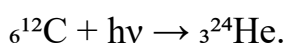
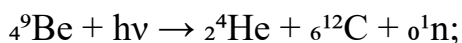


Визначити енергію, що виділяється при цьому перетворенні.

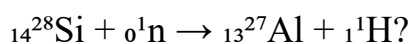
335. Ядро літію  ${}^3_7\text{Li}$ , захоплюючи протон, розпадається на дві  $\alpha$ -частинки. Написати ядерну реакцію та визначити енергію, що виділяється при цій реакції.

336. Атоми літію  ${}^3_7\text{Li}$  бомбардуються протонами з кінетичною енергією 1 МеВ. Утворені при цьому дві  $\alpha$ -частинки летять з однаковою швидкістю. Визначити кінетичну енергію цих частинок.

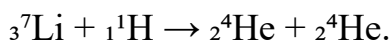
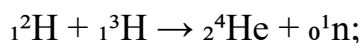
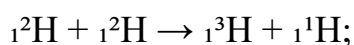
337. Визначити мінімальну енергію  $\gamma$ -квантів, необхідну для розщеплення ядер берилію та ядер вуглецю за реакціями:



338. Якою мінімальною кінетичною енергією повинен володіти нейтрон, щоб при зіткненні з ядром кремнію  ${}^{14}_{28}\text{Si}$  він міг викликати ядерну реакцію:



339. Знайти енергію, що виділяється при наступних термоядерних реакціях:



340. При опроміненні нейтронами атоми  ${}^{23}\text{Na}$  перетворюються на радіоактивний ізотоп  ${}^{24}\text{Na}$  з періодом напіврозпаду 15,3 год. Яка частка початкової маси радіоактивного натрію залишиться через 30,6 год після припинення опромінення нейтронами?

341. При опроміненні алюмінію  ${}^{27}\text{Al}$   $\alpha$ -частинками випромінюється нейтрон і утворюється ізотоп фосфору  ${}^{30}\text{P}$ . Утворений ізотоп фосфору є радіоактивним і розпадається з випромінюванням позитронів. Цю реакцію

утворення позитронно-активної речовини відкрив Фредерік Жоліо-Кюрі. Написати рівняння реакції та визначити енергію, що виділяється.

342. Ядро урану  $^{238}\text{U}$ , випромінюючи  $\alpha$ -частинку з енергією 4,2 МеВ, перетворюється на ядро торію  $^{234}\text{Th}$ . Визначити масу атома  $^{234}\text{Th}$ , якщо маса атома  $^{238}\text{U}$  дорівнює 238,05353 а.о.м., а маса атома  $^4\text{He}$  - 4,00260 а.о.м.

343. Визначити енергію, що виділяється при утворенні гелію масою 1 г з протонів і нейтронів.

344. Скільки енергії можна отримати при розщепленні урану  $^{235}\text{U}$  масою 1 г, якщо при розщепленні кожного ядра урану виділяється 200 МеВ енергії?

345. Скільки енергії виділяється при ядерному поділі урану  $^{235}\text{U}$  масою 1 кг в урановому реакторі? Скільки вугілля потрібно спалити для отримання такої ж кількості теплоти (теплотворна здатність вугілля - 29,3 МДж/кг)? Визначити, який вантаж можна було б підняти на висоту 5 км за рахунок енергії, що виділяється при реакції поділу. Вважати, що енергія, яка виділяється при поділі одного атома урану, становить 200 МеВ.

346. Енергія випромінювання Сонця виникає внаслідок ланцюга ядерних реакцій злиття, кінцевим результатом яких є перетворення чотирьох атомів водню в один атом гелію. Визначити, скільки води можна було б нагріти від  $0^\circ\text{C}$  до кипіння за рахунок перетворення 4 г водню на гелій.

347. Ядро урану  $^{235}\text{U}$  поглинає повільний нейтрон, що рухається з тепловою швидкістю. Написати рівняння реакції.

348. При  $\beta$ -розпаді кобальту  $^{60}\text{Co}$  утворюється стабільний нікель  $^{60}\text{Ni}$  і випромінюється електрон. Маса атома  $^{60}\text{Co}$  становить 59,93382 а.о.м.,  $^{60}\text{Ni}$  — 59,93078 а.о.м. Знайти енергію випромінюваного електрона.

## Елементарні частинки

Повна енергія релятивістської частинки:

$$E = m_0 \cdot c^2 + E_k,$$

де  $E_k$  — кінетична енергія частинки.

Імпульс релятивістської частинки:

$$p = \sqrt{E_k \cdot (E_k + 2m_0 \cdot c^2)}.$$

При розгляді зіткнення частинок корисно використовувати інваріантну величину:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = m_0^2 \cdot c^4,$$

де  $E$  і  $p$  — повна енергія та імпульс системи,  $m_0$  - маса спокою утвореної частинки.

349. Імпульси протонів дорівнюють  $1,0$  і  $10 \text{ Г} \cdot \text{еВ/с}$  ( $c$ - швидкість світла). Знайти їх кінетичні енергії.
350. Показати, що при зіткненні фотона з вільним електроном він не може передати йому всю свою енергію.
351. У результаті нееластичного зіткнення релятивістської частинки з кінетичною енергією  $E_k = m_0 \cdot c^2$  з такою ж частинкою, що перебуває у спокої відносно нерухомої системи відліку, утворюється складна частинка. Знайти масу спокою  $m_0'$  складної частинки.
352.  $\mu$ -мюон зазнає пружного лобового зіткнення з нерухомим електроном. Знайти кінетичну енергію електрона, якщо кінетична енергія  $\mu$ -мюона до зіткнення дорівнює  $E_k = 100 \text{ МеВ}$ .
353. Показати, що народження пари електрон — позитрон одним квантовим фотоном можливе лише у випадку, коли в реакції бере участь частинка з масою спокою  $m_1 \neq 0$ .
354. Процес анігіляції електрона  $e^-$  і позитрона  $e^+$  відбувається за схемою:
255.  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$
355. Визначити швидкість електрона, що пройшов різницю потенціалів  $1,0 \text{ МВ}$ .
356. Електрон з кінетичною енергією  $E_k = 300 \text{ МеВ}$  влетів у камеру Вільсона і залишив слід у вигляді дуги кола. Камера знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією  $B = 10 \text{ Тл}$ . Визначити радіус.
357. Радіус кривизни траєкторії електрона і позитрона, утворених у камері Вільсона фотоном з енергією  $6,00 \text{ МеВ}$ , дорівнює  $3,5 \text{ см}$ . Яка індукція магнітного поля, у якому знаходиться камера Вільсона?
358. Синхрофазотрон надає протонам кінетичну енергію  $10 \text{ ГеВ}$ . У скільки разів релятивістська маса протона більша за його масу спокою?
359. У магнітному полі циклотрон під дією різниці потенціалів між дуантами здійснює рух протонів. Скільки обертів вони повинні зробити, щоб їх маса зросла на  $5 \%$  порівняно з масою протонів у спокої? Між дуантами

протони завжди проходять при максимальній різниці потенціалів, що дорівнює 30 кВ.

360. У стінці атомного реактора є графітовий стрижень. Пояснити, чому через торець такого стрижня виходять лише повільні нейтрони.

## Молекулярна фізика та термодинаміка

### Рівняння стану ідеального газу (Менделєєва–Клапейрона)

Ідеальні гази підпорядковуються рівнянню стану Менделєєва–Клапейрона:

$$pV = (m/\mu) RT,$$

де  $p$  — тиск газу,  $V$  — його об'єм,  $T$  — термодинамічна температура,  $m$  — маса газу,  $\mu$  — молярна маса газу,  $R = 8,31441$  Дж/(моль·К) — газова стала; відношення  $\nu = m/\mu$  дає кількість молів газу.

За законом Дальтона тиск суміші газів дорівнює сумі їх парціальних тисків, тобто тих тисків, які мав би кожен із газів, якби він при даній температурі один заповнював весь об'єм.

### Основне рівняння кінетичної теорії газів

Основне рівняння кінетичної теорії газів:

$$p = (2/3) \bar{n} W_0 = (2/3) \bar{n} (m_0 \bar{v}^2 / 2),$$

де  $\bar{n}$  — число молекул в одиниці об'єму,  $W_0$  — середня кінетична енергія поступального руху однієї молекули,  $m_0$  — маса молекули,  $\sqrt{\bar{v}^2}$  — середня квадратична швидкість молекул.

Число молекул в одиниці об'єму (концентрація молекул):

$$\bar{n} = p / (kT),$$

де  $k = R/N_a = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — стала Больцмана,  $N_a = 6,022045 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — стала Авогадро.

Середня кінетична енергія поступального руху однієї молекули:

$$W_0 = (3/2) kT.$$

Середня квадратична швидкість молекул:

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{(3RT/\mu)} = \sqrt{(3kT/m_0)},$$

причому  $m_0 = \mu/N_a$ .

### Внутрішня енергія газу

Енергія теплового руху молекул (внутрішня енергія) газу:

$$W = (i/2) (m/\mu) RT,$$

де  $i$  — число ступенів вільності молекули.

### Теплоємності газів

Зв'язок між молярною  $C$  та питомою  $c$  теплоємностями:

$$C = \mu c.$$

Молярна теплоємність при постійному об'ємі:

$$C^{\text{ш}} = (i/2) R;$$

молярна теплоємність при постійному тиску:

$$C_p = C^{\text{ш}} + R.$$

Молярна теплоємність визначається числом ступенів вільності  $i$  молекул газу:

для одноатомного газу ( $i = 3$ ):  $C^{\text{ш}} = 12,5$  Дж/(моль·К),  $C_p = 20,8$  Дж/(моль·К);

для двоатомного газу ( $i = 5$ ):  $C^{\text{ш}} = 20,8$  Дж/(моль·К),  $C_p = 29,1$  Дж/(моль·К);

для багатоатомного газу ( $i = 6$ ):  $C^{\text{ш}} = 24,9$  Дж/(моль·К),  $C_p = 33,2$  Дж/(моль·К).

### Закон розподілу молекул за швидкостями (закон Максвелла)

Закон розподілу молекул за швидкостями (закон Максвелла) дозволяє знайти число молекул  $\Delta N$ , відносні швидкості яких лежать в інтервалі від  $u$  до  $u + \Delta u$ :

$$\Delta N = (4N/\sqrt{\pi}) e^{-u^2} u^2 \Delta u,$$

де  $u = v/v_n$  — відносна швидкість,  $v$  — дана швидкість молекули,  $v_n = \sqrt{(2RT/\mu)}$  — найбільш імовірна швидкість молекул,  $\Delta u$  — інтервал відносних швидкостей, малий порівняно зі швидкістю  $u$ .

Середня арифметична швидкість молекул:

$$\bar{v} = \sqrt{(8RT / \pi\mu)}.$$

## Барометрична формула

Барометрична формула дає закон убутання тиску газу з висотою в полі сили тяжіння:

$$p = p_0 \exp(-\mu gh / RT),$$

де  $p$  — тиск газу на висоті  $h$ ,  $p_0$  — тиск на висоті  $h = 0$ ,  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  — прискорення вільного падіння.

## Середня довжина вільного пробігу молекул

Середня довжина вільного пробігу молекул газу:

$$\bar{\lambda} = \bar{v} / \bar{z} = 1 / (\sqrt{2} \pi \sigma^2 n),$$

де  $\bar{v}$  — середня арифметична швидкість,  $\bar{z}$  — середнє число зіткнень кожної молекули з рештою в одиницю часу,  $\sigma$  — ефективний діаметр молекули,  $n$  — число молекул в одиниці об'єму.

Загальне число зіткнень усіх молекул в одиниці об'єму за одиницю часу:

$$Z = \bar{z}n/2.$$

## Явища перенесення

Маса, перенесена за час  $\Delta t$  при дифузії:

$$m = -D (\Delta\rho/\Delta x) \Delta S \Delta t,$$

де  $\Delta\rho/\Delta x$  — градієнт густини,  $D = \bar{v}\bar{\lambda}/3$  — коефіцієнт дифузії.

Імпульс, перенесений газом за час  $\Delta t$  (сила внутрішнього тертя):

$$F_{tr} = -\eta (\Delta v/\Delta x) \Delta S,$$

де  $\Delta v/\Delta x$  — градієнт швидкості течії газу,  $\eta = \bar{v}\rho\bar{\lambda}/3$  — динамічна в'язкість.

Кількість теплоти, перенесена за час  $\Delta t$  внаслідок теплопровідності:

$$Q = -\kappa (\Delta T/\Delta x) \Delta S \Delta t,$$

де  $\Delta T/\Delta x$  — градієнт температури,  $\kappa = \bar{v}c^w\rho\bar{\lambda}/3$  — теплопровідність.

## Перше начало термодинаміки

Перше начало термодинаміки:

$$dQ = dW + dA,$$

де  $dQ$  — кількість теплоти, отриманої газом,  $dW$  — зміна внутрішньої енергії газу,  $dA = p dV$  — робота, що здійснюється газом при зміні об'єму.

Зміна внутрішньої енергії газу:

$$dW = (i/2) (m/\mu) R dT.$$

Повна робота, що здійснюється при зміні об'єму газу:

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

Робота при ізотермічному процесі:

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

### **Адіабатний процес. Рівняння Пуассона**

Тиск газу та його об'єм при адіабатному процесі пов'язані рівнянням Пуассона:

$$pV^\kappa = \text{const}, \quad \text{тобто} \quad p_1/p_2 = (V_2/V_1)^\kappa,$$

де показник адіабати  $\kappa = C_p/C_v$ . Рівняння Пуассона також записується у вигляді:

$$TV^{\kappa-1} = \text{const}, \quad \text{тобто} \quad T_1/T_2 = (V_2/V_1)^{\kappa-1},$$

або:

$$Tp^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \text{const}.$$

Робота при адіабатному процесі:

$$A_{ae} = (RT_1 m)/(\mu(\kappa-1)) [1 - (V_1/V_2)^{\kappa-1}] = p_1 V_1 (T_1 - T_2) / ((\kappa-1)T_1).$$

### **Політропний процес**

Рівняння політропного процесу:

$$pV^n = \text{const}, \quad \text{або} \quad p_1 V_1^n = p_2 V_2^n,$$

де  $n$  — показник політропи ( $1 < n < \kappa$ ).

### ККД теплової машини

Коефіцієнт корисної дії теплової машини:

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1,$$

де  $Q_1$  — теплота від нагрівача,  $Q_2$  — теплота, відданого холодильнику.

Для ідеального циклу Карно:

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1,$$

де  $T_1$  та  $T_2$  — термодинамічні температури нагрівача та холодильника.

### Ентропія

Різниця ентропій  $S_B - S_A$  двох станів B і A:

$$S_B - S_A = \int^{AB} (dQ/T).$$

361. Який об'єм займає маса  $m=8$  г азоту при тиску  $p=120$  кПа і температурі  $t=25^\circ$  С?
362. Знайти об'єм вуглекислого газу масою  $m=15$  г при тиску  $p=95$  кПа і температурі  $t=0^\circ$  С.
363. Який об'єм займає водень масою  $m=5$  г при тиску  $p=150$  кПа і температурі  $t=30^\circ$  С?
364. Обчислити об'єм гелію масою  $m=12$  г при тиску  $p=101$  кПа і температурі  $t=18^\circ$  С.
365. Знайти об'єм кисню масою  $m=20$  г при тиску  $p=80$  кПа і температурі  $t=40^\circ$  С.
366. Який об'єм займає маса  $m=6$  г аргону при тиску  $p=110$  кПа і температурі  $t=15^\circ$  С?
367. Обчислити об'єм повітря масою  $m=25$  г при тиску  $p=100$  кПа і температурі  $t=22^\circ$  С.

368. У балоні міститься маса  $m_1=8$  кг азоту при тиску  $p_1=12$  МПа. Яку масу газу  $\Delta m$  випустили, якщо тиск зменшився до  $p_2=3$  МПа? Температура стала.
369. Балон з гелієм має масу газу  $m_1=5$  кг при тиску  $p_1=8$  МПа. Після часткового випуску газу тиск став  $p_2=2$  МПа. Знайти масу газу, що залишилася в балоні.
370. У сталевому балоні знаходиться  $m_1=6$  кг кисню при тиску  $p_1=9$  МПа. Після використання частини газу тиск знизився до  $p_2=4,5$  МПа. Яку масу газу витратили?
371. Балон з аргоном має початкову масу газу  $m_1=7$  кг при тиску  $p_1=10$  МПа. Після відкриття вентиля тиск став  $p_2=5$  МПа. Визначити масу газу, що залишилася.
372. У резервуарі міститься  $m_1=9$  кг повітря при тиску  $p_1=6$  МПа. Після відбору частини газу тиск зменшився до  $p_2=2$  МПа. Знайти масу відібраного газу.
373. Балон з воднем має масу  $m_1=4$  кг при тиску  $p_1=5$  МПа. Після часткового випуску газу тиск став  $p_2=1,25$  МПа. Визначити масу газу, що залишилася.
374. У балоні міститься  $m_1=11$  кг метану при тиску  $p_1=9$  МПа. Після використання частини газу тиск знизився до  $p_2=3$  МПа. Знайти масу газу, яку витратили.
375. Знайти масу повітря, що заповнює лабораторію висотою  $h=4$  м і площею підлоги  $S=150$  м<sup>2</sup>. Тиск  $p=101$  кПа, температура  $t=20^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль.
376. Визначити масу повітря в аудиторії висотою  $h=6$  м і площею  $S=250$  м<sup>2</sup>. Тиск  $p=98$  кПа, температура  $t=15^\circ$  С.
377. Яка маса повітря міститься у спортивному залі висотою  $h=10$  м і площею  $S=500$  м<sup>2</sup>, якщо  $p=100$  кПа,  $t=25^\circ$  С?
378. Знайти масу повітря у класі висотою  $h=3,5$  м і площею  $S=100$  м<sup>2</sup>. Тиск  $p=102$  кПа, температура  $t=18^\circ$  С.

379. Визначити масу повітря у лекційній аудиторії висотою  $h=5$  м і площею  $S=300$  м<sup>2</sup>. Тиск  $p=99$  кПа, температура  $t=22^\circ$  С.
380. Яка маса повітря міститься у приміщенні висотою  $h=8$  м і площею  $S=400$  м<sup>2</sup>, якщо  $p=100$  кПа, температура  $t=10^\circ$  С?
381. Знайти масу повітря у конференц-залі висотою  $h=6$  м і площею  $S=350$  м<sup>2</sup>. Тиск  $p=101$  кПа, температура  $t=19^\circ$  С.
382. Якою має бути вага оболонки кульки радіусом  $r=15$  см, наповненої гелієм, щоб вона перебувала у стані рівноваги? Повітря і гелій — за нормальних умов.
383. Визначити вагу оболонки кульки радіусом  $r=10$  см, наповненої воднем, якщо результуюча підйомна сила дорівнює нулю. Умови нормальні.
384. Якою має бути вага оболонки кульки радіусом  $r=20$  см, наповненої гелієм, щоб кулька не піднімалася і не опускалася? Тиск усередині дорівнює зовнішньому.
385. Знайти вагу оболонки кульки радіусом  $r=12$  см, наповненої метаном, щоб результуюча сила була рівною нулю. Повітря і метан — за нормальних умов.
386. Якою має бути вага оболонки кульки радіусом  $r=18$  см, наповненої воднем, щоб кулька перебувала у стані рівноваги? Тиск усередині дорівнює зовнішньому.
387. □ **Задача 6** Визначити вагу оболонки кульки радіусом  $r=25$  см, наповненої гелієм, якщо результуюча підйомна сила дорівнює нулю. Умови нормальні.
388. Якою має бути вага оболонки кульки радіусом  $r=14$  см, наповненої воднем, щоб кулька залишалася у стані рівноваги? Повітря і водень — за нормальних умов.
389. Знайти густину кисню при температурі  $t=20^\circ$  С і тиску  $p=101$  кПа.
390. Визначити густину азоту при температурі  $t=10^\circ$  С і тиску  $p=95$  кПа.
391. Знайти густину гелію при температурі  $t=25^\circ$  С і тиску  $p=100$  кПа.

392. Обчислити густину вуглекислого газу при температурі  $t=0^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p=97\text{ кПа}$ .
393. Визначити густину аргону при температурі  $t=30^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p=105\text{ кПа}$ .
394. Знайти густину метану при температурі  $t=15^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p=99\text{ кПа}$ .
395. Обчислити густину повітря при температурі  $t=18^{\circ}\text{C}$  і тиску  $p=101\text{ кПа}$ .
396. У закритій посудині об'ємом  $V=2\text{ м}^3$  знаходиться маса  $m_1=2\text{ кг}$  азоту і маса  $m_2=1\text{ кг}$  води. Визначити тиск у посудині при температурі  $t=400^{\circ}\text{C}$ , якщо вся вода перетворюється на пару.
397. У резервуарі об'ємом  $V=1,5\text{ м}^3$  міститься  $m_1=1\text{ кг}$  кисню і  $m_2=0,5\text{ кг}$  води. Знайти тиск у резервуарі при температурі  $t=350^{\circ}\text{C}$ .
398. У посудині об'ємом  $V=0,8\text{ м}^3$  знаходиться  $m_1=0,9\text{ кг}$  азоту і  $m_2=0,6\text{ кг}$  води. Визначити тиск при температурі  $t=450^{\circ}\text{C}$ .
399. У закритій посудині об'ємом  $V=1\text{ м}^3$  міститься  $m_1=1,2\text{ кг}$  кисню і  $m_2=0,7\text{ кг}$  води. Знайти тиск при температурі  $t=500^{\circ}\text{C}$ .
400. У резервуарі об'ємом  $V=2,5\text{ м}^3$  знаходиться  $m_1=3\text{ кг}$  азоту і  $m_2=1,5\text{ кг}$  води. Визначити тиск при температурі  $t=600^{\circ}\text{C}$ .
401. У посудині об'ємом  $V=1,2\text{ м}^3$  міститься  $m_1=2\text{ кг}$  кисню і  $m_2=1\text{ кг}$  води. Знайти тиск при температурі  $t=550^{\circ}\text{C}$ .
402. У закритій посудині об'ємом  $V=0,5\text{ м}^3$  знаходиться  $m_1=0,7\text{ кг}$  азоту і  $m_2=0,4\text{ кг}$  води. Визначити тиск при температурі  $t=300^{\circ}\text{C}$ .
403. У посудині об'ємом  $V=1\text{ л}$  міститься маса  $m=2\text{ г}$  парів хлору ( $\text{Cl}_2$ ). При температурі  $t=800^{\circ}\text{C}$  тиск у посудині дорівнює  $p=120\text{ кПа}$ . Визначити ступінь дисоціації молекул хлору на атоми. Молярна маса  $\text{Cl}_2=0,071\text{ кг/моль}$ .
404. У посудині об'ємом  $V=0,8\text{ л}$  знаходиться маса  $m=1,5\text{ г}$  парів бромю ( $\text{Br}_2$ ). При температурі  $t=900^{\circ}\text{C}$  тиск дорівнює  $p=85\text{ кПа}$ . Знайти ступінь дисоціації молекул бромю. Молярна маса  $\text{Br}_2=0,160\text{ кг/моль}$ .
405. У посудині об'ємом  $V=0,6\text{ л}$  міститься маса  $m=0,5\text{ г}$  парів йоду ( $\text{I}_2$ ). При температурі  $t=950^{\circ}\text{C}$  тиск дорівнює  $p=70\text{ кПа}$ . Визначити ступінь дисоціації молекул йоду. Молярна маса  $\text{I}_2=0,254\text{ кг/моль}$ .

406. У посудині об'ємом  $V=1,2$  л знаходиться маса  $m=3$  г парів кисню ( $O_2$ ). При температурі  $t=2000^\circ$  С тиск дорівнює  $p=150$  кПа. Знайти ступінь дисоціації молекул кисню на атоми. Молярна маса  $O_2=0,032$  кг/моль.
407. У посудині об'ємом  $V=0,4$  л міститься маса  $m=1$  г парів фтору ( $F_2$ ). При температурі  $t=600^\circ$  С тиск дорівнює  $p=110$  кПа. Визначити ступінь дисоціації молекул фтору. Молярна маса  $F_2=0,038$  кг/моль.
408. У посудині об'ємом  $V=0,7$  л знаходиться маса  $m=2$  г парів азоту ( $N_2$ ). При температурі  $t=1800^\circ$  С тиск дорівнює  $p=130$  кПа. Знайти ступінь дисоціації молекул азоту. Молярна маса  $N_2=0,028$  кг/моль.
409. У посудині об'ємом  $V=0,9$  л міститься маса  $m=2,5$  г парів кисню ( $O_2$ ). При температурі  $t=1500^\circ$  С тиск дорівнює  $p=100$  кПа. Визначити ступінь дисоціації молекул кисню. Молярна маса  $O_2=0,032$  кг/моль.
410. Яке число молекул міститься у лабораторії об'ємом  $V=60$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=20^\circ$  С і тиску  $p=101$  кПа?
411. Визначити число молекул у класі об'ємом  $V=100$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=15^\circ$  С і тиску  $p=98$  кПа.
412. Яке число молекул міститься у спортивному залі об'ємом  $V=200$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=25^\circ$  С і тиску  $p=100$  кПа?
413. Знайти число молекул у приміщенні об'ємом  $V=50$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=18^\circ$  С і тиску  $p=102$  кПа.
414. Визначити число молекул у конференц-залі об'ємом  $V=120$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=22^\circ$  С і тиску  $p=99$  кПа.
415. Яке число молекул міститься у аудиторії об'ємом  $V=70$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=16^\circ$  С і тиску  $p=100$  кПа?
416. Знайти число молекул у лекційній аудиторії об'ємом  $V=90$  м<sup>3</sup> при температурі  $t=19^\circ$  С і тиску  $p=101$  кПа.
417. Знайти число молекул азоту в одиниці об'єму газу при тиску  $p=300$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул дорівнює  $V=2,0$  км/с.
418. Визначити число молекул кисню в одиниці об'єму при тиску  $p=500$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=1,8$  км/с.

419. Знайти число молекул гелію в одиниці об'єму при тиску  $p=200$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=3,0$  км/с.
420. Визначити число молекул водню в одиниці об'єму при тиску  $p=400$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=2,2$  км/с.
421. Знайти число молекул аргону в одиниці об'єму при тиску  $p=600$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=1,5$  км/с.
422. Визначити число молекул метану в одиниці об'єму при тиску  $p=350$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=2,1$  км/с.
423. Знайти число молекул повітря в одиниці об'єму при тиску  $p=250$  Па, якщо середньоквадратична швидкість молекул  $V=2,3$  км/с.
424. Знайти енергію обертального руху молекул у масі  $m=2$  кг кисню при температурі  $t=10^\circ$  С.
425. Обчислити енергію обертального руху молекул у масі  $m=0,5$  кг водню при температурі  $t=25^\circ$  С.
426. Визначити енергію обертального руху молекул у масі  $m=1,5$  кг азоту при температурі  $t=0^\circ$  С.
427. Знайти енергію обертального руху молекул у масі  $m=3$  кг кисню при температурі  $t=30^\circ$  С.
428. Обчислити енергію обертального руху молекул у масі  $m=0,8$  кг водню при температурі  $t=15^\circ$  С.
429. Визначити енергію обертального руху молекул у масі  $m=2,2$  кг азоту при температурі  $t=20^\circ$  С.
430. Знайти енергію обертального руху молекул у масі  $m=1$  кг кисню при температурі  $t=12^\circ$  С.
431. Визначити число молекул кисню в об'ємі  $V=20$  см<sup>3</sup> при тиску  $p=10$  кПа і температурі  $t=30^\circ$  С. Знайти теплову енергію газу.
432. Знайти число молекул азоту в об'ємі  $V=15$  см<sup>3</sup> при тиску  $p=8$  кПа і температурі  $t=25^\circ$  С. Обчислити теплову енергію молекул.
433. У посудині об'ємом  $V=12$  см<sup>3</sup> знаходиться водень при тиску  $p=6$  кПа і температурі  $t=40^\circ$  С. Визначити число молекул і теплову енергію газу.

434. Знайти число молекул кисню в об'ємі  $V=25$  см<sup>3</sup> при тиску  $p=12$  кПа і температурі  $t=20^\circ$  С. Обчислити теплову енергію молекул.
435. У посудині об'ємом  $V=18$  см<sup>3</sup> міститься азот при тиску  $p=9$  кПа і температурі  $t=35^\circ$  С. Визначити число молекул і теплову енергію газу.
436. Знайти число молекул водню в об'ємі  $V=8$  см<sup>3</sup> при тиску  $p=7$  кПа і температурі  $t=27^\circ$  С. Обчислити теплову енергію молекул.
437. У посудині об'ємом  $V=30$  см<sup>3</sup> знаходиться кисень при тиску  $p=11$  кПа і температурі  $t=28^\circ$  С. Визначити число молекул і теплову енергію газу.
438. Густина двоатомного газу при нормальних умовах дорівнює  $\rho=1,25$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
439. За нормальних умов густина кисню становить  $\rho=1,43$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
440. Густина азоту при нормальних умовах дорівнює  $\rho=1,25$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
441. У нормальних умовах густина повітря становить  $\rho=1,29$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
442. Густина двоатомного газу при нормальних умовах дорівнює  $\rho=1,6$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
443. За нормальних умов густина кисню становить  $\rho=1,5$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
444. Густина азоту при нормальних умовах дорівнює  $\rho=1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти питомі теплоємності  $c_v$  і  $c_p$ .
445. Маса  $m=12$  г азоту знаходиться при тиску  $p=0,25$  МПа і температурі  $t=15^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=12$  л. Знайти кількість теплоти  $Q$  та енергію теплового руху молекул до і після нагрівання.
446. Маса  $m=8$  г кисню знаходиться при тиску  $p=0,2$  МПа і температурі  $t=20^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=9$  л. Визначити  $Q$  та енергію теплового руху молекул.

447. Маса  $m=15$  г водню знаходиться при тиску  $p=0,35$  МПа і температурі  $t=5^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=20$  л. Знайти  $Q$  та енергію теплового руху молекул.
448. Маса  $m=10$  г азоту знаходиться при тиску  $p=0,3$  МПа і температурі  $t=0^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=11$  л. Визначити  $Q$  та енергію теплового руху молекул.
449. Маса  $m=20$  г кисню знаходиться при тиску  $p=0,4$  МПа і температурі  $t=25^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=15$  л. Знайти  $Q$  та енергію теплового руху молекул.
450. Маса  $m=9$  г водню знаходиться при тиску  $p=0,28$  МПа і температурі  $t=12^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=13$  л. Визначити  $Q$  та енергію теплового руху молекул.
451. Маса  $m=11$  г азоту знаходиться при тиску  $p=0,32$  МПа і температурі  $t=18^\circ$  С. Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм  $V_2=14$  л. Знайти  $Q$  та енергію теплового руху молекул.
452. У закритій посудині об'ємом  $V=3$  л знаходиться кисень із густиною  $\rho=1,35$  кг/м<sup>3</sup>. Яку кількість теплоти  $Q$  треба повідомити газу, щоб нагріти його на  $\Delta T=80$  К?
453. У посудині об'ємом  $V=1,5$  л міститься азот із густиною  $\rho=1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити кількість теплоти, необхідну для нагрівання газу на  $\Delta T=120$  К.
454. У закритій посудині об'ємом  $V=2,5$  л знаходиться кисень із густиною  $\rho=1,4$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти кількість теплоти, яку треба повідомити газу для нагрівання на  $\Delta T=150$  К.
455. У посудині об'ємом  $V=4$  л міститься азот із густиною  $\rho=1,3$  кг/м<sup>3</sup>. Яку кількість теплоти треба повідомити газу, щоб нагріти його на  $\Delta T=90$  К?
456. У закритій посудині об'ємом  $V=1$  л знаходиться кисень із густиною  $\rho=1,25$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити кількість теплоти, необхідну для нагрівання газу на  $\Delta T=50$  К.

457. У посудині об'ємом  $V=5$  л міститься азот із густиною  $\rho=1,4$  кг/м<sup>3</sup>. Знайти кількість теплоти, яку треба повідомити газу для нагрівання на  $\Delta T=200$  К.
458. У закритій посудині об'ємом  $V=2$  л знаходиться кисень із густиною  $\rho=1,3$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити кількість теплоти, необхідну для нагрівання газу на  $\Delta T=70$  К.
459. Маса  $m=12$  г кисню знаходиться в закритій посудині при температурі  $t_1=20^\circ$  С. Яку кількість теплоти треба повідомити газу, щоб середньоквадратична швидкість молекул збільшилася у 1,5 раза? У скільки разів зміниться температура і тиск?
460. У посудині міститься  $m=8$  г азоту при температурі  $t_1=10^\circ$  С. Знайти кількість теплоти, необхідну для збільшення середньоквадратичної швидкості молекул у 2,5 раза. Як зміниться температура і тиск?
461. Маса  $m=15$  г водню знаходиться в закритій посудині при температурі  $t_1=5^\circ$  С. Яку кількість теплоти треба повідомити газу, щоб середньоквадратична швидкість молекул збільшилася у 3 рази? У скільки разів зміниться температура і тиск?
462. У посудині міститься  $m=10$  г кисню при температурі  $t_1=0^\circ$  С. Визначити кількість теплоти, необхідну для збільшення середньоквадратичної швидкості молекул у 1,2 раза. Як зміниться температура і тиск?
463. Маса  $m=20$  г азоту знаходиться в закритій посудині при температурі  $t_1=25^\circ$  С. Знайти кількість теплоти, щоб середньоквадратична швидкість молекул збільшилася у 1,8 раза. У скільки разів зміниться температура і тиск?
464. У посудині міститься  $m=9$  г водню при температурі  $t_1=12^\circ$  С. Визначити кількість теплоти, необхідну для збільшення середньоквадратичної швидкості молекул у 2 рази. Як зміниться температура і тиск?

465. Маса  $m=11$  г азоту знаходиться в закритій посудині при температурі  $t_1=18^\circ$  С. Знайти кількість теплоти, щоб середньоквадратична швидкість молекул збільшилася у 2,2 раза. У скільки разів зміниться температура і тиск?
466. При якій температурі середньоквадратична швидкість молекул кисню більша за найбільш ймовірну на  $\Delta v=40$  м/с?
467. Знайти температуру, при якій середньоквадратична швидкість молекул азоту перевищує найбільш ймовірну на  $\Delta v=60$  м/с.
468. При якій температурі середньоквадратична швидкість молекул водню більша за найбільш ймовірну на  $\Delta v=30$  м/с?
469. Визначити температуру, при якій середньоквадратична швидкість молекул кисню перевищує найбільш ймовірну на  $\Delta v=25$  м/с.
470. При якій температурі середньоквадратична швидкість молекул азоту більша за найбільш ймовірну на  $\Delta v=70$  м/с?
471. Знайти температуру, при якій середньоквадратична швидкість молекул водню перевищує найбільш ймовірну на  $\Delta v=45$  м/с.
472. Гора має висоту  $h=1500$  м. Знайти тиск повітря на цій висоті, якщо температура постійна  $t=10^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль, а тиск на рівні моря  $p_0=101,3$  кПа.
473. Обсерваторія розташована на висоті  $h=2500$  м. Визначити тиск повітря, якщо температура постійна  $t=0^\circ$  С,  $\mu=0,029$  кг/моль,  $p_0=101,3$  кПа.
474. Знайти тиск повітря на висоті  $h=4000$  м, якщо температура постійна  $t=5^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль, а на рівні моря  $p_0=101,3$  кПа.
475. Визначити тиск повітря на висоті  $h=5000$  м, якщо температура постійна  $t=-5^\circ$  С,  $\mu=0,029$  кг/моль,  $p_0=101,3$  кПа.
476. Гірський перевал має висоту  $h=2200$  м. Знайти тиск повітря, якщо температура постійна  $t=12^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль,  $p_0=101,3$  кПа.
477. Визначити тиск повітря на висоті  $h=3500$  м, якщо температура постійна  $t=8^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль,  $p_0=101,3$  кПа.

478. Знайти тиск повітря на висоті  $h=2800$  м, якщо температура постійна  $t=6^\circ$  С, молярна маса повітря  $\mu=0,029$  кг/моль,  $p_0=101,3$  кПа.
479. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул кисню при температурі  $t=50^\circ$  С і тиску  $p=20$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,30$  нм.
480. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул азоту при температурі  $t=80^\circ$  С і тиску  $p=15$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,28$  нм.
481. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул водню при температурі  $t=100^\circ$  С і тиску  $p=10$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,25$  нм.
482. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул аргону при температурі  $t=120^\circ$  С і тиску  $p=18$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,34$  нм.
483. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул метану при температурі  $t=90^\circ$  С і тиску  $p=12$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,33$  нм.
484. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул кисню при температурі  $t=70^\circ$  С і тиску  $p=25$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,30$  нм.
485. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул азоту при температурі  $t=60^\circ$  С і тиску  $p=14$  Па. Діаметр молекули  $\sigma=0,28$  нм.
486. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул кисню при тиску  $p=0,2$  Па і температурі  $t=40^\circ$  С.
487. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул азоту при тиску  $p=0,15$  Па і температурі  $t=60^\circ$  С.
488. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул водню при тиску  $p=0,1$  Па і температурі  $t=70^\circ$  С.
489. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул аргону при тиску  $p=0,25$  Па і температурі  $t=30^\circ$  С.
490. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул метану при тиску  $p=0,18$  Па і температурі  $t=50^\circ$  С.
491. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул кисню при тиску  $p=0,12$  Па і температурі  $t=80^\circ$  С.
492. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул азоту при тиску  $p=0,22$  Па і температурі  $t=45^\circ$  С.

493. У посудині з киснем тиск знижено до  $p=2,0 \times 10^{-4}$  Па. Знайти густину газу, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=20^\circ$  С. Діаметр молекули  $\sigma=0,30$  нм, молярна маса  $M=0,032$  кг/моль.
494. У посудині з азотом тиск знижено до  $p=1,5 \times 10^{-4}$  Па. Визначити густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=25^\circ$  С.  $\sigma=0,28$  нм,  $M=0,028$  кг/моль.
495. У посудині з аргоном тиск знижено до  $p=1,0 \times 10^{-4}$  Па. Знайти густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=30^\circ$  С.  $\sigma=0,34$  нм,  $M=0,040$  кг/моль.
496. У посудині з воднем тиск знижено до  $p=2,5 \times 10^{-4}$  Па. Визначити густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=50^\circ$  С.  $\sigma=0,25$  нм,  $M=0,002$  кг/моль.
497. У посудині з метаном тиск знижено до  $p=1,8 \times 10^{-4}$  Па. Знайти густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=40^\circ$  С.  $\sigma=0,33$  нм,  $M=0,016$  кг/моль.
498. У посудині з киснем тиск знижено до  $p=2,2 \times 10^{-4}$  Па. Визначити густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=35^\circ$  С.  $\sigma=0,30$  нм,  $M=0,032$  кг/моль.
499. У посудині з азотом тиск знижено до  $p=1,2 \times 10^{-4}$  Па. Знайти густину, число молекул у одиниці об'єму та середню довжину вільного пробігу при температурі  $t=22^\circ$  С.  $\sigma=0,28$  нм,  $M=0,028$  кг/моль.
500. При ізотермічному розширенні маси  $m=12$  г кисню при температурі  $t=20^\circ$  С газ виконав роботу  $A=600$  Дж. У скільки разів змінився тиск?
501. Маса  $m=8$  г азоту при температурі  $t=15^\circ$  С розширилася ізотермічно, виконавши роботу  $A=500$  Дж. Визначити зміну тиску.
502. При ізотермічному розширенні маси  $m=10$  г кисню при температурі  $t=25^\circ$  С газ виконав роботу  $A=720$  Дж. У скільки разів змінився тиск?
503. 4 Маса  $m=15$  г азоту при температурі  $t=10^\circ$  С розширилася ізотермічно, виконавши роботу  $A=900$  Дж. Визначити зміну тиску.

504. При ізотермічному розширенні маси  $m=20$  г кисню при температурі  $t=30^\circ\text{C}$  газ виконав роботу  $A=1000$  Дж. У скільки разів змінився тиск?
505. Маса  $m=9$  г азоту при температурі  $t=18^\circ\text{C}$  розширилася ізотермічно, виконавши роботу  $A=650$  Дж. Визначити зміну тиску.
506. При ізотермічному розширенні маси  $m=11$  г кисню при температурі  $t=22^\circ\text{C}$  газ виконав роботу  $A=800$  Дж. У скільки разів змінився тиск?
507. Двоатомний газ при тиску  $p_1=1,5$  МПа і температурі  $t_1=20^\circ\text{C}$  стискається адіабатично від об'єму  $V_1$  до  $V_2=0,4V_1$ . Знайти температуру  $t_2$  і тиск  $p_2$ .
508. Моноатомний газ при тиску  $p_1=0,8$  МПа і температурі  $t_1=50^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,6V_1$ . Визначити температуру й тиск після стискання.
509. Двоатомний газ при тиску  $p_1=2,2$  МПа і температурі  $t_1=10^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,5V_1$ . Знайти температуру й тиск після стискання.
510. Моноатомний газ при тиску  $p_1=1,0$  МПа і температурі  $t_1=100^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,3V_1$ . Визначити температуру й тиск після стискання.
511. Двоатомний газ при тиску  $p_1=1,8$  МПа і температурі  $t_1=0^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,7V_1$ . Знайти температуру й тиск після стискання.
512. Моноатомний газ при тиску  $p_1=2,5$  МПа і температурі  $t_1=25^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,5V_1$ . Визначити температуру й тиск після стискання.
513. Двоатомний газ при тиску  $p_1=2,0$  МПа і температурі  $t_1=15^\circ\text{C}$  стискається адіабатично до об'єму  $V_2=0,6V_1$ . Знайти температуру й тиск після стискання.
514. Кількість  $\nu=2$  кмоль кисню при нормальних умовах розширюється адіабатично від об'єму  $V_1$  до  $V_2=4V_1$ . Знайти зміну внутрішньої енергії  $\Delta W$  та роботу  $A$ .

515. Кількість  $\nu=0,5$  кмоль азоту при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=3V_1$ . Визначити  $\Delta W$  та  $A$ .
516. Кількість  $\nu=1,5$  кмоль кисню при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=2V_1$ . Знайти зміну внутрішньої енергії та роботу.
517. Кількість  $\nu=1$  кмоль водню при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=6V_1$ . Визначити  $\Delta W$  та  $A$ .
518. Кількість  $\nu=3$  кмоль азоту при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=5V_1$ . Знайти зміну внутрішньої енергії та роботу.
519. Кількість  $\nu=2,5$  кмоль кисню при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=3V_1$ . Визначити  $\Delta W$  та  $A$ .
520. Кількість  $\nu=1$  кмоль азоту при нормальних умовах розширюється адіабатично від  $V_1$  до  $V_2=7V_1$ . Знайти зміну внутрішньої енергії та роботу.
521. Маса  $m=32$  г кисню при температурі  $t_1=25^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=120$  кПа стискається до об'єму  $V_2=15$  л. Знайти  $t_2, p_2$  та роботу  $A$  для ізотермічного й адіабатичного випадків.
522. Маса  $m=14$  г азоту при температурі  $t_1=30^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=90$  кПа стискається до об'єму  $V_2=10$  л. Визначити температуру, тиск і роботу в обох випадках.
523. Маса  $m=20$  г кисню при температурі  $t_1=40^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=150$  кПа стискається до об'єму  $V_2=12$  л. Знайти  $t_2, p_2$  та роботу для ізотермічного й адіабатичного процесів.
524. Маса  $m=10$  г азоту при температурі  $t_1=20^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=100$  кПа стискається до об'єму  $V_2=8$  л. Визначити температуру, тиск і роботу в обох випадках.
525. Маса  $m=18$  г кисню при температурі  $t_1=35^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=110$  кПа стискається до об'єму  $V_2=9$  л. Знайти температуру, тиск і роботу для ізотермічного й адіабатичного процесів.
526. Маса  $m=28$  г азоту при температурі  $t_1=50^\circ\text{C}$  і тиску  $p_1=95$  кПа стискається до об'єму  $V_2=11$  л. Визначити температуру, тиск і роботу в обох випадках.

527. Маса  $m=12$  г кисню при температурі  $t_1=27^\circ$  С і тиску  $p_1=105$  кПа стискається до об'єму  $V_2=7$  л. Знайти температуру, тиск і роботу для ізотермічного й адіабатичного процесів.
528. Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, отримує від нагрівника кількість теплоти  $Q_1=3,0$  кДж. Температура нагрівника  $T_1=500$  К, температура холодильника  $T_2=300$  К. Знайти роботу  $A$  та кількість теплоти  $Q_2$ , віддану холодильнику.
529. Ідеальна теплова машина отримує від нагрівника  $Q_1=4,2$  кДж.  $T_1=600$  К,  $T_2=350$  К. Визначити роботу та теплоту, віддану холодильнику.
530. Машина Карно отримує  $Q_1=2,8$  кДж.  $T_1=450$  К,  $T_2=300$  К. Знайти  $A$  та  $Q_2$ .
531. Ідеальна теплова машина отримує  $Q_1=5,0$  кДж.  $T_1=700$  К,  $T_2=400$  К. Визначити роботу та теплоту, віддану холодильнику.
532. Машина Карно отримує  $Q_1=3,5$  кДж.  $T_1=550$  К,  $T_2=320$  К. Знайти  $A$  та  $Q_2$ .
533. Ідеальна теплова машина отримує  $Q_1=2,2$  кДж.  $T_1=400$  К,  $T_2=280$  К. Визначити роботу та теплоту, віддану холодильнику.
534. Ідеальна теплова машина отримує від нагрівника  $Q_1=5,0$  кДж. При цьому 70% цієї теплоти передається холодильнику. Знайти ККД та роботу за цикл.
535. Машина Карно отримує  $Q_1=4,2$  кДж. 65% теплоти передається холодильнику. Визначити ККД та роботу.
536. Ідеальна теплова машина отримує  $Q_1=6,5$  кДж. 75% теплоти передається холодильнику. Знайти ККД та роботу.
537. Машина Карно отримує  $Q_1=3,8$  кДж. 60% теплоти передається холодильнику. Визначити ККД та роботу.
538. Ідеальна теплова машина отримує  $Q_1=7,0$  кДж. 85% теплоти передається холодильнику. Знайти ККД та роботу.
539. Машина Карно отримує  $Q_1=2,5$  кДж. 50% теплоти передається холодильнику. Визначити ККД та роботу.

540. Ідеальна теплова машина отримує  $Q_1=8,0$  кДж. 90% теплоти передається холодильнику. Знайти ККД та роботу.
541. Кількість  $\nu=2$  кмоль ідеального газу здійснює цикл із двох ізохор і двох ізобар. Об'єм змінюється від  $V_1=10$  м<sup>3</sup> до  $V_2=20$  м<sup>3</sup>, тиск від  $p_1=80$  кПа до  $p_2=160$  кПа. У скільки разів робота цього циклу менша за роботу циклу Карно?
542. Ідеальний газ ( $\nu=1,5$  кмоль) проходить цикл із двох ізохор і двох ізобар.  $V_1=30$  м<sup>3</sup>,  $V_2=60$  м<sup>3</sup>,  $p_1=90$  кПа,  $p_2=180$  кПа. Порівняти роботу з циклом Карно.
543. Газ ( $\nu=1$  кмоль) здійснює цикл:  $V_1=15$  м<sup>3</sup>,  $V_2=45$  м<sup>3</sup>,  $p_1=70$  кПа,  $p_2=140$  кПа. Знайти відношення роботи цього циклу до роботи Карно.
544. Ідеальний газ ( $\nu=2$  кмоль) проходить цикл ізохор-ізобар:  $V_1=20$  м<sup>3</sup>,  $V_2=40$  м<sup>3</sup>,  $p_1=100$  кПа,  $p_2=200$  кПа. У скільки разів робота менша за роботу Карно?
545. Газ ( $\nu=1$  кмоль) здійснює цикл:  $V_1=12$  м<sup>3</sup>,  $V_2=24$  м<sup>3</sup>,  $p_1=60$  кПа,  $p_2=120$  кПа. Порівняти роботу з циклом Карно.
546. Ідеальний газ ( $\nu=1,2$  кмоль) проходить цикл:  $V_1=18$  м<sup>3</sup>,  $V_2=36$  м<sup>3</sup>,  $p_1=75$  кПа,  $p_2=150$  кПа. Знайти відношення роботи до роботи Карно.
547. Газ ( $\nu=2$  кмоль) здійснює цикл:  $V_1=25$  м<sup>3</sup>,  $V_2=50$  м<sup>3</sup>,  $p_1=110$  кПа,  $p_2=220$  кПа. У скільки разів робота менша за роботу Карно?
548. Приміщення опалюється холодильною машиною, що працює за зворотним циклом Карно. Тепловий двигун працює між температурами  $t_1=120^\circ\text{C}$  і  $t_2=20^\circ\text{C}$ . Приміщення підтримується при  $t_1'=18^\circ\text{C}$ , температура зовнішнього повітря  $t_2'=-5^\circ\text{C}$ . У скільки разів теплота від печі менша за теплоту, яку передає холодильна машина?
549. Холодильна машина працює за зворотним циклом Карно. Тепловий двигун між  $t_1=90^\circ\text{C}$  і  $t_2=10^\circ\text{C}$ . Приміщення підтримується при  $t_1'=20^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-15^\circ\text{C}$ . Порівняти кількість теплоти від печі та від холодильника.

550. Тепловий двигун працює між температурами  $t_1=150^\circ\text{C}$  і  $t_2=50^\circ\text{C}$ . Холодильна машина підтримує приміщення при  $t_1'=22^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-8^\circ\text{C}$ . У скільки разів теплота від печі менша за теплоту від холодильника?
551. Приміщення опалюється холодильником Карно. Тепловий двигун працює між  $t_1=100^\circ\text{C}$  і  $t_2=0^\circ\text{C}$ . Приміщення підтримується при  $t_1'=15^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-20^\circ\text{C}$ . Порівняти теплоти.
552. Тепловий двигун працює між  $t_1=80^\circ\text{C}$  і  $t_2=10^\circ\text{C}$ . Холодильна машина підтримує приміщення при  $t_1'=18^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-12^\circ\text{C}$ . У скільки разів теплота від печі менша за теплоту від холодильника?
553. Приміщення опалюється холодильником Карно. Тепловий двигун працює між  $t_1=110^\circ\text{C}$  і  $t_2=20^\circ\text{C}$ . Приміщення підтримується при  $t_1'=19^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-7^\circ\text{C}$ . Порівняти теплоти.
554. Тепловий двигун працює між  $t_1=95^\circ\text{C}$  і  $t_2=5^\circ\text{C}$ . Холодильна машина підтримує приміщення при  $t_1'=21^\circ\text{C}$ , зовнішнє середовище  $t_2'=-18^\circ\text{C}$ . У скільки разів теплота від печі менша за теплоту від холодильника?
555. Ідеальна парова машина працює за циклом: ізохорне підвищення тиску від  $p_0=0,1\text{ МПа}$  до  $p_1=1,0\text{ МПа}$  при  $V_0=0,4\text{ л}$ , ізобарне розширення до  $V_1=1,2\text{ л}$ , адіабатичне розширення до  $V_2=2,5\text{ л}$ . Знайти роботу за цикл.
556. Цикл парової машини:  $V_0=0,6\text{ л}$ ,  $V_1=1,8\text{ л}$ ,  $V_2=3,2\text{ л}$ ,  $p_0=0,12\text{ МПа}$ ,  $p_1=1,1\text{ МПа}$ , показник адіабати  $\nu=1,33$ . Визначити роботу.
557. Ідеальна парова машина:  $V_0=0,5\text{ л}$ ,  $V_1=1,5\text{ л}$ ,  $V_2=2,8\text{ л}$ ,  $p_0=0,09\text{ МПа}$ ,  $p_1=1,3\text{ МПа}$ . Знайти роботу за цикл.
558. Цикл:  $V_0=0,7\text{ л}$ ,  $V_1=2,0\text{ л}$ ,  $V_2=3,5\text{ л}$ ,  $p_0=0,1\text{ МПа}$ ,  $p_1=1,4\text{ МПа}$ . Показник адіабати  $\nu=1,33$ . Визначити роботу.
559. Ідеальна парова машина:  $V_0=0,4\text{ л}$ ,  $V_1=1,2\text{ л}$ ,  $V_2=2,6\text{ л}$ ,  $p_0=0,11\text{ МПа}$ ,  $p_1=1,2\text{ МПа}$ . Знайти роботу.
560. Цикл:  $V_0=0,5\text{ л}$ ,  $V_1=1,6\text{ л}$ ,  $V_2=3,0\text{ л}$ ,  $p_0=0,08\text{ МПа}$ ,  $p_1=1,0\text{ МПа}$ . Визначити роботу.

561. Ідеальна парова машина:  $V_0=0,6$  л,  $V_1=1,7$  л,  $V_2=3,2$  л,  $p_0=0,1$  МПа,  $p_1=1,25$  МПа. Знайти роботу.
562. Знайти зміну ентропії при нагріванні  $m=2$  г льоду від  $t=-10^\circ$  С до температури плавлення та його перетворенні у воду при  $t=0^\circ$  С.
563. Визначити зміну ентропії при нагріванні  $m=1$  г води від  $t=20^\circ$  С до  $t=100^\circ$  С.
564. Знайти зміну ентропії при перетворенні  $m=0,5$  г води на пару при  $t=100^\circ$  С.
565. Визначити зміну ентропії при нагріванні  $m=1$  г пари від  $t=100^\circ$  С до  $t=150^\circ$  С.
566. Знайти зміну ентропії при охолодженні  $m=2$  г води від  $t=80^\circ$  С до  $t=20^\circ$  С.
567. Визначити зміну ентропії при плавленні  $m=1$  г льоду при  $t=0^\circ$  С.
568. Знайти зміну ентропії при конденсації  $m=1$  г пари при  $t=100^\circ$  С.
569. При нагріванні  $\nu=2$  кмоль двоатомного газу температура зростає від  $T_1$  до  $T_2=2T_1$ . Знайти зміну ентропії при ізохорному та ізобарному процесах.
570. Кількість  $\nu=1,5$  кмоль моноатомного газу нагрівається від  $T_1$  до  $T_2=1,8T_1$ . Визначити  $\Delta S$  для ізохорного й ізобарного випадків.
571. При нагріванні  $\nu=1$  кмоль двоатомного газу температура зростає від  $T_1$  до  $T_2=1,4T_1$ . Знайти зміну ентропії для ізохорного та ізобарного процесів.
572. Кількість  $\nu=2,5$  кмоль моноатомного газу нагрівається від  $T_1$  до  $T_2=2,2T_1$ . Визначити  $\Delta S$  для ізохорного й ізобарного процесів.
573. При нагріванні  $\nu=1$  кмоль двоатомного газу температура зростає від  $T_1$  до  $T_2=1,6T_1$ . Знайти зміну ентропії при ізохорному та ізобарному процесах.
574. Кількість  $\nu=3$  кмоль моноатомного газу нагрівається від  $T_1$  до  $T_2=1,5T_1$ . Визначити  $\Delta S$  для ізохорного й ізобарного випадків.
575. При нагріванні  $\nu=1$  кмоль двоатомного газу температура зростає від  $T_1$  до  $T_2=2T_1$ . Знайти зміну ентропії для ізохорного та ізобарного процесів.
576. У циклі Карно зміна ентропії  $\Delta S=3,5$  кДж/К, різниця температур  $\Delta T=80$  К. Знайти кількість теплоти, що перетворюється на роботу.

577. Зміна ентропії  $\Delta S=5,0$  кДж/К, різниця температур  $\Delta T=120$  К.  
Визначити кількість теплоти, що перетворюється на роботу.
578. У циклі Карно  $\Delta S=2,8$  кДж/К,  $\Delta T=90$  К. Знайти кількість теплоти, що перетворюється на роботу.
579. Зміна ентропії  $\Delta S=4,0$  кДж/К, різниця температур  $\Delta T=150$  К.  
Визначити кількість теплоти, що перетворюється на роботу.
580. У циклі Карно  $\Delta S=6,2$  кДж/К,  $\Delta T=200$  К. Знайти кількість теплоти, що перетворюється на роботу.
581. Зміна ентропії  $\Delta S=3,0$  кДж/К, різниця температур  $\Delta T=50$  К. Визначити кількість теплоти, що перетворюється на роботу.
582. У циклі Карно  $\Delta S=7,5$  кДж/К,  $\Delta T=180$  К. Знайти кількість теплоти, що перетворюється на роботу.

## Література.

1. Акопян, Г. М., Іовчев, С. І. (2020). *Фізика. Навчально-методичний посібник до практичних занять. Частина 2.* Для здобувачів вищої освіти за освітньо-професійними програмами: «Експлуатація суднових енергетичних установок», «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт; «Суднові енергетичні установки (проектування, виробництво, ремонт і експлуатація)» за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування; «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, денної форми навчання ОНМУ. – Одеса: ОНМУ. – 84 с.
2. Безуглий, А. В., Сисоєв, А. С., Петченко, О. М. (2006). *Методичні вказівки до виконання практичних робіт з розділу «Оптика» курсу фізики (для студентів 1 курсу денної форми навчання всіх спеціальностей академії).* – Харків: ХНАМГ. – 43 с.
3. Богатирьов, О. І. (2013). *Тестовий експрес-контроль з оптики: методичний посібник для викладачів фізичних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти.* – Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького. – 284 с.
4. Богатирьов, О. І., Кулик, Л. Ю., Ткаченко, А. В. (2013). *Фізика атома: навчально-методичний посібник для студентів фізичних спеціальностей.* – Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького. – 68 с.
5. Бондаренко О. О., Гоков О. М., Катрунов К. О. Оптика. Практикум з навчальної дисципліни "Фізика" : навчально-практичний посібник. Харків : Вид. ХНЕУ, 2012. 268 с.
6. Боровий, М. О., Оліх, О. Я., Овсієнко, І. В., Цареградська, Т. Л., Козаченко, В. В., Подолян, А. О., Ісаєв, М. В. (2022). *Загальна фізика для хіміків. Частина 3: Оптика, елементи квантової механіки, атомної та ядерної фізики: навчальний посібник.* Вінниця: «Твори». – 186 с.
7. Дворниченко, А. В., Ляшенко, Я. О., Хоменко, О. В., Корнющенко, Г. С. (2015). *Збірник задач з фізики з прикладами розв'язання: навчальний посібник: у 2-х частинах. Ч. 2. Електричний струм. Магнітне поле. Оптика. Радіоактивність.* – Суми: СумДУ. – 230 с.
8. Дворниченко, А. В., Ляшенко, Я. О., Хоменко, О. В., Корнющенко, Г. С. (2015). *Збірник задач з фізики з прикладами розв'язання: навчальний посібник: у 2-х частинах. Ч. 2. Електричний струм. Магнітне поле. Оптика. Радіоактивність.* – Суми: СумДУ. – 230 с.

9. Каленик, О. О., Плющай, І. В., Цареградська, Т. Л., Ліщук, П. О. (2022). *Physics. Electricity and Magnetism, Optics, Atomic and Nuclear Physics: textbook*. Київ: Publishing and Polygraphic Center “Kyiv University”. – 110 с.
10. Коваль, С. С., Ушкач, М. В. (2005). *Хвильова оптика: збірник задач для індивідуальної роботи з курсу фізики / під ред. О. О. Мочалова*. – Миколаїв: НУК. – 36 с.
11. Краснобокий, Ю. М., Ткаченко, І. А., Хитрук, В. І. (2013). *Збірник задач з астрофізичним змістом*. – Умань: ПП Жовтий О. О. – 168 с. Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (Лист МОН України № 1/11–14922 від 02.10.2013).
12. Лінчевський, І. В. (2021). *Загальна фізика. Оптика. Лабораторний практикум*. «ХП». – 164 с. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
13. Любченко, О. А., Меньшов, Ю. В. (2025). *Посібник з фізики. Частина 3. Оптика. Атомна і ядерна фізика: навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХП». – 359 с.
14. Міщенко, Б. А., Опанасяк, А. С., Панченко, Л. М. (2003). *Збірник задач до практичних та індивідуальних занять з дисципліни «Загальна фізика». Частина 3: елементи атомної фізики та квантової механіки*. – Суми: Сумський державний університет. – 59 с.
15. Ніколайчук, Г. П., Перетяцько, А. О., Кривоніс, С. С. (2025). *Посібник з фізики. Частина 2. Молекулярна фізика. Термодинаміка. Електромагнетизм: навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХП». – 375 с.
16. Скіцько, І. Ф., Бруква, Н. М. (2024). *Фізика. Електромагнетизм. Оптика. Лабораторний практикум (у 3-х частинах)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
17. Фат'янова, Н. Б., Шелест, Т. М., Галушак, І. В., Меньшов, Ю. В. (2021). *Фізика. Навчально-методичний посібник для дистанційного навчання*. Харків: НТУ
18. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Електронний архів наукових та навчально-методичних матеріалів з фізики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua> (eprints.kname.edu.ua in Bing) ([bing.com](http://bing.com) in Bing) (дата звернення: 03.06.2026).