

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ДНПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**О.Й. Дідоборець, С.В. Козиркіна, Є.Г. Попов,
Н.В. Резчик, О.В. Толстенко, В.І. Цоцко**

Ф І З И К А

ЛАБОРАТОРНІ ПРАКТИКУМ І ЗБІРНИК ЗАДАЧ

**ДНПРОПЕТРОВСЬК
2007**



МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ДНПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**О.Й. Дідоборець, С.В. Козиркіна, Є.Г. Попов,
Н.В. Резчик, О.В. Толстенко, В.І. Цоцко**

Ф І З И К А

Лабораторний практикум і збірник задач

ДНПРОПЕТРОВСЬК
2007

Фізика. Лабораторний практикум і збірник задач. Навчальний посібник. О.Й. Дідоборець, С.В. Козиркіна, Є.Г. Попов, Н.В. Резчик, О.В. Толстенко, В.І. Цоцко. – Дніпропетровськ, 2007.

Посібник відповідає змісту і структурі сучасного курсу загальної фізики, що входить до складу навчальних програм вищих аграрних закладів освіти III – IV рівнів акредитації. Викладені основні правила роботи в учбових лабораторіях, порядок виконання лабораторних робіт, вимоги до оформлення звітів, теорія похибок вимірювань, а також поради щодо їх виконання.

Наведені інструкції до 47 лабораторних робіт з фізичних основ механіки, молекулярної фізики, електрики та магнетизму, оптики і понад 500 задач, частина яких надана з детальним розв'язком. Особливий акцент зроблено на розділи механіки, електромагнетизму та матеріалознавчий напрямок. В кінці посібника додається необхідний довідковий матеріал. Все це дозволяє використовувати посібник як на аудиторних та лабораторних заняттях, так і для самостійної роботи студентів. Посібник є базою для виконання модульних та контрольних завдань на факультеті механізації сільського господарства, екологомеліоративному та агрономічному факультетах ДДАУ.

Укладачі: О.Й. Дідоборець, С.В. Козиркіна, Є.Г. Попов, Н.В. Резчик, О.В. Толстенко, В.І. Цоцко.

Рецензенти:

докт. фіз.- мат. наук, проф. Чернай А.В. (Національний гірничий університет),

докт. біологічних наук, проф. Посудін Ю.І. (Національний аграрний університет).

Рекомендовано Міністерством аграрної політики України як навчальний посібник для підготовки бакалаврів за напрямами 0926 “Водні ресурси”, 1302 “Зооінженерія”, 0919 “Механізація та електрифікація сільського господарства” у вищих навчальних закладах III-IV рівнів акредитації (лист № 18-128-13 / 805 від 21.07-2006 р.).

З М І С Т

ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

1. Основні правила роботи в лабораторіях	5
2. Методика лабораторних занять	6
3. Побудова графіків.....	8
4. Короткі відомості про Міжнародну систему одиниць вимірювання (SI).....	9
5. Загальні питання електричних вимірювань.....	14
6. Методика обробки результатів	21

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка.

1. Підбір інструменту при визначенні густини тіл правильної геометричної форми.....	31
2. Визначення питомої ваги твердого тіла зважуванням в двох середовищах.....	33
3. Визначення швидкості та пробивної здатності кулі за допомогою обертового барабана.....	34
4. Дослідження сил тертя за допомогою плоского трибометра.....	36
5. Дослідження основного закону динаміки обертального руху.....	39
6. Дослідження моментів інерції тіл за допомогою закону збереження енергії.....	41
7. Дослідження непружного удару за допомогою балістичного маятника.....	44
8. Дослідження пружного удару куль.....	46
9. Дослідження відношення маси тяжіння до маси інерції.....	48
10. Вивчення гармонічних коливань на прикладі математичного маятника.....	50
11. Вивчення затухаючих коливань на прикладі фізичного маятника.....	53
12. Дослідження прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника.....	55
13. Вивчення стоячої хвилі в трубці.....	57
14. Визначення показника адіабати повітря.....	59
15. Дослідження вологості повітря.....	61
16. Дослідження теплопровідності твердих тіл.....	63
17. Дослідження властивостей газів методом витікання через капіляр... ..	66
18. Визначення універсальної газової сталої акустичним методом.....	68
19. Дослідження зміни ентропії в реальних процесах.....	69
20. Дослідження поверхневого натягу води.....	72
21. Дослідження в'язкості рідини методом Стокса.....	75
22. Дослідження рідин малої в'язкості капілярним віскозиметром.....	77
23. Дослідження температурної залежності коефіцієнта поверхневого натягу.....	79
24. Дослідження справедливості закону Дюлонга і Пті для хімічно простих тіл.....	80

Електрика

25. Вимірювання опору провідників містковою схемою.....	83
26. Дослідження потужності і ККД електродвигуна за допомогою стрічкового гальма.....	85
27. Градування термоелемента.....	87
28. Дослідження температурної залежності опору напівпровідників.....	89
29. Дослідження вольт-амперної характеристики селенового і германієвого випрямлячів.....	93
30. Дослідження роботи двоелектродної вакуумної лампи.....	95
31. Дослідження транзистора типу МП-40, увімкненого за схемою зі спільним емітером.....	98
32. Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі.....	101
33. Вивчення роботи трансформатора.....	103
34. Визначення питомого заряду електрона методом магнітного фокусування.....	105
35. Визначення ємності конденсатора за допомогою змінного струму.....	108
36. Дослідження індуктивності котушки за допомогою змінного струму.....	110
37. Дослідження електромагнітних хвиль за допомогою двохпровідної лінії.....	113

Оптика та фізика атома

38. Дослідження показника заломлення прозорих пластинок за допомогою мікроскопу.....	118
39. Дослідження розчинів за допомогою рефрактометра.....	120
40. Дослідження світла за допомогою дифракційної ґратки.....	123
41. Вивчення спектрів пропускання за допомогою універсального фотометра.....	125
42. Дослідження плоско-опуклої лінзи за допомогою кілець Ньютона.....	127
43. Дослідження випромінювання лазера з допомогою дифракційної ґратки.....	130
44. Дослідження температури нитки розжарення за допомогою оптичного пірометра.....	134
45. Вивчення вольт-амперної характеристики вакуумного фотоелемента.....	137
46. Визначення чутливості напівпровідникового фотоелемента.....	140
47. Дослідження розчинів оптично активних речовин поляризованим світлом.....	143

ЗБІРНИК ЗАДАЧ

Розв'язок задач. Загальні положення.....	147
Приклади розв'язування задач.....	149
Задачі.....	176
Додатки.....	224

ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Лабораторний практикум з фізики ставить за мету закріпити знання, що студенти одержують на лекціях та практичних заняттях, ознайомити студентів в лабораторних умовах з рядом фізичних явищ, вивчити методіку вимірювання фізичних величин та їх обробку.

Кожна лабораторна робота містить коротку теорію або теоретичні відомості про явище, що вивчається, описання методу вимірювання основних фізичних характеристик явища, порядок виконання лабораторної роботи, а також додаткові запитання, на котрі студент має, підготувати усну відповідь.

1. ОСНОВНІ ПРАВИЛА РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЯХ

1. Користуватися приладами та обладнанням дозволяється тільки у відповідності до інструкції та вказівок.

2. Перед виконанням лабораторної роботи шляхом зовнішнього огляду переконатися в тому, що прилади, вимірювальні установки, обладнання справні.

3. Забороняється працювати в лабораторії самому студенту у відсутності викладача.

4. Остерігатися деталей, що обертаються у вимірювальних установках та не мають охоронного обмеження.

5. При роботі з нагрівачами остерігатися опіків при дотику нагрівача або пари.

6. Забороняється вмикання до електричної мережі чи під'єднання до будь-якого іншого джерела струму не перевіреного електричного кола. Електричні кола перевіряє викладач. Перед ввімкненням всі прилади, що використовуються, мають бути установлені так, щоб при поданні в коло максимально великої напруги через прилад міг йти найменший струм.

7. Після під'єднання до джерела струму забороняється переєднувати електричні прилади, тому що можливе ушкодження електричним струмом.

8. Забороняється залишати без нагляду прилади, увімкнені в електромережу.

9. Після закінчення роботи від'єднати вимірювальне коло від джерела струму, загальну лінію, що з'єднує коло з мережею, погасити в лабораторії світло, перевірити водопровідні крани.

10. Забороняється в лабораторії залишати відчиненими вікна або кватирки.

11. Забороняється використання дуже яскравих джерел світла, при роботі з лазерами не допускається попадання в очі прямих світлових променів.

2. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

1. Виконання лабораторних робіт відбувається за графіком, що його на вступному занятті видає кожному студенту викладач.

2. Студенти готуються виконувати лабораторні роботи до початку занять. Підготовка складається з ознайомлення з інструкцією до лабораторної роботи, короткого конспектування інструкції в окремому зошиті. Конспект має містити номер роботи та її назву, основні закони та робочі формули (без доведень), малюнок схеми установки, таблиці для занесення результатів вимірювань і наступних розрахунків. Студенти, що не підготувалися до лабораторної роботи, до її виконання не допускаються.

3. Контролює готовність студента до виконання лабораторної роботи викладач. До контролю входить перевірка конспекту роботи, перевірка знання мети роботи, основних явищ і законів, формул, порядку виконання роботи і розрахунку шуканих величин.

4. Після виконання роботи розрахунки мають бути виконані в лабораторії під контролем викладача. При необхідності викладач може запропонувати виконати повторні виміри.

5. Захист лабораторної роботи проводиться після закінчення оформлення звіту. В таблицю звіту мають бути занесені результати вимірювань та розрахунків. Після таблиці має бути наведений приклад розрахунку з указанням розмірностей всіх величин, що входять у розрахункову формулу.

6. Захист лабораторної роботи проводиться на даному або наступному занятті. Студенти, що мають заборгованість з трьох робіт, не допускаються до виконання наступної роботи.

ПРИКЛАД ЗВІТУ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ

1. Коротка теорія та метод вимірювання.

В основу роботи покладено один з відомих методів випробування стрілецької зброї за допомогою балістичного маятника. Для одержання непружного удару кулі в маятник запресовано пластилін. Розрахункова основа методу – використання законів збереження енергії і імпульсу. Наводиться схема установки.

Закон збереження енергії:

$$m_1 v^2 / 2 = (m_1 + m_2) u^2 / 2 + A \quad (1)$$

Закон збереження імпульсу:

$$m_2 v = (m_1 + m_2) u^2 \quad (2)$$

В формулах m_1 і m_2 , v і u - відповідно маси кулі та маятника, швидкість кулі та швидкість сумісного руху кулі та маятника після удару; A – робота деформації.

Після удару маятник відхиляється за рахунок енергії, що переходить в потенціальну:

$$W_n = (m_1 + m_2) R g (1 - \cos \alpha) = (m_1 + m_2) u^2 / 2 \quad (3)$$

де R - довжина балістичного маятника; g - прискорення вільного падіння; α - найбільший кут відхилення маятника. З рівності (3) знаходимо:

$$u = \sqrt{\frac{2 W_n}{m_1 + m_2}} \quad (4)$$

Після чого з (2) розраховуємо швидкість кулі:

$$v = \frac{m_1 + m_2}{m_1} u \quad (5)$$

а потім роботу деформації:

$$A = W_{kl} \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (6)$$

2. Результати вимірювань та розрахунків зведемо в таблицю:

№	m_2 (кг)	R (м)	α (град)	W_n мДж	u (м/с)	v (м/с)	Δv (м/с)	W_{kl} (Дж)	A (Дж)	ΔA (Дж)
1.	0,178	0,845	4°30''	4,6	0,227	141	7,5	2,92	2,92	0,30
2.	0,178	0,845	4°15''	4,2	0,217	136	0,5	2,64	2,64	0,02
3.	0,178	0,845	4°	3,6	0,201	127	-8,5	2,30	2,30	-0,32
Середні значення:						135,5	5,5	2,62	2,62	0,22

Приклад розрахунку:

$$W_n = (m_1 + m_2) R g (1 - \cos \alpha) = 0,178 \times 0,845 \times 9,81 (1 - 0,9969) = 0,00046 \text{ (Дж)}$$

$$[W_n] = \text{кг м}^2/\text{с}^2 = \text{Дж}$$

$$u = \sqrt{\frac{2 W_n}{m_1 + m_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,00046}{0,178}} = 0,227 \text{ (м/с)};$$

$$[u] = \sqrt{\text{Дж/кг}} = \text{м/с}$$

$$v = \frac{m_1 + m_2}{m_1} u = \frac{0,178 + 0,0002}{0,0002} = 141 \text{ (м/с)};$$

$$W_{kl} = m_1 v^2 / 2 = 0,5 \times 0,000286 \times 141^2 = 2,92 \text{ (Дж)}.$$

Загальний результат:

$$v = (136 \pm 6) \text{ м/с}; A = (2,62 \pm 0,22) \text{ Дж.}$$

3. ПОБУДОВА ГРАФІКІВ

В деяких роботах результат досліджень наводиться у вигляді графіка. Щоб графік був зроблений, дотримуються певних правил. Розглянемо їх на конкретному прикладі, Хай, як це вимагається в роботі з вакуумним фотоелементом, одержано кілька значень фотоструму при відповідних значеннях світлового потоку. По цих значеннях складена таблиця:

Світловий потік, лм	1,1	2,4	3,3	4,9	5,9	9,8
Фотострум, мкА	33,7	107,8	118,2	170,2	186	237

В таблиці зліва обов'язково писати найменування вимірюваної фізичної величини а також вказувати, в яких одиницях ця величина вимірювалась. Відліки по приладах, на основі котрих складена таблиця, можуть бути не цілими, не слід „підганяти“ ці відліки до цілих чисел. За числами, що занесені у таблицю, будується графік. Звичайно на осі абсцис відкладають значення незалежної, тобто тієї величини, що змінюється власне експериментатором в досліді. В розглянутому прикладі нею є світловий потік, який встановлюється зміною відстані джерела світла від фотоелемента. Сила ж фотоструму є залежною величиною. Вона відліковується за мікроамперметром. Залежна зміна відкладається по осі ординат.

На малюнку 1 подано приклад нераціональної побудови графіка. Тут є кілька помилок. Оскільки ці помилки є характерними, ми їх розглянемо детальніше.

1. Невірно вибрано масштаб. За цієї причини крива займає тільки частину площини малюнка, тоді як інша частина залишається зайвою. Масштаб треба вибрати так, щоб найбільші значення величин, занесених в таблицю, виявилися біля кінців осей координат.

2. На осях координат нераціонально позначено масштаб. Для його позначення взято числа з таблиці. Проте масштаб на осях має бути.

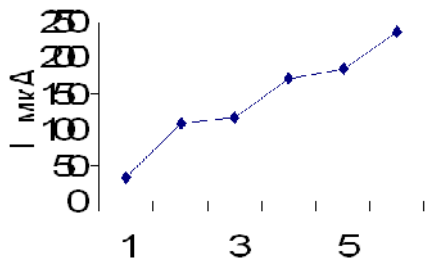


Рис. 1.

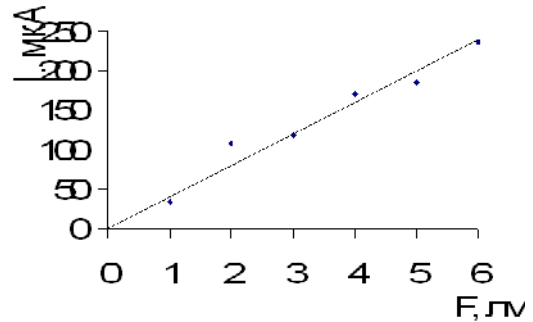


Рис. 2.

3. На графіку не позначено, які величини і в яких одиницях відкладено на осях. Позначення величин треба ставити коло кінців осей, а поблизу – одиниці виміру цих величин.

4. На графіку фактично не позначено експериментальні точки. Положення їх уявляється на перетині пунктирних ліній. Але кожен експериментальну точку треба не тільки позначати, а й обвести кружком, радіус якого дорівнює середній абсолютній похибці в даній серії вимірювань, якщо вони оцінюються в роботі. Допоміжні пунктирні лінії на графіку зображати не треба.

5. На графіку 1 крива проведена так, що вона проходить через всі експериментальні точки. Внаслідок цього крива набуває дещо незвичної форми, тому в неї важко втілити певний фізичний смисл. Треба мати на увазі, що дослід завжди виконується з похибками, тому деякі експериментальні точки на криву не попадуть. Сама ж крива має бути проведена плавно, без необґрунтованих зигзагів, але так, щоб задовольнити одержаним експериментальним точкам. Графік пропонується будувати на міліметровому папері.

На рис. 2 побудований графік з дотриманням усіх вищезазначених вимог. Цей графік побудовано за тими ж даними, що і графік на рис. 1.

Для з'ясування усіх згаданих тут зауважень прочитайте ще раз цей параграф, порівнюючи рисунки 1 та 2.

4. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО МІЖНАРОДНУ СИСТЕМУ ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН (SI)

Оснoву стандарту, що діє в нашій країні, складає Міжнародна система одиниць SI. SI – найбільш досконала сьогодні система одиниць. Вона є єдиною і універсальною системою, яка охоплює всі області вимірювань, встановлює простий і чіткий зв'язок між механічними, тепловими, електромагнітними і іншими величинами.

Основні одиниці SI

МЕТР (м) – довжина, що дорівнює 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p^{10}$ та $5d^5$ атому криптону-86.

КІЛОГРАМ (кг) – маса, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограму.

СЕКУНДА (с) – час, що дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атому цезію-133.

АМПЕР (А) – сила незмінного струму, який при проходженні по кожному з двох прямолінійних провідників безмежної довжини і незначного кругового перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, породжував би між цими провідниками силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини.

КЕЛЬВІН (К) – $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води.

КАНДЕЛА (кд) – сила світла, випромінюваного з поверхні площею $1/600000$ м² полого випромінювача по перпендикулярному напрямку, при температурі затвердіння платини при тиску 101325 Па.

МОЛЬ (моль) – кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки їх міститься у нукліді вуглецю-12 масою 0,012 кг. При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані в групі часток. Кількість структурних елементів, що міститься в одному молі, носить назву числа Авогадро, і воно дорівнює $(6,02252 \pm 0,00028) \cdot 10^{23}$ 1/моль.

Додаткові одиниці SI

Радіан (рад) – кут між двома радіусами круга, які вирізають на колі дугу, довжина якої дорівнює радіусові.

Стерадіан (ср) – тілесний кут з вершиною в центрі сфери, який вирізає на її поверхні площу, що дорівнює квадрату радіусу сфери.

Похідні одиниці SI

Найменування величини	Визначальне рівняння	Одиниця виміру	Скорочене позначення
1	2	3	4

Механічні та теплові величини

1. Площа	$S = l^2$	квадратний метр	м ²
2. Об'єм	$V = l^3$	кубічний метр	м ³

1	2	3	4
3. Швидкість	$v = \Delta l / \Delta t$	<i>метр за секунду</i>	м/с
4. Кутова швидкість	$w = \Delta \varphi / \Delta t$	<i>радіан за секунду</i>	рад/с
5. Прискорення	$a = \Delta v / \Delta t$	<i>метр за секунду в квадраті</i>	м/с ²
6. Кутове прискорення	$\beta = \Delta w / \Delta t$	<i>радіан за секунду в квадраті</i>	рад/с ²
7. Період	T	<i>секунда</i>	с
8. Частота	$\nu = 1/T$	<i>герц</i>	Гц
9. Сила	$F = \Delta(m \cdot v) / \Delta t$	<i>ньютон</i>	Н
10. Густина	$\rho = m/V$	<i>кілограм на кубічний метр</i>	кг/м ³
11. Імпульс тіла (кількість руху)	$K = mv$	<i>кілограм-метр за секунду</i>	кг м/с
12. Момент сили	$M = F \cdot r$	<i>ньютон-метр</i>	Н·м
13. Момент інерції	$I = m \cdot r^2$	<i>кілограм – квадратний метр</i>	кг·м ²
14. Момент імпульсу	$L = I \cdot \beta$	<i>кілограм-квадратний метр за секунду</i>	кг·м ² /с
15. Робота, енергія	$A = F \cdot l$	<i>джоуль</i>	Дж
16. Потужність	$N = \Delta A / \Delta t$	<i>ват</i>	Вт
17. Тиск	$P = F/S$	<i>паскаль</i>	Па
18. Кількість теплоти	$Q = A$	<i>джоуль</i>	Дж
19. Питома теплоємність	$c = Q/(m \cdot \Delta T)$	<i>джоуль на кілограм-кельвін</i>	Дж/(кг·К)
20. Коефіцієнт поверхневого натягу	$\delta = F/l$	<i>ньютон на метр</i>	Н/м
21. Коефіцієнт теплопровідності	$K = Q \cdot \Delta l / (\Delta T \cdot S \cdot t)$	<i>ват на метр кельвін</i>	Вт/(м·К)
22. Коефіцієнт в'язкості	$\eta = F \cdot \Delta l / (\Delta v \cdot S)$	<i>паскаль-секунда</i>	Н·с/м ²
23. Теплотворна здатність палива	$q = Q/m$	<i>джоуль на кілограм</i>	Дж/кг
24. Ентропія	$S = \Delta Q/T$	<i>джоуль на кельвін</i>	Дж/К

Електромагнітні і світлові величини

1 Кількість електрики	$q = I \cdot \Delta t$	<i>кулон</i>	Кл
-----------------------	------------------------	--------------	----

1	2	3	4
2 Потенціал, напруга, ЕРС	$U = A/q$	<i>вольт</i>	В
3 Напруженість електричного поля	$E = \Delta U/\Delta l$	<i>вольт на метр</i>	В/м
4 Поверхнева густина заряду	$\delta = \Delta q/\Delta S$	<i>кулон на квадратний метр</i>	Кл/м ²
5 Індукція електричного поля	$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E$	<i>кулон на квадратний метр</i>	Кл/м ²
6 Потік індукції електричного поля	$N = D \cdot S = q$	<i>кулон</i>	Кл
7 Електроємність	$C = q/U$	<i>фарад</i>	Ф
8 Електричний опір	$R = U/I$	<i>ом</i>	Ом
9 Електропровідність	$\beta = 1/R$	<i>сименс</i>	См
10 Питомий електричний опір	$\rho = R \cdot S/l$	<i>ом-метр</i>	Ом·м
11 Питома електропровідність	$\chi = 1/\rho$	<i>сименс на метр</i>	См/м
12 Густина струму	$j = I/S$	<i>ампер на квадратний метр</i>	А/м ²
13 Напруженість магнітного поля	$H = I/(2r)$	<i>ампер на метр</i>	А/м
14 Магнітний потік	$\Delta\Phi = -E \cdot \Delta t$	<i>вебер</i>	Вб
15 Магнітна індукція	$B = \Delta\Phi/\Delta S$	<i>тесла</i>	Тл
16 Індуктивність	$L = \Phi/I$	<i>генрі</i>	Гн
17 Магнітна стала	$\mu_0 = B/(\mu \cdot H)$	<i>генрі на метр</i>	Гн/м
18 Магнітний момент	$p = I \cdot S$	<i>ампер-квадратний метр</i>	А·м ²
19 Світловий потік	$F = 4 \cdot \pi \cdot I$	<i>люмен</i>	лм
20 Світлова енергія	$L = F \cdot t$	<i>люмен-секунда</i>	лм·с
21 Освітленість	$E = F/S$	<i>люкс</i>	лк
22 Світимість	$R = F/S$	<i>люкс</i>	лк
23 Яскравість	$B = I/S$	<i>кандела на квадратний метр</i>	кд/м ²
24 Оптична сила	$D = 1/F$	<i>діоптрія</i>	дптр

Визначення деяких одиниць системи SI

НЬЮТОН – сила, яка надає тілу масою 1 кг прискорення 1 м/с^2 в напрямку дії сили.

ДЖОУЛЬ – робота, що здійснюється силою 1 Н на шляху 1 м.

ВАТ – потужність, при якій за 1 с виконується робота 1 Дж.

ПАСКАЛЬ – тиск, що спричинюється силою 1 Н, рівномірно розподіленою по нормальній до неї поверхні площею 1 м^2 .

КУЛОН – кількість електрики, яка проходить через поперечний перетин провідника за 1 с при струмі 1 А.

ВОЛЬТ – різниця потенціалів двох точок електричного поля, при переміщенні між якими заряду в 1 Кл здійснюється робота в 1 Дж.

ФАРАДА – ємність провідника, потенціал якого підвищується на 1 В при наданні йому заряду 1 Кл.

ОМ – опір провідника, по якому тече струм в 1 А при напрузі на кінцях провідника в 1 В.

ВЕБЕР – магнітний потік, створюваний однорідним полем з індукцією 1 Тл на нормально розміщеній до поля поверхні площею 1 м^2 ; або: вебер – магнітний потік, при рівномірному зникненні якого за 1 с у зчіпленому з ним контурі виникає ЕРС індукції 1В.

ТЕСЛА – індукція такого однорідного магнітного поля, в якому магнітний потік через площину в 1 м^2 , перпендикулярну напрямку поля, дорівнює 1Вб.

ГЕНРІ – індуктивність провідника, в якому при струмі 1А з контуром провідника зчіплюється магнітний потік 1 Вб.

ЛЮМЕН – світловий потік, який посиляє точкове джерело світла силою 1 кд в тілесний кут 1 стер.

ЛЮКС – освітленість, створювана світловим потоком 1 лм при рівномірному його розподілі на площі 1 м^2 .

Префікси для утворення кратних і часткових одиниць

Префікси кратної одиниці	Співвідношення до основної одиниці	Префікси часткової одиниці	Співвідношення до основної одиниці
дека- (да)	10^1	деци- (д)	10^{-1}
гекто- (г)	10^2	сантис- (с)	10^{-2}
кіло- (к)	10^3	мілі- (м)	10^{-3}
мега- (М)	10^6	мікро- (мк)	10^{-6}
гіга- (Г)	10^9	нано- (н)	10^{-9}
тера- (Т)	10^{12}	піко- (п)	10^{-12}
пета- (П)	10^{15}	фемто- (ф)	10^{-15}
екса- (Е)	10^{18}	атто- (а)	10^{-18}

Співвідношення між одиницями SI і одиницями інших систем, а також позасистемними одиницями

$$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^5 \text{ мкм} = 10^9 \text{ нм} = 10^{10} \text{ \AA}$$

$$1 \text{ кг} = 10^3 \text{ г} = 0,102 \text{ т.о.м. (технічна одиниця маси)} = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ а.о.м. (атомна одиниця маси)}$$

$$1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дн} = 0,102 \text{ кГ}$$

$$1 \text{ Н}\cdot\text{м} = 10^7 \text{ дн}\cdot\text{см} = 0,102 \text{ кГ}\cdot\text{см}$$

$$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ ерг} = 0,102 \text{ кГ}\cdot\text{м} = 0,239 \text{ кал} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}\cdot\text{год} = 9,87 \cdot 10^{-3} \text{ л}\cdot\text{атм} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ МеВ}$$

$$1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ ерг/с} = 0,102 \text{ кГ}\cdot\text{м/с} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ к. с.}$$

$$1 \text{ Па} = 10 \text{ дн/см}^2 = 0,102 \text{ кГ/м}^2 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ат} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм. рт. ст.} = 0,102 \text{ мм вод. ст.}$$

$$1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГСЕ}$$

$$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ максвел (Мкс)}$$

$$1 \text{ В} = 1/300 \text{ СГСЕ}$$

$$1 \text{ В/м} = 1/(3 \cdot 10^4) \text{ СГСЕ}$$

$$1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см (СГСЕ)}$$

$$1 \text{ А/м} = 1,26 \cdot 10^{-2} \text{ ерстед (Е)}$$

$$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ гаус (Гс)}$$

$$1 \text{ Гн} = 10^9 \text{ см}$$

5. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

На практиці виникає необхідність вимірювання електричних величин в надто широких межах. Так, наприклад, межі вимірювань постійних струмів визначаються приблизно від 10^{-11} до 10^5 А. Часто одні і ті ж прилади та вимірювальні механізми використовують для вимірювань величин в широких межах. Цю задачу вирішують за допомогою шунтів, додаткових опорів, подільвачів напруги та вимірювальних підсилювачів.

Шунти і додаткові опори

Шунт являє собою опір, що вмикається паралельно до вимірювального механізму (амперметра) в коло вимірювального струму I . На рис. 1: R_i – опір

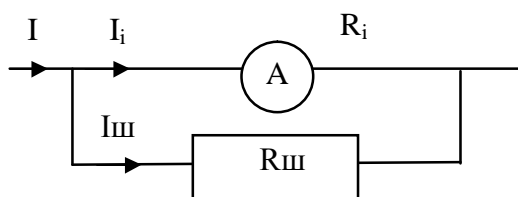


Рис.1

вимірювального механізму, $R_{ш}$ - опір шунта.

Якщо треба збільшити межу вимірювань в n разів($n = I / I_1$), то опір шунта на основі співвідношення $I_1 R_1 = I_{ш} R_{ш}$ та $I_{ш} = I - I_1$ буде дорівнювати:

$$R_{ш} = R_1 / (n - 1)$$

Шунти виготовляють зі спеціального сплаву – манганіну. Для струмів до 30А шунти звичайно влаштовують всередину приладу, а для струмів понад 30А застосовують зовнішні шунти. Для магнітоелектричних приладів шунти на струми до 30 А виготовляють на кілька меж.

Для розширення меж вимірювання вольтметрів різних систем використовують додаткові опори. Вони ж застосовуються і для розширення меж в інших паралельних колах. Додаткові опори вмикаються з вимірювальним механізмом послідовно. Величина опору, що залежить від заданої межі вимірювань, може бути знайдена на основі наступних міркувань.

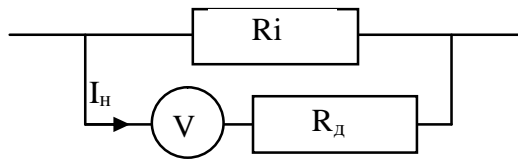


Рис.2

Нехай на рис. 2 R_i - опір обмотки вимірювального механізму, I_H - його номінальний струм. Напруга U_H , необхідна для повного відхилення рухомої частини, буде дорівнювати $U_H = I_H R_i$. Якщо треба підвищити цю напругу, тобто межу вимірювань вольтметра в m разів шляхом вмикання додаткового опору R_d , величина останнього може бути знайдена у такий спосіб:

$$I_H R_i m = I_H (R_i + R_d), \text{ звідки } R_d = R_i (m - 1).$$

Додатковий опір виготовляють із манганінового проводу, намотаного на каркас з ізоляційного матеріалу.

Багатограничні прилади

Дуже часто електровимірювальні прилади в процесі заводського виробництва забезпечуються відповідним набором шунтів або додаткових опорів, що інколи розміщуються в самому корпусі приладу, складаючи частину його електричної схеми.

Вимірювальний прилад, електричну схему якого можна перемкнути для зміни діапазонів вимірюваної величини, називається багатограничним. Існування багатограничних приладів зумовлено тим, що часто треба з достатнім ступенем точності вимірювати електричні величини в досить широких межах.

Багатограничний прилад має вмикатись так, щоб відносна похибка вимірювання була мінімальною, тобто щоб стрілка приладу відхилилась на максимальний кут, але не виходила за межі шкали. Щоб запобігти псуванню приладу, його вмикають на максимальному діапазоні, і після грубого визначення вимірюваної величини переходять на той діапазон, верхня межа якого найближча до значення вимірюваної величини.

Чутливість та ціна поділки електровимірювального приладу визначаються таким чином. Чутливістю S електровимірювального приладу до вимірюваної

величини x називається похідна від вимірюваного положення покажчика величини за вимірюваною величиною x : $S = df / dx$. Розмірність чутливості залежить від характеру вимірюваної величини. Наприклад, чутливість приладу до струму вимірюється в поділках на ампер (под./А), до напруги - в поділках на вольт (под./В).

Величина, обернена чутливості, називається ціною поділки приладу. Вона показує значення електричної величини, що викликає відхилення на одну поділку.

Похибки приладів

Кожен вимірювальний прилад характеризується тими похибками, що він допускає. Величина, вимірювана взірцевим приладом, приймається за дійсне (істинне) значення. Абсолютною похибкою називається величина, що дорівнює різниці між показанням приладу x' і істинним значенням вимірюваної величини x .

$$\Delta x_i = x' - x.$$

Точність вимірювань характеризується відносною похибкою ε_1

$$\varepsilon_1 = \Delta x / x'.$$

Іншою важливою характеристикою точності електровимірювальних приладів є так звана приведена похибка ε_2 , тобто відношення абсолютної похибки до граничного значення вимірюваної величини x'' - найбільшого значення, яке можливо виміряти по шкалі приладу

$$\varepsilon_2 = \Delta x / x''.$$

Для приладу з нулем по середині шкали приведена похибка визначається як відношення абсолютної похибки Δx до суми верхньої і нижньої межі вимірювання. Приведена похибка приладів вводиться тому, що відносна похибка приладів не залишається сталою.

Приведена похибка приладів пов'язана з точністю електровимірювальних приладів. Згідно з ГОСТ за ступенями точності вимірювань електровимірювальні прилади поділяються на декілька класів: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2; 4. Показник класу η визначає приведену похибку вимірювань у відсотках. Отже, абсолютна похибка визначається так:

$$\Delta x = x'' \eta$$

Наприклад, міліамперметр класу 0,5 зі шкалою у 150 мА дає в будь-якому місці шкали абсолютну похибку

$$\Delta I = 150,0 * 0,005 = 0,725 \text{ мА}$$

Прилади класів 0,1, 0,2, 0,5 застосовують для точних вимірювань і називають лабораторними. В техніці застосовують прилади класів 1, 1,5, 2,5 і 4. Клас приладу звичайно вказується на його шкалі.

Точність і чутливість приладу не взаємопов'язані. Бувають прилади високої чутливості, але малої точності, і навпаки.

Ізоляція приладів

Безпечність експлуатації вимірювальних приладів вимагає, щоб всі доступні частини приладу були надійно ізольовані від струмопровідних частин, а також щоб була усунена можливість замикання через корпус приладу на землю.

Ізоляція кожного приладу перевіряється високою напругою, прикладеною між корпусом і з'єднаними разом затискачами. Випробувальна напруга перевершує робочу інколи в 10 разів і більше. Крім гарантії від пробую на землю ставиться вимога, щоб відстань між струмопровідними частинами та металевим корпусом були не менше нормативної величини. Ці відстані встановлюються окремо для повітря (розрядна відстань) і для поверхні ізоляції (шляхи поверхневих втрат). При цьому береться до уваги, що з часом, внаслідок забруднення, ізоляція погіршується, особливо ізоляція, що знаходиться зовні корпусу.

Вплив зовнішніх магнітних полів

Всі електровимірювальні прилади, за винятком приладів електростатичної та теплової систем, піддаються впливу магнітних полів. Зовнішні магнітні поля, складаючись з власним магнітним полем приладу, змінюють його показання. Вплив зовнішніх магнітних полів виключають в приладах, що зветься астатичними. В цих приладах зовнішнє магнітне поле компенсують особливим влаштуванням схеми так, щоб в одній частині схеми воно посилювало внутрішнє поле, а в іншій послабляло.

Класифікація електровимірювальних приладів

Електровимірювальні прилади можна класифікувати за різними ознаками:

- а) призначенням або родом вимірюваної величини (амперметри, вольтметри, омметри і т.д.);
- б) рід струму (постійний, змінний або обидва);
- в) ступень точності (клас точності);
- г) принцип дії і інше.

За принципом дії електровимірювальні прилади розподіляють на 12 систем:

- 1) магнітоелектричну;
- 2) електромагнітну;
- 3) електродинамічну;
- 4) індукційну;
- 5) теплову;
- 6) електростатичну;
- 7) детекторну;
- 8) електронну;
- 9) електролітичну;
- 10) термоелектричну;
- 11) вібраційну;

12) фотоелектричну.

Найбільш поширені прилади перших трьох систем.

Магнітоелектрична система. Електровимірювальні прилади цієї системи

застосовують для вимірювання сили струму і напруги в колах з постійним струмом. Лабораторні вимірювання на постійному струмі проводять здебільшого магнітоелектричними приладами.

В магнітоелектричних приладах обертальний момент утворюється в результаті взаємодії магнітного поля постійного магніту і провідника зі струмом, який виготовляють у вигляді котушки. На рис.3 показана рамка магнітоелектричного приладу, що знаходиться в радіальному магнітному полі.

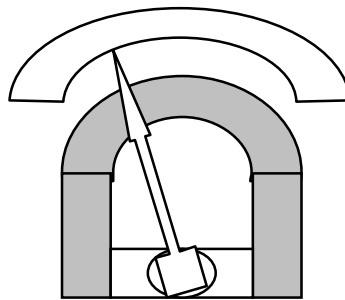


Рис.3

При протіканні струму по обмотці рамки виникають сили F , що намагаються повернути рамку так, щоб її площина стала перпендикулярною до напрямку магнітних силових ліній. При повороті рамки закручуються пружинки, і виникає протидіючий момент. При рівності обертального і протидіючого моментів рухома частина зупиняється.

Обертальний момент в приладах такої системи пропорційний силі струму $M_1 = k_1 \cdot I$. Оскільки протидіючий момент M_2 , створюваний спіральними пружинами, пропорційний куту закручування $M_2 = k_2 \cdot \phi$, то кут відхилення котушки, а отже, і скріпленої з нею стрілки, буде пропорційний силі струму, що протікає по обмотці:

$M_1 = M_2;$ $k_2 \cdot \phi = k_1 \cdot I$. Лінійна залежність між силою струму I і кутом відхилення забезпечує рівномірність шкали приладу. Це дозволяє виготовлювати їх комбінованими та багатограничними.

Магнітоелектричні прилади належать до числа найбільш точних. Вони виготовляються аж до класів 0,1 і 0,2. Висока точність цих приладів пояснюється рядом причин. Наявність рівномірної шкали зменшує похибки градування і відліку. Завдяки сильному власному магнітному полю вплив сторонніх полів на показання приладів надто незначне. Важливою якістю магнітоелектричних приладів є велика чутливість їх і мале власне споживання потужності. Недоліками цих приладів є можливість вимірювань тільки в колах постійного струму та чутливість до перевантажень. Використовують ці прилади здебільшого як амперметри, вольтметри і омметри.

Електромагнітна система. Прилади електромагнітної системи застосовують для вимірювань сили струму і напруги в колах змінного і постійного струму.

Обертальний момент у електромагнітних приладів виникає в результаті взаємодії магнітного поля котушки, по обмотці якої протікає вимірювальний струм, з одним або кількома феромагнітними осердями, що звичайно складають рухому частину приладу.

На рис. 4 показаний вимірювальний механізм приладу з плоскою котушкою. Котушка намотується мідним дротом і має повітряний проміжок, в який може входити осердя, що ексцентрично закріплено на осі. Матеріал осердя має бути з високою магнітною проникністю, що сприяє збільшенню обертального моменту при заданій величині потужності, яку споживає прилад, та мінімальним значенням коерцитивної сили, що зменшує похибки від гістерезису.

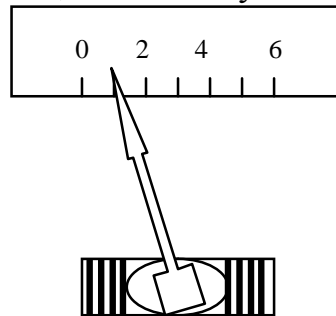


Рис.4.

Магнітне поле котушки пропорційне струмові; намагнічування залізного осердя збільшується із збільшенням струму. В зв'язку з цим можна приблизно вважати, що в електромагнітному приладі обертальний момент M_1 пропорційний квадрату сили струму:

$$M_1 = k_1 I^2$$

Протидіючий момент M_2 , створюваний пружинкою, пропорційний куту повороту рухомої частини приладу:

$$M_2 = k_2 \varphi$$

Рівновага рухомої частини приладу визначається рівністю моментів, діючих на неї в протилежних напрямках, тобто $M_1 = M_2$, звідки одержуємо

$$k_1 I^2 = k_2 \varphi$$

Останній вираз показує, що шкала електромагнітного приладу нерівномірна, квадратична.

Одним з недоліків електромагнітних приладів є сильний вплив зовнішніх магнітних полів, тому що власне магнітне поле приладу невелике.

В астатичному вимірювальному механізмі на осі рухомої частини закріплені два однакові осердя, кожне з яких розміщується в магнітному полі однієї із котушок, ввімкннутих між собою послідовно. Напрямок обмоток вибирають так, щоб магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 котушок, рівні за величиною і конфігурацією, були спрямовані назустріч один одному. Вісь рухомої частини такого приладу буде знаходитися під дією суми двох моментів, кожний з яких створюється одним з осердь і діючою на нього котушкою. Якщо такий механізм помістити в однорідне зовнішнє магнітне поле, то один з моментів, для якого напрямки власного і збурюючого полів співпадають, збільшиться, а

інший відповідно – зменшиться. Сумарний момент, діючий на систему, а отже, і показання приладу, не зміняться.

Електродинамічна система. В електродинамічній системі приладів обертальний момент виникає в результаті взаємодії магнітних полів нерухомої і рухомої котушок зі струмами. Застосовують ці прилади для вимірювань струмів, напруги і потужності в колах постійного і змінного струмів. В середині нерухомо закріпленої котушки розміщують рухому котушку, з якою жорстко зв'язана стрілка, що переміщується над шкалою.

Протидіючий момент створюється спіральними пружинками. Вимірюваний струм проходить через обидві котушки. В залежності від призначення електродинамічного приладу котушки в ньому з'єднуються послідовно або паралельно. В першому наближенні обертальний момент M_1 , діючий на рухому котушку, пропорційний як силі I_1 в нерухомій котушці, так і силі струму I_2 в рухомій котушці:

$$M_1 = k I_1 I_2,$$

де k - коефіцієнт пропорційності.

При обертанні рухомої котушки пружинки створюють протидіючий момент M_2 , пропорційний куту φ , на який повернулася котушка

$$M_2 = k_2 \varphi$$

При рівності моментів M_1 і M_2 рухома котушка зупиниться, тобто

$$k I_1 I_2 = k_2 \varphi$$

якщо котушки з'єднані послідовно, то

$$\varphi \approx I^2,$$

тобто шкала електродинамічного приладу нерівномірна.

На практиці для вимірювання потужності, що споживається в колі, широко застосовується електродинамічний ватметр.

До переваг приладів електродинамічної системи треба віднести можливість вимірювань як на постійному струмі, так і на змінному; достатню точність. Недоліки: нерівномірність шкали амперметрів і вольтметрів, чутливість до перевантажень.

Теплова система. Принцип дії приладів теплової системи ґрунтується на зміні довжини провідника внаслідок його нагрівання при протіканні по ньому струму. Вимірюваний струм проходить по тонкій дротинці, кінці котрої закріплені. Дріт виготовляється зі сплаву платини з іридієм. При проходженні струму по дротові відбувається його нагрівання, в результаті чого він продовжується, і це викликає відхилення стрілки приладу. Прилади теплової системи придатні для вимірювань як на постійному струмі, так і на змінному. Вони практично не чутливі до зовнішніх магнітних полів, але нерівномірність їх шкали та наявність теплової інерції, залежність показань від температури навколишнього середовища є основними недоліками цих приладів.

Індукційна система. Будова приладів індукційної системи ґрунтується на взаємодії струмів, що індукуються в рухомій частині приладу, з магнітним полем нерухомих електромагнітів. До індукційної системи належать, наприклад, електролічильники змінного струму, є також ватметри цієї системи.

Вібраційна система. Будова приладів цієї системи основана на резонансі власних коливань рухомої частини приладу коливань змінного струму. Ці прилади застосовуються переважно для вимірювання частоти струму.

Електростатична система. Будова приладів цієї системи ґрунтується на взаємодії двох або більше електрично заряджених провідників. Під дією сил електричного поля рухомі провідники переміщуються відносно нерухомих.

Електростатичні прилади здебільшого застосовуються як вольтметри для безпосереднього вимірювання високих напруг.

Термоелектрична система. Система характеризується застосуванням однієї або кількох термопар, генеруючих у вимірювальний прилад магнітоелектричної системи постійний струм, що виникає під дією теплоти, яка виділяється вимірюваним струмом. Прилади цієї системи застосовуються здебільшого для вимірювання струмів високої частоти.

Детекторна система. Будова цієї системи основана на тому, що змінний струм випрямляється за допомогою випрямлячів, влаштованих у прилад. Одержаний у такий спосіб пульсуючий струм вимірюється за допомогою чутливого приладу магнітоелектричної системи.

Електронна система. Прилади цієї системи об'єднують електровимірювальні прилади, переважно магнітоелектричної системи, та електронні пристрої (підсилювачі, генератори, перетворювачі, осцилографи, цифрові індикатори і т. д.).

6. МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

6.1. Вимірювання

Вимірювання будь-якої фізичної величини називають дією, в результаті якої визначають, у скільки разів вимірювана величина більша/менша за величину, обрану за еталон.

В основу системи SI, як ми бачили вище, покладені сім основних еталонів: метр, кілограм, секунда, кельвін, моль, ампер, кандела – та два додаткові: радіан і стерadian.

6.2. Види вимірювань

Процес вимірювання може здійснюватись по різному, залежно від роду вимірюваної величини та прийомів вимірювань. Всі фізичні вимірювання поділяються на прямі та непрямі вимірювання.

При прямих вимірюваннях вимірювана величина безпосередньо порівнюється з одиницею виміру за допомогою приладу з проградуєваною шкалою. До таких вимірювань належать вимірювання довжини - масштабною лінійкою, штангенциркулем, мікрометром, оптиметром, інтерферометрами, лазерним дальноміром; вимірювання маси - на важільних вагах (терезах) за

допомогою різноваг, автоматичних або електронних вагах; вимірювання проміжків часу - за допомогою годинника, секундоміра, частотоміра, осцилографа; вимірювання температури - термометром, термопарою, пірометром, термометром опору; вимірювання сили струму - за допомогою амперметра, гальванометра, електронними приладами і т.д. Значення вимірюваної величини при цьому відлічується по шкалі або підраховується число та значення мір, різноваг і т.д.

При непрямих вимірюваннях шукана величина підраховується за результатами прямих вимірювань інших величин, що зв'язані з нею функціональною залежністю. Наприклад, неможливо безпосередньо визначити значення прискорення сили тяжіння g , але його легко знайти із закону вільного падіння -

$$g = 2h / t^2$$

та формули для періоду коливань математичного маятника -

$$g = 4\pi^2 L / T^2$$

Прикладами непрямих вимірювань є результати вимірювань швидкості руху за величиною шляху та проміжку часу, вимірювання густини за вимірами маси тіла та його об'єму та ін.

6.3. Точність вимірів та її роль

Немає жодної області техніки, галузі господарства, де не проводились би вимірювання фізичних величин. Вимірювання дозволяють об'єктивно оцінити фізичні явища і використати їх для розвитку науки і техніки. Без вимірювань неможливий контроль за технологією та якістю кінцевого продукту.

Ніяке вимірювання не може бути абсолютно точним. Його результат неодмінно містить певну похибку. Вимірюючи приладом якусь величину, ми не спроможні зробити похибку меншу тієї, що визначається похибкою вимірювального пристрою. Разом з тим немає сенсу домагатися більшої точності вимірювань, ніж це необхідно для вирішення поставленого завдання. Удосконалення техніки вимірювань шляхом підвищення їх точності сприяє не тільки досягненням в науці, але й має важливе практичне значення.

6.4. Джерела та типи похибок

Вимірюючи якусь фізичну величину, ми будемо одержувати в кожному окремому вимірюванні різні її значення, котрі групуються біля певного значення. Змінивши метод вимірювання тієї ж самої величини, ми виявляємо, що друга серія дає значення, що згруповуються біля якогось іншого значення.

Нехай, наприклад, вимірюють прискорення сили тяжіння методом падаючої кульки, а також за допомогою математичного маятника. В першому випадку одержуємо серію 1, а в другому – серію 11 (рис.3).

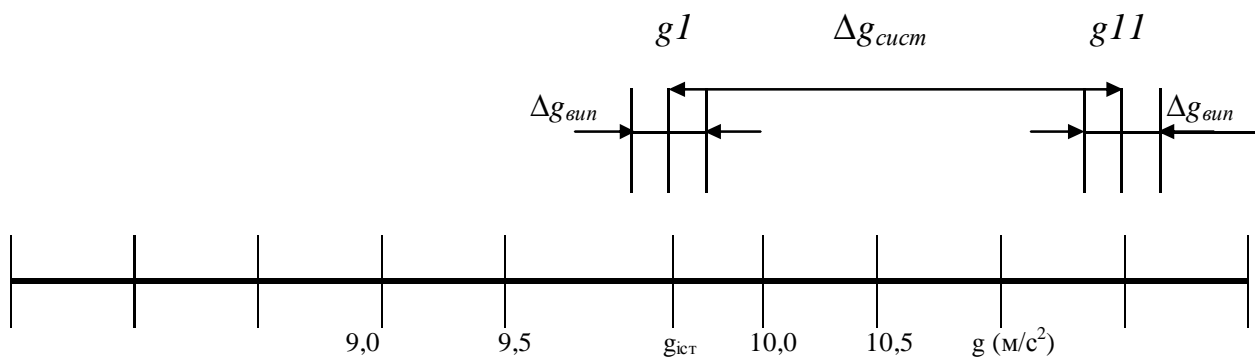


Рис. 3

Чому одержуються різні значення в межах однієї серії, чому результати вимірювань однієї і тієї ж величини групуються в окремі серії в залежності від методу вимірювання? Відповідь на ці питання можна одержати, познайомившись з теорією похибок та методами обробки експериментальних результатів.

Припустимо, що ми одержали величезну сукупність вимірювань однієї і тієї ж величини. Які методи маємо застосувати при вивченні цієї сукупності? Розділ математики, який вивчає системи, що складаються з великої сукупності елементів, називається математичною статистикою. В математичній статистиці і теорії ймовірностей доводиться, що середнє арифметичне значення ряду вимірювань наближається до істинного значення краще, ніж більшість вимірюваних значень. Оскільки часто ми не знаємо істинного значення, то логічно прийняти для нього величину середнього арифметичного $\langle g \rangle$

$$\langle g \rangle = (g_1 + g_2 + \dots + g_n) / n,$$

де n – число вимірювань, g_i – значення окремих вимірювань.

Похибки, що викликають розсіяння результатів коло середнього арифметичного, визначаються випадковими причинами, тому передбачити кожний черговий результат вимірювань неможливо, проте можна передбачити параметри розсіяння результатів коло середнього значення вимірюваної величини.

Крім випадкових, існують ще так звані систематичні похибки, які породжуються цілим рядом причин, наприклад, зіпсованістю або недосконалістю приладів, невірним методом вимірювань, властивостями об'єкту вимірювань. Систематичні похибки можуть не впливати на розсіяння результатів вимірювань коло середнього значення, але знайдене середнє значення буде далеко відстояти від істинного. Величина систематичної похибки визначається так:

$$\Delta g = \langle g \rangle - g_{\text{іст}}$$

Це положення наочно представлено на рис. 3.

В процесі вимірювань можуть з'явитись грубі помилки (промахи), котрі виникають в разі використання неперевіреного або зіпсованого приладу, недбалого відліку показу, невірного включення приладу, нерозбірливості запису його показань.

Від систематичних похибок та промахів має позбутись сам експериментатор, застосовуючи найдосконаліші методи вимірювань та проявляючи особливу ретельність та увагу під час вимірювань.

Отже, існують три типи похибок вимірювань:

1. Грубі (промахи).
2. Систематичні.
3. Випадкові.

Перші мають бути вилучені повторними вимірюваннями, які проводяться в дещо змінених умовах, дбайливим проведенням експерименту, повторенням експерименту іншим аналогічним приладом і т.д. Систематичні похибки можна усунути застосуванням досконалих приладів, методів вимірювань, нарешті, використанням теоретичних формул, що найбільш правильно описують зв'язок між спостережуваними та шуканими величинами. Випадкові похибки підпорядковуються теорії похибок, але слід пам'ятати, що використання результатів останньої можливе тільки у випадку помітного розсіяння результатів вимірювань. Вимірювальні прилади, що використовуються в лабораторіях, часто дають систематичні похибки, які значно перевершують випадкові.

6.5. Абсолютні і відносні похибки

Абсолютною похибкою окремого виміру Δg_i називають різницю між вимірним значенням g_i і середнім значенням декількох результатів вимірювань:

$$\Delta g_i = g_i - \langle g \rangle$$

Абсолютна похибка не характеризує якість вимірювань. Наприклад, абсолютна похибка вимірювання довжини 1мм нічого не говорить нам про його точність. Якщо вимірювалась відстань 10 м, то точність результату слід визнати високою, проте при вимірюванні діаметра кульки в 10 мм така точність явно незадовільна. Для характеристики якості окремого виміру вводять в розгляд відносну похибку: відношення абсолютної похибки окремого виміру до вимірюваної величини. Абсолютні похибки можуть бути як позитивними, так і негативними, тому що частина вимірювань завжди матиме значення, більш за середні, а інша – менші.

При спрощеному методі врахування похибок часто діють так. Знаходять відношення середнього значення модуля абсолютної похибки

$$\langle \Delta g \rangle = (|\Delta g_1| + |\Delta g_2| + \dots + |\Delta g_n|) / n$$

до середнього значення вимірюваної величини, і цим відношенням ε (відносною похибкою) характеризують точність вимірювань:

$$\varepsilon = \langle \Delta g \rangle / \langle g \rangle.$$

Можна знайти таку величину Δg , що в середину інтервалу

$$[\langle g \rangle - \Delta g, \langle g \rangle + \Delta g] \tag{1}$$

завжди буде попадати задана частка результатів вимірювань. Звичайно ж, значення Δg не дорівнює середньому значенню модуля абсолютної похибки.

Якщо ставиться завдання, наприклад, щоб в певний інтервал потрапило 90 % результатів вимірів, то таке значення Δg буде істотно більше середнього значення модуля абсолютної похибки. Інтервал (1) називають довірчим інтервалом, а частку результатів, що потрапляють в цей інтервал, надійністю вимірювань. При безмежному числі вимірювань надійність наближаються до так званої довірчої ймовірності. Постає питання: чи можна зменшити інтервал (1), зберігаючи незмінною надійність? Відповідь на це та багато інших питань дає статистична теорія випадкових похибок, з якої розглянемо тільки деякі моменти.

6.6. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПОХИБОК

6.6.1. Джерела випадкових похибок

Як відзначалося вище, випадковими називають похибки, причини кожної з яких наперед невідомі. Випадкові похибки, як правило, зумовлені великою кількістю причин, що діють при кожному окремому вимірі різним способом. Такі похибки можна звести до мінімуму, але цілком усунути неможливо. Випадкові похибки залежать від дії зовнішніх умов (температура, тиск, вологість і т. п.), що змінюються безперервно. При вивченні випадкових похибок розглядають загальні закономірності, що описують характер розподілу випадкових похибок, розсіяння їх при повторних вимірах та ін.

6.6.2. Середнє значення фізичної величини. Математична ймовірність.

Нехай при вимірюванні деякої фізичної величини g одержано ряд її значень:

$$g_1, g_2, g_3, \dots, g_n, \quad (2)$$

серед яких є i співпадаючі значення. Середнє значення результатів вимірювань визначається за формулою:

$$\langle g \rangle = (n_1 g_1 + n_2 g_2 + \dots) / n, \quad (3)$$

де n_i - число вимірювань з результатом g_i , так що загальне число вимірювань дорівнює n ($n_1 + n_2 + \dots = n$). Величини n_1, n_2, \dots мають зміст чисел, сприятливих для появи окремих результатів вимірів g_1, g_2, \dots . Відношення $n_1/n, n_2/n, \dots$ будуть характеризувати частоти появи даного значення вимірюваної величини. При необмеженому зростанні числа вимірів частоти прямують до усталених значень, кожне з яких називається ймовірністю появи даного значення P_i

$$P_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n} \quad (4)$$

Якщо задані ймовірності появи окремих вимірів, то співвідношення (3) можна переписати у вигляді:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \langle g \rangle = P_1 g_1 + P_2 g_2 + \dots \quad (5)$$

За формулою (5) визначається середнє значення дискретної величини через заданий дискретний розподіл ймовірностей P_i . Проте часто буває так, що розподіл ймовірностей є неперервною функцією вимірюваної величини чи аргументу, від якого залежить вимірювана величина. Нехай, наприклад, значенню g відповідає ймовірність $P(g)$, а значенню $g + dg$ - ймовірність $P(g) + dP(g)$, де dg та $dP(g)$ - безконечно малі величини. Такий розподіл ймовірностей називають неперервним. У випадку неперервного розподілу ймовірностей величину $dP(g)$ виражають через похідну $p(g)$:

$$dP(g) = p(g)dg, \quad (6)$$

де $p(g)$ називають законом розподілу ймовірностей фізичної величини g або густиною ймовірностей. В разі неперервного розподілу ймовірностей середнє значення вимірюваної величини подають за допомогою інтегралу:

$$\langle g \rangle = \int g p(g) dg \quad (7)$$

де інтегрування ведуть за всіма значеннями g .

Зауважимо, що при відомому розподілі ймовірностей середнє значення, що обчислюється за виразами (5) та (7), називають математичним сподіванням m фізичної величини g . Різниця тут не термінологічна, а має той смисл, що математичне сподівання при скінченному числі вимірів визначити неможливо, тому що відносна частота появи даної фізичної величини тільки гранично наближається до ймовірності появи даного значення.

6.6.3. Дисперсія

Введемо в розгляд середнє значення квадрату відхилення результатів вимірювання від середнього:

$$S_n^2 = ((g_1 - \langle g \rangle)^2 + (g_2 - \langle g \rangle)^2 + \dots + (g_n - \langle g \rangle)^2)/n \quad (8)$$

При безмежному зростанні числа вимірювань середнє значення випадкової величини $\langle g \rangle$ наближається до математичного сподівання m , а середнє значення квадрату відхилення від середнього S_n^2 - до усталеного значення, яке називається дисперсією даної випадкової величини σ^2 :

$$\sigma^2 = P_1 (g_1 - m)^2 + P_2 (g_2 - m)^2 + \dots + P_n (g_n - m)^2 \quad (n \rightarrow \infty), \quad (9)$$

де m - математичне сподівання величини.

При неперервному законі розподілу ймовірностей дисперсію можна подати так:

$$\sigma^2 = \int (g - m)^2 p(g) dg \quad (10)$$

де інтегрування ведеться за всіма значеннями величини g .

Величина σ називається середньоквадратичним відхиленням (стандартним відхиленням або просто стандартом).


6.6.4. Нормальний закон розподілу випадкових похибок (закон Гаусса)

При досить великому числі вимірювань випадкової величини g закон розподілу ймовірностей був доведений Гауссом в такому вигляді:

$$f(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(g-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

де g - випадкове значення величини; m - математичне сподівання; σ - стандарт; $\pi = 3,1415925\dots$

При уважному розгляді густини ймовірності (11) здається, що застосування її на практиці неможливо, тому що при кінцевому числі вимірів величини g залишаються невідомими значення математичного сподівання m і стандарту σ . В дійсності, якщо число вимірів складає не менше 30, то можна користуватись співвідношенням (11), в якому математичне сподівання замінюється середнім арифметичним значенням, а замість стандарту σ використовується величина σ_n :



$$f(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(g-\bar{g})^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (12)$$

6.6.5. Довірча ймовірність та довірчий інтервал

При вимірюваннях важливо знайти ймовірність попадання результату в довірчий інтервал (1), тобто довірчу ймовірність. Довірча ймовірність P , чи надійність вимірювання, це ймовірність того, що будь-який результат виміру не виходить за межі довірчого інтервалу (1). Це можна записати у вигляді:

$$P = P(\langle g \rangle - \Delta g < g < \langle g \rangle + \Delta g) \quad (13)$$

Вираз (13) свідчить, що результат вимірювань g ймовірністю $P \leq 1$ не виходить за межі довірчого інтервалу. Якщо поставити вимогу більшої надійності, то зрозуміло, що інтервал (1) буде більшим, і навпаки, чим більший довірчий інтервал (1) ми задаємо, тим ймовірніше, що результати вимірів не вийдуть за його межі.

Отже, для характеристики величини випадкової похибки мають бути заданими дві величини: величина самої похибки (довірчий інтервал) і величина надійності (довірча ймовірність). Якщо, наприклад, заданий тільки довірчий інтервал без зазначення відповідної довірчої ймовірності, то ми при цьому не знаємо, наскільки надійні наші результати.

Для нормального закону розподілу ймовірностей (11) величину довірчого інтервалу звичайно подають в частках стандарту σ :

$$e = \frac{\Delta g}{\sigma}, \quad (14)$$

причому в (11) замість математичного сподівання m використовується середнє арифметичне значення не менше ніж 20 вимірів. Стандарт розраховують по співвідношенню (12). Нижче наведені довірчі ймовірності для цілих значень e :

Довірчий інтервал	Довірча ймовірність
1	0,68
2	0,95
3	0,997

В науковій літературі звичайно наводять величину середньої квадратичної похибки, що відповідає значенню $e=1$. В цьому випадку не вказується надійність, тому що вона відома ($P=0,68$).

6.6.6. Визначення надійності при обмеженому числі вимірювань

В умовах фізичного практикуму важко повторити виміри понад 2-5 разів. При такому числі вимірювань розподілом Гаусса скористуватися неможливо. Але виявляється, що існує методика Госсета (Стюдента), яка придатна для числа вимірювань $2 \leq n \leq 20$.

Розподіл Стюдента вже при $n=7$ відрізняється від гауссівського не більше ніж на 3 %. А при $n \rightarrow \infty$ він фактично переходить в нормальний розподіл. У випадку обмеженого числа вимірювань замість $\sigma(g)$ із (11) використовують так звану вибірку середньоквадратичну похибку середньоарифметичного $\sigma(\Delta g)$:

$$\sigma(\Delta g) = \frac{\Delta g}{\sqrt{n}}, \quad (15)$$

Довірчий інтервал при цьому має бути в частках $\sigma(\Delta g)$ і називається коефіцієнтом Стюдента s :

$$s(P) = \frac{\Delta g}{\sigma(\Delta g)} \quad (16)$$

Для різних значень довірчої ймовірності та числа вимірювань існують таблиці коефіцієнтів Стюдента, наприклад таблиця 1:

Таблица 1

$\begin{matrix} P \\ n \end{matrix}$	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	0,16	0,51	1,0	1,4	2,0	3,1	6,3	12	32	64
3	0,14	0,45	0,82	1,1	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	0,14	0,42	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	0,13	0,41	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	0,13	0,41	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	0,13	0,40	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	0,13	0,40	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,8	3,3

Відповідно до заданої довірчої ймовірності і конкретної серії вимірювання, за допомогою таблиці 1 та співвідношення (16) обчислюють величину довірчого інтервалу.

Кінцевий результат записують у вигляді :

$$g = \langle g \rangle \pm \Delta g, \quad \text{при } P = A \%,$$

де A – надійність вимірювань. Той же результат можна подати в такому вигляді:

$P(\langle g \rangle - \Delta g < g < \langle g \rangle + \Delta g) = A$
 (тобто ймовірність попадання результатів вимірювань в межі довірчого інтервалу дорівнює A).

6.6.7. Порядок обчислень випадкових похибок при прямих вимірюваннях

Для обчислення випадкових похибок виміри мають бути зроблені щонайменше 2 рази, а краще 3-5 разів, з вилученням явних промахів.

Після проведених вимірів роботу проводять у наступній послідовності:

1) обчислюють середньоарифметичне значення

$$\langle g \rangle = (g_1 + g_2 + \dots + g_n) / n;$$

2) обчислюють абсолютну похибку окремих вимірів g_i , а також їх квадрати $(\Delta g_i)^2$;

№	$\Delta g_i = g_i - \langle g \rangle$	$(\Delta g_i)^2$
1	$\Delta g_1 = g_1 - \langle g \rangle$	$(\Delta g_1)^2$
2	$\Delta g_2 = g_2 - \langle g \rangle$	$(\Delta g_2)^2$
3	$\Delta g_3 = g_3 - \langle g \rangle$	$(\Delta g_3)^2$
...
n	$\Delta g_n = g_n - \langle g \rangle$	$(\Delta g_n)^2$

3) обчислюють вибіркочну середньоквадратичну похибку середньоарифметичного $\sigma(\Delta g)$;

4) задають довірчу ймовірність (в межах від 0,68 до 0,98) в залежності від умов експерименту;

5) за таблицею коефіцієнтів Стюдента для даного числа вимірів та заданої надійності обчислюють довірчий інтервал;

6) кінцевий результат вимірювань подають у вигляді: $g = \langle g \rangle \pm \Delta g$ при $P = A$;

7) обчислюють відносну похибку вимірів: $\varepsilon = \Delta g / \langle g \rangle$.

6.6.8. Обчислення похибок при непрямих вимірюваннях

В більшості випадків шукану фізичну величину g визначають шляхом обчислень за формулою, в яку підставляють величини x, y, z, \dots , що вимірюються безпосередньо:

$$g = f(x, y, z, \dots)$$

Вимірювання величин x, y, z, \dots проводять незалежно одна від іншої, тому довірчий інтервал функції $f(x, y, z, \dots)$ визначають законом складання випадкових похибок:



(17)



(18)

де (17) – закон складання абсолютних незалежних випадкових похибок; (18) – закон складання відносних незалежних випадкових похибок. (Похідні обчислюються при середніх значеннях аргументів.)

Існує й інша можливість обчислення довірчого інтервалу при непрямих вимірюваннях для функції декількох аргументів. Кожний аргумент вимірюється n разів. За виміряними аргументами обчислюють n разів шукану функцію. Обчислення похибок вимірів ведуть за схемою для прямих вимірів (для кінцевих значень функції).

Кінцевий результат записують: $g = \langle g \rangle \pm \Delta g$, при $P = A$.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З МЕХАНІКИ ТА МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

Лабораторна робота № 1.

Підбір інструменту при визначенні густини тіл правильної геометричної форми.

Прилади та приладдя: вимірювані тіла, штангенциркуль, мікрометр, технічні терези, різноваги.

Мета роботи: засвоїти методику підбору та використання інструментів в непрямих вимірах.

Коротка теорія та метод вимірювання

Густиною однорідного тіла називається маса одиниці об'єму тіла або відношення маси тіла до його об'єму:

$$\rho = m / V. \quad (1)$$

Масу тіла можна визначити зважуванням, об'єм тіла правильної геометричної форми визначають шляхом вимірювань їх геометричних розмірів та наступних обчислень. В даній роботі визначають об'єми циліндра і паралелепіпеда відповідно за формулами:

$$V = h\pi d^2/4; \quad V = lbh, \quad (2)$$

де: l – довжина, b – ширина, h – висота паралелепіпеда; h – висота циліндра, d – діаметр циліндра знаходять за прямими вимірюваннями.

Вибір інструменту чи приладу для кожного вимірювання визначається необхідною точністю відшукуваних величин. Нехай при визначенні густини циліндричного тіла одержали при вимірюваннях: $h = 50,00 \pm 0,05$ мм, $d = 10,00 \pm 0,005$ мм, $m = 5,000 \pm 0,005$ г, де похибка вимірювань геометричних розмірів в 0,05мм є мінімальною при використанні штангенциркуля з ціною поділки 0,1мм, а похибка 0,005г – мінімальна при використанні різноваги 0,01г. Відносні похибки вимірювань h , d і m відповідно дорівнюють $\varepsilon_h = 0,001$, $\varepsilon_d = 0,005$, $\varepsilon_m = 0,001$. Якщо знайти відносну похибку вимірювань густини за співвідношенням (18) із п. 6.6., то одержимо:

$$\varepsilon = [(\Delta h / h) + (\Delta d / d) + (\Delta m / m)]^{1/2} = (0,001 + 0,010 + 0,001)^{1/2} = 0,010 \quad (3)$$

Замінімо при вимірюванні діаметра циліндра штангенциркуль на мікрометр. Найменша ціна поділки мікрометра 0,01 мм. Відносна похибка визначення діаметра буде становити $\Delta d / d = 0,0005$. Тоді відносна похибка визначення густини буде складати:

$$\varepsilon = [(0,001 + 0,001 + (0,0010))]^{1/2} = 0,002$$

Отже, при виконанні непрямих вимірів треба підбирати таких комплекс вимірювальних приладів та інструментів, який дозволив би одержати приблизно однакові відносні похибки вимірювань окремих величин, що входять в розрахункову формулу. В наведеному кінцевому прикладі похибки вимірювань

окремих величин роблять однаковий внесок у відносну похибку вимірювань густини.

Порядок виконання роботи:

1. Визначити масу тіла шляхом зважування.
2. Підібрати інструмент для виміру лінійних розмірів тіл.
3. Виконати вимірювання геометричних розмірів в трьох місцях для кожного тіла.
4. Визначити середньоквадратичне відхилення середньоарифметичного кожного виміру від істинного згідно з п.4.6.8. Довірчий інтервал для кожного виміру взяти для довірчої ймовірності 0,7, тобто $\Delta h = 1,3 S(\langle g \rangle)$, $\Delta d = 1,3 S(\langle g \rangle)$, $\Delta m = 1,3 S(\langle g \rangle)$ і т. д.
5. Обчислити густину тіл по середніх значеннях вимірних величин.
6. Обчислити відносні похибки визначення густини для двох тіл за формулами:

для циліндра –

$$\varepsilon = [(\Delta h / h)^2 + 2(\Delta d / d)^2 + (\Delta m / m)^2]^{1/2};$$

для паралелепіпеда -

$$\varepsilon = [(\Delta l / l)^2 + (\Delta b / b)^2 + (\Delta h / h)^2 + (\Delta m / m)^2]^{1/2}.$$

При вимірюваннях маси тіла, як правило одержують три однакові значення, тому за Δm має бути прийняте значення 0,005 г, що дорівнює половині маси найменшої різноваги.

6. Обчислити довірчі інтервали визначення густини тіл шляхом множення середніх значень густин на відносні похибки їх визначення.

Результати вимірювань і розрахунків занести до таблиці (геометричні розміри – см, маса – г, густина – г/см³).

Таблиця 1. Визначення густини циліндричного тіла

№	m_i	h_i	Δh_i	d_i	Δd_i	$\langle \rho \rangle$	$\Delta \rho$	ε

Таблиця 2. Визначення густини тіла - паралелепіпеда

№	m_i	l_i	Δl_i	b_i	Δb_i	h_i	Δh_i	$\langle \rho \rangle$	$\Delta \rho$	ε

Дайте відповідь на запитання:

1. Якими інструментами мають вимірюватись:
 - пластинка 90 мм х 60 мм х 10 мм ?
 - шина 940 мм х 70 мм х 10 мм ?
2. Як перевести одержані в роботі значення густини в одиниці системи SI ?
3. Чи достатньо точності одного штангенциркуля для виконання вимірювань, якщо абсолютна похибка визначення маси дорівнює 0,05 г ?

Лабораторна робота №2.

Визначення питомої ваги твердого тіла зважуванням в двох середовищах.

Прилади та приладдя: гідростатичні терези з різновагами, досліджувані тіла, склянка з водою і спиртом.

Мета роботи: засвоїти метод визначення питомої ваги тіл неправильної геометричної форми.

Коротка теорія

Питомою вагою однорідного тіла називають вагу одиниці об'єму тіла або відношення ваги тіла P до його об'єму V :

$$d = P / V \quad (1)$$

Вагу тіла можна визначити як добуток маси тіла на прискорення вільного падіння в даному місці Землі. Масу тіла при цьому визначають зважуванням на важільних терезах.

За законом Архімеда на тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, що дорівнює вазі рідини або газу, що витіснило тіло. В роботі визначається питома вага тіла з високою порівняно з повітрям густиною, тому вага тіла в повітрі практично дорівнює його вазі в вакуумі P . Якщо зважити тіло в деякій рідині, питома вага якої d_p відома, то вага його виявиться рівною:

$$P_p = P - d_p V, \quad (2)$$

де V - об'єм зануреного тіла. Визначаючи із (2) об'єм тіла V і підставляючи його в (1), знаходимо питому вагу тіла:

$$d = P d_p / (P - P_p), \quad (3)$$

Порядок виконання роботи:

1. Зважити тіло в повітрі, у воді і в спирті. Результати зважування та густину середовищ занести в таблицю.
2. Розрахувати питому вагу тіла за (3) для випадку води і спирту.
3. Для знайдених двох значень питомої ваги. розрахувати довірчий інтервал визначення питомої ваги для надійності 0,7.
4. Подати результати в вигляді $d = \langle d \rangle \pm \Delta d$.

Середовище	d_p	P_i	d	$\langle d \rangle$	Δd	Δd_{cp}
Повітря	1,29					
Спирт	790					
Вода	1000					

Дайте відповідь на запитання:

1. Як пов'язані між собою питома вага та густина?
2. Густина яких тіл можна визначити вивченим методом?
3. Як визначити за питомою вагою сплаву співвідношення двох компонентів?

Лабораторна робота №3.

Визначення швидкості та пробивної здатності кулі за допомогою обертового барабана.

Прилади та приладдя: вимірювальна установка, що складається з пневматичної рушниці, барабана на осі мотора і з тахометра, штангенциркуль, кулі, стрічка з міліметрового паперу, картонна пластина.

Мета роботи: засвоїти один з методів вивчення частинок, що рухаються.

Коротка теорія та метод вимірювання

З пневматичної рушниці роблять постріл в паперову стрічку, що натягнена на барабан. Якщо барабан нерухомий, то постріл відбувається в точках 0-0, відстань між якими по дузі кола барабана дорівнює L_0 (рис. 1).

Доки куля, що летить вздовж хорди зі швидкістю v , пролітає хорду за проміжок часу Δt :

$$\Delta t = a / v, \quad (1)$$

барабан, обертаючись з кутовою швидкістю ω , повертається на кут $\Delta\phi = \omega\Delta t$. Враховуючи, що кут повороту дорівнює відношенню шляху ΔL , який точки проходять по колу барабана, до радіуса барабана R , а також приймаючи до уваги (1), знаходимо :

$$v = R \omega a / \Delta L, \quad (2)$$

Довжина хорди $a = 2 R \sin(\phi / 2)$, тому з (2) остаточно одержуємо:

$$v = \frac{2R\omega \sin(\phi/2)}{\Delta L} \cdot \frac{2R \sin(\phi/2)}{2} \quad (3)$$

Вимірявши величину R , ω , L_0 , ΔL за (3) обчислюємо швидкість кулі, а потім розраховуємо кінетичну енергію :

$$W_0 = m v^2 / 2, \quad (4)$$

Поставимо на шляху кулі перед барабаном перепону у вигляді картонного аркушу. Тоді на пробивання аркушу буде потрачена енергія, так що швидкість кулі зменшиться і збільшиться відстань між точками прострілу ΔL . Вимірявши величину ΔL , за (2) обчислюємо нову швидкість кулі v' , а потім роботу пробивання перепони:

$$A = W_0 - W' = \frac{mv^2}{2} - \frac{m{v'}^2}{2} = Fb, \quad (5)$$

де F - середня сила опору; b - товщина картону.

Вважаючи силу опору при пробію картону сталою та вимірявши товщину картону, визначимо пробивну здатність кулі в подібному картоні до її повної зупинки, коли $W' = 0$:

$$b_0 = W_0 b / A \quad (6)$$

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитись з установкою.
2. Відгвинтити затискачі на барабані та встановити паперову стрічку, намотуючи її за годинниковою стрілкою.
Ретельно закріпити затискачі.
3. Виміряти діаметр барабана штангенциркулем.
4. Закрити охоронну кришку та зарядити рушницю.
5. Ввімкнути електромотор і після усталення швидкості обертання зробити постріл. Визначити за тахометром число обертів n_1 в секунду і вимкнути двигун. Кутова швидкість обертання барабана дорівнює $\omega_1 = 2\pi n_1$.
6. Відчинити кришку, відмітити цифрами 1 - 1 точки прострілу та виміряти відстань L_1 між ними.
7. Зачинити кришку, виміряти товщину b пробиваної пластинки, вставити її в проріз кришки, зарядити рушницю, ввімкнути електромотор, визначити за тахометром усталене число обертів n_2 , зробити постріл і вимкнути двигун.
8. Відчинити кришку, відмітити точки прострілу 2-2 і виміряти відстань L_2 між ними. Зачинити кришку.
9. Зробити постріл при нерухомому барабані, відчинити кришку і виміряти довжину дуги L_0 . Обчислити кут $\varphi / 2 = L_0 / R$ і знайти його синус.
10. Визначити $\Delta L = L_1 - L_0$, $\Delta L' = L_2 - L_0$ і виконати розрахунки за запропонованими співвідношеннями, приймаючи масу кулі $m = 280$ мг.
11. Результати розрахунків подати в таблиці:

Таблиця 1. Визначення швидкості та пробивної здатності кулі.

R	b	b	L_0	L_1	L_2	ΔL	$\Delta L'$	$\varphi/2$	$\sin(\varphi/2)$	n_1	n_2	ω_1	ω_2	v	v'	W_0	W'	A	F	b_0	

Зняти стрічку з барабана і поставити затискачі на місце. Стрічку підписати і прикласти до звіту. У звіті подати приклад розрахунків.

Дайте відповідь на запитання:

1. Як треба змінити умови вимірювань, якщо швидкість кулі збільшилась б в 5 разів?

2. Якою має бути швидкість кулі, щоб вхідний і вихідний отвори пробою співпадали?

Лабораторна робота № 4.

Дослідження сил тертя за допомогою плоского трибометра.

Прилади та приладдя: плоский трибометр зі змінними пластинами і набори тіл із різних металів, різноваги.

Мета роботи: засвоїти один із методів визначення коефіцієнта тертя ковзання.

Коротка теорія та метод вимірювання

Розрізняють два основні види тертя: внутрішнє і зовнішнє. Внутрішнє тертя в твердих, аморфних тілах та рідинах має складний механізм, пов'язаний з деформацією. В твердих тілах внутрішнє тертя призводить до нагрівання деформованого тіла. В рідинах та газах воно проявляється як в'язкість – опір відносному переміщенню різних шарів речовини. Зовнішнє тертя – це протидія відносному переміщенню прилягаючих тіл. Сила протидії спрямована вздовж стичних поверхонь.

Ми будемо вивчати зовнішнє тертя. Згідно закону Амонтона –Кулона сила зовнішнього тертя пропорційна силі нормальної реакції N між стичними тілами і не залежить від величини стичної поверхні тіл і швидкості їх відносного руху:

$$F = k N \quad (1)$$

Коефіцієнт тертя k залежить від матеріалу тіл, що труться, якості обробки поверхонь, наявності на поверхнях забруднень або мастила. Закон (1) наближений і застосовується тільки для орієнтовних розрахунків. В дійсності явище тертя значно складніше: мають бути враховані сили міжмолекулярного зчеплення, величина стичних поверхонь, врешті закон (1) не враховує залежність сил тертя від швидкості відносного руху тіл, що труться, тобто не відрізняє статичне і кінематичне тертя.

Статичне тертя - це тертя між тілами, що знаходяться в стані спокою: при малих значеннях діючої на тіло сили воно залишається в спокою по відношенню до поверхні іншого тіла із-за наявності сили тертя спокою. Згідно з третім законом механіки сила тертя дорівнює за величиною і протилежна за напрямком прикладеній силі. При деякому максимальному значенні прикладеної сили тіло зривається з місця і починає рухатись. Така властивість сил статичного тертя називається застоєм. Причина статичного тертя - наявність сил молекулярного зчеплення і зачеплення нерівностей поверхонь тіл.

Після того, як тіло почало рухатись, статичне тертя змінюється кінематичним, причому величина сили кінематичного тертя виявляється меншою за максимальну силу тертя спокою. Кінематичне тертя зумовлене рядом причин, на яких ми зупинятися не будемо.

На сьогодні “точного” закону тертя не існує, тому на практиці коефіцієнт тертя визначають для різних пар тертьових матеріалів при різній якості обробки поверхонь, різних тисках і швидкостях руху, а результати подають у вигляді довідкових таблиць.

В даній роботі для вимірювання сил тертя застосовується плоский трибометр з набором пластин і тіл із різних матеріалів. Трибометр - це площина, кут нахилу якої до горизонту можна змінювати. Трибометр має градусну шкалу, затискач для фіксування кута нахилу, нерухомий блок для нитки і шальку для встановлення гир. Зовнішньо рушійною силою в такому трибометрі є сила натягу нитки, паралельна похилій площині, що визначається вагою гир, складової сили тяжіння тіла, паралельно похилій площині, а також силою тертя. Величину рушійної сили можна регулювати підбором маси гир і зміною кута нахилу площини трибометра. Застій долається легкими ударами молоточка по пластині.

Розглянемо рух тіла на похилій площині під дією вказаних сил. Розкладено силу тяжіння P , що діє на тіло, на дві складові – паралельну похилій площині (складова P_1) і перпендикулярну їй (складова P_2). Складова P_2 викликає з боку похилої площини рівновелику собі силу нормальної реакції N . В залежності від того, куди спрямована рівнодіюча всіх сил, прикладених до тіла, в тому напрямку буде прискорюватись тіло. Хай сила натягу нитки F' не менша від суми сили тертя F_1 і складової P_1 (рис. 1а). Тоді тіло рухається з прискоренням вгору. Якщо складова P_1 більша за суму сили натяг F' у нитки та силу тертя F_2 , то тіло буде рухатись з прискоренням вниз (рис. 1б). При рівномірному ковзанні тіла вгору має виконуватись:

$$F' = P_1 + F_1. \quad (2)$$

У співвідношенні (2) сила тертя $F_1 = kN = P \cos \alpha$, а складова $P_1 = P \sin \alpha$. Підставляючи F_1 і P_1 в (2), знаходимо коефіцієнт тертя:

$$k_1 = F' / P \cos (\alpha_1) - \operatorname{tg} (\alpha_1). \quad (3)$$

При рівномірному русі тіла вниз по похилій площині виконується рівність:

$$P_1 = F' + F_2. \quad (4)$$

Після підстановки в (4) значень P_1 і F_2 для коефіцієнта тертя одержуємо

$$k_2 = \operatorname{tg} (\alpha_2) - F' / (P \cos (\alpha_2)). \quad (5)$$

З метою зменшення похибок, зумовлених різними значеннями сил нормального тиску та різного значення величини молекулярного зчеплення, за коефіцієнт тертя приймають половину суми (3) і (5):

$$k = (k_1 + k_2) / 2. \quad (6)$$

У випадку найпростіших (грубих вимірювань) коефіцієнт тертя визначають без врахування додаткової сили F' . При цьому підбирають такий кут α_3 , при якому тіло рівномірно ковзає по похилій площині. В цьому разі співвідношення (5) приводить до

$$k_3 = \operatorname{tg}(\alpha_3). \quad (7)$$

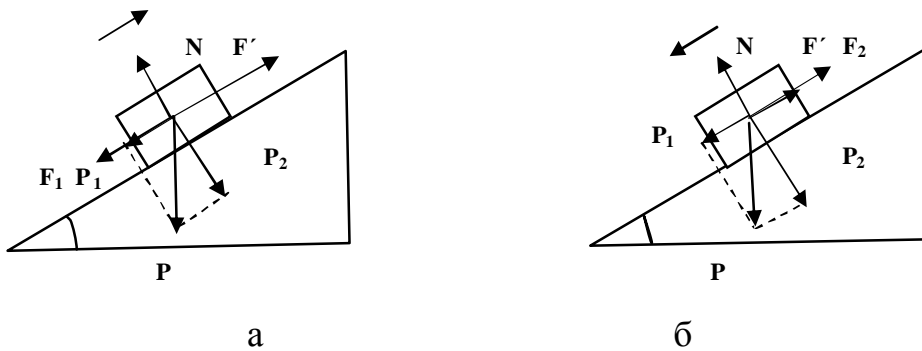


Рис. 1.

Порядок виконання роботи:

1. За пропозицією викладача відібрати пластину та два тіла: 1 – сталь 3; 2 - антикорозійна сталь; 3 – латунь; 4 – дюраль.

2. Ретельно очистити крейдою поліровані поверхні до рівномірного блиску та зібрати ганчіркою залишки порошку з поверхні тіл.

3. Вставити пластинку на трибометр, фіксуючи її кінцевими стопорами через отвори.

4. Визначити вагу тіла -P з точністю до 5 г. Відпустити затискач, підняти площину в верхнє положення і затиснути. Покласти тіло на площину, причепити до нього за гачок нитку з шалькою і покласти на шальку гирю вагою не більше ніж $P/2$. Сила F' визначиться як сума ваги гирі і шальки.

5. Відпустити затискач та повільно зменшувати кут нахилу площини (постукуючи молоточком по пластині) доти, доки тіло не почне ковзати (без постукування) від нижнього до верхнього стопора. Записати кут нахилу α_1 , відпустити площину, зняти гирю з шальки.

6. Обчислити за (3) коефіцієнт тертя k_1 .

7. Підібрати гирю вагою не більше ніж $P/4$, покласти її на шальку та, повільно підіймаючи площину і постукуючи молоточком по пластині, знайти кут α_2 , при якому тіло почне ковзати вниз по пластині. Записати кут нахилу α_2 , опустити площину і відчепити нитку з шалькою.

8. За формулою (5) знайти k_2 і обчислити k за (6).

9. Покласти тіло на пластину, повільно підіймаючи площину і постукуючи молоточком по пластині, знайти кут α_3 , при якому тіло почне ковзати вниз. За формулою (7) знайти k_3 порівняти його зі значенням k , визначивши різницю: $\Delta k = k - k_3$.

10. Результати вимірювань і розрахунків подати в таблиці:

P	F'	α_1	k_1	F'	α_2	k_2	k	α_1	k_3	Δk
Матеріали: пластин - ..., бруска - ...										

Дайте відповідь на запитання:

1. Чи велика точність вимірювань коефіцієнта тертя?
2. Що називають кутом тертя?
3. Що таке внутрішнє тертя, зовнішнє тертя?

Лабораторна робота №5.

Дослідження основного закону динаміки обертального руху.

Прилади та приладдя: хрестоподібний маятник з набором муфт, вертикальний масштаб, набір тягарів 0,10, 0,15, 0,20 кг, штангенциркуль, секундомір.

Мета роботи: перевірити здійснення основного закону динаміки обертального руху.

Коротка теорія і метод дослідження

Основний закон динаміки обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі стверджує, що кутове прискорення тіла пропорційне головному моменту зовнішніх сил, що діють на тіло, і обернено пропорційне моменту інерції тіла.

$$\beta = M / I. \quad (1)$$

де β - кутове прискорення тіла, M - головний момент зовнішніх сил, I - момент інерції тіла відносно осі обертання.

Момент інерції тіла є мірою інертності тіла при обертанні і визначається як сума добутків маси кожної частки тіла на квадрат її відстані від осі обертання

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (2)$$

Справедливість закону (1) можна перевірити, вимірюючи кутове прискорення для різних значень моменту сил M та сталого моменту інерції тіла I . В цьому випадку відношення моментів сил M_i до кутових прискорень β_i має залишатись сталим:

$$M_i / \beta_i = I = \text{const}. \quad (3)$$

В даній роботі вимірюється момент інерції хрестоподібного маятника, що складається з хрестовини та шківів. Момент інерції маятника можна змінювати, закріплюючи на ньому на однакових відстанях R від осі чотири муфти масами m_0 . Якщо момент інерції хрестоподібного маятника дорівнює I_0 , то, вважаючи муфти матеріальними точками, загальний момент інерції можна подати у вигляді

$$I = I_0 + 4m_0R^2. \quad (4)$$

Визначення кутового прискорення і моменту сили в умовах даної роботи може бути виконано у такий спосіб. На шків радіусом r намотується нерозтяжна нитка, до якої прикріплено тягар масою m . Під дією сили тяжіння тягар опускається рівноприскорено з прискоренням a , яке пов'язане з кутовим прискоренням співвідношенням:

$$\beta = a / r. \quad (5)$$

Величину дотичного прискорення a , визначимо із умови спостереження прискореного опускання тягаря масою m .

На підвішений на нитці тягар m діє сила натягу нитки F , а вниз - сила тяжіння Землі mg . Рівнодіюча цих сил спрямована вниз і надає тягареві m прискорення

$$a = (mg - F) / m, \quad (6)$$

звідки

$$F = m(g - a). \quad (7)$$

Вантаж проходить відстань h з прискоренням a за проміжок часу t

$$h = at^2/2,$$

звідки

$$a = 2h/t^2 \quad (8)$$

Отже, момент сили натягу нитки виявляється рівним

$$M = Fr = m(g - 2h/t^2) r \quad (9)$$

Якщо поділити момент сили (9) на кутове прискорення (5) з урахуванням (8), можна одержати момент інерції хрестоподібного маятника.

В роботі при трьох різних значеннях вантажу m визначають момент інерції хрестоподібного маятника, а потім – те ж саме, але з додатковими муфтами.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Підвісити на нитку тіло масою 0,10кг. Сумістивши його з верхньою поділкою лінійки, дайте йому можливість опускатись. За допомогою секундоміра виміряйте час опускання. Дослід виконайте тричі.

2. Виміряти радіус шківів, висоту опускання .

3. Для середнього в трьох вимірюваннях часу опускання при сталій висоті обчислити момент інерції хрестоподібного маятника.

4. Повторити дії пп. 1 і 3 для тягарів 0,15 і 0,20 кг. Всі результати подати в таблиці 1.

Таблиця 1. Визначення момента інерції хрестоподібного маятника.

№	m	t	h	r	M	β	I_0	ΔI_0
1.	0,10 кг							
2.	0,15 кг							
3.	0,20 кг							
Середні значення								

5. Обчислити довірчий інтервал ΔI_0 визначення I_0 при надійності 0,7. Кінцевий результат подати у вигляді: $I_0 = \langle I_0 \rangle \pm \Delta I_0$. Представити взіреть розрахунків для $m = 0,1$ кг.

Завдання 2.

1. Міцно закріпити 4 муфти на стрижнях маятника на однакових відстанях R від осі обертання.
2. Повторити дії завдання 1.
3. Розрахувати значення моменту інерції I за (4). Результати вимірювань і розрахунків подати в таблицю 2.

Таблиця 2. Визначення моменту інерції навантаженого маятника.

№	m	t	h	r	R	M	β	I	ΔI
1.	0,10 кг								
2.	0,15 кг								
3.	0,20 кг								
Середні значення									

Дайте відповідь на запитання:

1. Чи визначається розбіжність результатів вимірювань моменту інерції при різних використовуваних тягарях?
2. В чому причина розбіжності між розрахованим за (4) значенням і вимірним в завданні 2?
3. Чи можна за допомогою подібної лабораторної установки виміряти моменти інерції інших тіл?

Лабораторна робота № 6.

Дослідження моментів інерції тіл за допомогою закону збереження енергії.

Прилади та приладдя: установка з маховим колесом на осі, шківом для нитки і вертикальним масштабом, штангенциркуль, секундомір, тягар 0,20 кг і набір досліджуваних тіл різних мас та конфігурацій.

Мета роботи: засвоїти один із методів вимірювання моментів інерції симетричних тіл.

Коротка теорія і метод вимірювань

Кінетична енергія тіла, що обертається навколо нерухомої осі, може бути представлена як сума кінетичних енергій часток, що складають дане тіло:

$$W = \sum m_i v_i^2 / 2 \quad (1)$$

Виражаючи лінійну швидкість частки через кутову швидкість тіла і радіус кола r_i , що описується часткою ($v_i = \omega r_i$), замість (1) одержимо

$$W = \sum m_i r_i^2 \omega^2 / 2 \quad (2)$$

Величина

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (3)$$

служить мірою інертності тіла при обертальному русі і називається моментом інерції тіла. З урахуванням (3) формула (2) записується у вигляді

$$W = I \omega^2 / 2 \quad (4)$$

Розрахунки за (3) легко провести у випадку тіл правильної геометричної форми. Моменти інерції тіл складної геометричної форми визначають дослідним шляхом. Один із методів експериментального визначення моментів інерції тіл довільної геометричної форми вивчається в цій лабораторній роботі.

Вимірювальна установка складається з маховика з віссю (для зменшення тертя вісь знаходиться в шариковому підшипнику). На осі маховика є шків для намотки нитки з тягарем на кінці. На маховикові для установки і закріплення досліджуваних тіл є також штир і гвинт для затискування тіл.

Нехай тягар знаходиться на висоті h над поверхнею підлоги. Якщо його відпустити, то, опускаючись, він витратить свою потенціальну енергію mgh на виконання роботи проти сил опору F , на надання кінетичної енергії обертової системі, частина її перейде в кінетичну енергію самого тягара -

$$mgh = Fh + I \omega^2 / 2 + m v^2 / 2, \quad (5)$$

де Fh - робота по подоланню сил опору; $I \omega^2 / 2$ - кінетична енергія обертової системи; $mv^2/2$ - кінетична енергія тягара, що опускається. Це рівняння покладено в основу вимірювань моменту інерції.

Вимірювання на установці можуть бути проведені двома методами.

Метод 1. Після опускання тягара його кінетична енергія $mv^2/2$ вважається малою порівняно з іншими складовими (5); обертання маховика продовжується, і за рахунок енергії маховика тягар підіймається на висоту h_1 . Закон збереження енергії для опускання і підйому в таких умовах записується відповідно у вигляді

$$mgh = Fh + I \omega^2 / 2; \quad I \omega^2 / 2 = Fh_1 + mgh_1. \quad (6)$$

З цих рівнянь виключається сила опору F , а кутова швидкість за законами рівноприскореного руху може бути подана виразом $\omega = 2h/rt$, де r - радіус маховика. Для моменту інерції системи остаточно одержуємо

$$I = \frac{mgh^2 h_1}{r(h+h_1)}, \quad (7)$$

Цей метод можна застосувати, якщо задовольняється умова $gt^2 / 2h \geq 1$.

Метод 2. Може бути застосований без останнього обмеження методу 1. Застосовується рівняння (5). Після опускання тягара нитка сприсяє зі штифта на шківі, котрий продовжує сповільнено обертатися деякий час t_1 до повної зупинки. Закон збереження енергії в цьому випадку має вигляд

$$I \omega^2 / 2 = FL, \quad (8)$$

де $L = r \phi$ - шлях точок на колі шківів при повороті на кут ϕ до повної зупинки.

З (5) та (8) з урахуванням того, що $v = \omega r$ та що при рівноприскореному русі $\omega = 2h/rt$ і $L = ht_1/t$, одержуємо розрахункову формулу для моменту інерції системи:

$$I = mr^2 \frac{t_1}{t_1 + t} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (9)$$

В обох методах вимірювання проводяться в однаковій послідовності:
 1) Визначається момент інерції маховика I_0 за формулам: (7) або (9); 2) На маховику закріплюється досліджуване тіло і в такий же спосіб визначається сумарний момент інерції I_1 ; 3) Момент інерції досліджуваного тіла розраховується як різниця $I = I_1 - I_0$.

Порядок виконання роботи:

Метод 1.

1. Повертаючи маховик без досліджуваних тіл, намотують нитку на барабан і підіймають тягар на висоту h від підлоги.
2. Надають тягареві можливість опускатись і вимірюють проміжок часу t до удару його об підлогу.
3. Вимірюють висоту h_1 , на яку підійметься тягар за рахунок енергії обертального руху маховика. Вимірювання роблять тричі і в розрахунках користуються середніми величинам.
4. Вимірюють радіус шківів і за (7) розраховують момент інерції I_0 .
5. Міцно затискують досліджуване тіло на маховику і повторюють дії пп.1-4, визначаючи сумарний момент інерції I_1 .
6. Обчислюють момент інерції тіла $I = I_1 - I_0$. Результати вимірювань та розрахунків заносять до таблиці 1.

Таблиця 1

m	R	h	Маховик			Маховик з тілом			I
			t	h_1	I_0	t	h_1	I_1	

Метод 2.

1. Тягар на нитці підвішують кільцем за штифт шківів і обертанням маховика підіймають до висоти h від підлоги та вимірюють час його опускання t .
2. Надають тягарю можливості опускатися і вимірюють час опускання t .
3. Утримують секундомір ввімкненим та вимірюють час до повної зупинки маховика t_1 і визначають час вільного вибігу маховика як $t_1 = t' - t$.
4. За формулою (9) обчислюють момент інерції маховика I_0 .
5. Міцно закріплюють досліджуване тіло на маховику і повторюють дії по пп.1-4 для тієї ж висоти h та визначають момент інерції маховика з тілом I_1 . Момент інерції тіла розраховують за формулою $I = I_1 - I_0$.
 Результати вимірів та розрахунків подають в таблиці 2.

Таблиця 2

m	r	h	Маховик			Маховик з тілом			I
			t	h_1	I_0	t	h_1	I_1	

Дайте відповідь на запитання:

1. Який з двох методів вимірювань точніший?
2. Які обмеження існують в першому методі?
3. Чи можна застосувати ці методи у випадку несиметричних тіл і чому?

Лабораторна робота № 7.

Дослідження непружного удару за допомогою балістичного маятника.

Приладдя: установка з маятником і пневморушницею, металічна лінійка з масштабом до 1мм, технічні терези.

Мета роботи: засвоїти застосування законів збереження імпульсу і енергії.

Коротка теорія та метод вимірювання

При непружному зіткненні тіла незворотно деформуються і після зіткнення рухаються як одне ціле.

Короткочасне зіткнення тіл - удар - називають центральним, якщо тіла до зіткнення рухаються по прямій, що з'єднує їх центри мас. Такий удар ми розглянемо, тому що після зіткнення тіл, що поступально рухаються, не виникає обертальний рух.

Нехай до зіткнення тіло масою m_1 рухалося зі швидкістю v_1 , а тіло з масою m_2 - зі швидкістю v_2 . Після непружного удару тіла m_1 і m_2 рухаються як одне ціле зі швидкістю u .

Згідно з законом збереження імпульсу обчислюється:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u \quad (1)$$

З (1) знаходимо:

$$u = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2). \quad (2)$$

Закон збереження енергії для цього випадку слід записувати у такому вигляді:

$$m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 = (m_1 + m_2) u^2 / 2 + A, \quad (3)$$

де A – частина енергії, що витратилась на непружну деформацію тіл і частково перейшла у внутрішню енергію тіл, яку ми будемо називати роботою непружної деформації. Підставляючи u з (2) в (3), отримаємо:

$$A = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2 \quad (4)$$

- найбільш загальне співвідношення для роботи непружної деформації.

В основу даної роботи покладено так званий метод балістичного маятника, що представляє собою масивну головку у вигляді циліндра, що підвішений на тонкій спиці. Внутрішня частина головки заповнена пластиліном, спиця з'єднана з маточницею, що містить підшипник. При повороті головки зі спицею навколо осі обертання тим самим забезпечується мінімальне тертя.

Перед пострілом з пневматичної рушниці головка знаходиться в стані спокою ($v_2 = 0$). Позначимо швидкість кулі $v_1 = v$. Тоді з (4) випливає:

$$A = W_1 \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (5)$$

де $W_1 = m_1 v^2 / 2$ - кінетична енергія кулі. Кінетична енергія маятника при відхиленні його в крайнє положення повністю переходить в потенціальну енергію (рис.1):

$$(m_1 + m_2) u^2 / 2 = (m_1 + m_2) g h, \quad (6)$$

де h - висота підняття головки маятника дорівнює $h = R(1 - \cos \alpha)$, де R - відстань від осі обертання до її центру ваги.

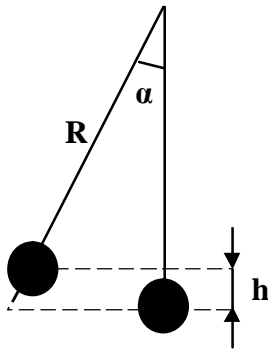


Рис.1

Визначаючи з (6) у з урахуванням значення h і підставляючи його в (2), знаходимо швидкість кулі:

$$v = (m_1 + m_2) \sqrt{2gh} / m_1 \quad (7)$$

Знаючи швидкість v , за (5) знаходимо роботу деформації.

Порядок виконання роботи:

1. Відвести маятник вправо із проміжка між щитками, зняти зі спиці головку маятника і визначити її масу m_2 на технічних терезах з точністю до 1 г.
2. Надіти головку на спицю, виміряти довжину маятника R і опустити його в положення рівноваги.
3. Зарядити рушницю, зробити постріл і виміряти по середній вертикальній рисці маятника найбільший кут відхилення від положення рівноваги з точністю до $5'$ (одна поділка). Зам'яти в пластиліні отвір від кулі.
4. Виконати пп. 2-3 для другої і третьої кулі.
5. Розрахувати швидкість кулі, її кінетичну енергію і роботу деформації A . Маса кулі $m_2 = 0,286$ г.
6. Знайти довірчий інтервал Δv визначення швидкості кулі для надійності 0,7 і подати швидкість кулі у вигляді $v = \langle v \rangle \pm \Delta v$
7. Результати вимірів і розрахунків представити в таблиці.

Результати вимірів і розрахунків швидкості кулі

№	m_2	R	α	v_1	Δv_1	W_1	A
1						-	-
2						-	-
3						-	-
Середні значення							

Дайте відповіді на запитання:

1. Чи можна в розрахунках нехтувати роботою деформації?
4. Що слід зробити, щоб використати установку для більших значень швидкості і маси кулі?

Лабораторна робота № 8.

Дослідження пружного удару куль.

Приладдя: Установка для вимірювань з двома парами куль і градусною шкалою, лінійка.

Мета роботи: засвоїти метод дослідження частково пружного удару.

Коротка теорія і метод вимірювань

При ударі тіл можливі два граничні випадки: кінетична енергія тіл після удару, дорівнює її ж значенню, до удару (пружний удар) і після удару тіла рухаються як одне ціле (непружний удар). В першому випадку в момент удару відбувається деформація тіла, частина кінетичної енергії тіла переходить в потенціальну енергію пружної деформації. Після удару відбувається повне відновлення форми тіла, потенціальна енергія пружної деформації повністю переходить в кінетичну енергію. В другому випадку не вся початкова кінетична енергія тіл в момент удару переходить в енергію пружної деформації, частина її переходить у внутрішню енергію тіл (внаслідок чого вони нагріваються), і після удару не відбувається відновлення форми тіл. Кінетична енергія після удару виявляється меншою, ніж до удару. Між цими двома граничними випадками удару лежать частково пружний і частково neprужний удари.

Ми будемо розглядати центральний удар тіл, коли початкові швидкості тіл спрямовані вздовж прямої, що з'єднує центри мас тіл. При такому ударі не відбувається обертання тіл після удару. В таких випадках діє закон збереження імпульсу системи:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (1)$$

де m_1 і m_2 - маси тіл; v_1 і v_2 - швидкості тіл до удару; u_1 і u_2 - швидкості тіл після удару. При neprужному ударі $u_1 = u_2$.

Закон збереження енергії для тіл, що стикаються, в загальному випадку має вигляд:

$$m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 = m_1 u_1^2 / 2 + m_2 u_2^2 / 2 + A, \quad (2)$$

де A - частина енергії, що витрачається на невідновлювану деформацію тіл і переходить у внутрішню енергію тіл. Для стислості називатимемо її роботою neprужної деформації.

Якщо $A = 0$, то удар - пружний. За величиною роботи A оцінюється міра "непружності" удару за Ньютоном, як відношення швидкостей тіл після удару і до удару:

$$k = u / v, \quad (3)$$

В даній роботі вивчається центральний (прямий) удар двох сталевих куль. Кулі відхиляються від положення рівноваги на однакові кути і відпускаються. В момент удару кулі проходять через положення рівноваги, так що швидкість їх до удару визначається висотою підняття h_1 їх над положенням рівноваги. Після часткового пружного удару кулі підіймуться на меншу висоту, тому що частина енергії втрачається.

До удару швидкості куль однакові і рівні $v = \sqrt{2gh_1}$, після удару швидкості куль теж однакові, але менші, тому вони піднімуться на меншу висоту h_2 таку, що виконується рівність $u = \sqrt{2gh_2}$. Коефіцієнт відновлення :

$$k = \sqrt{h_2/h_1} \quad (4)$$

через кути відхилень куль (рис.1) може бути поданий як:

$$k = \sqrt{\frac{(1 - \cos \alpha_2)}{(1 - \cos \alpha_1)}} \quad (5)$$

де α_1 -початковий кут відхилення після зіткнення. α_2 – кут відхилення після

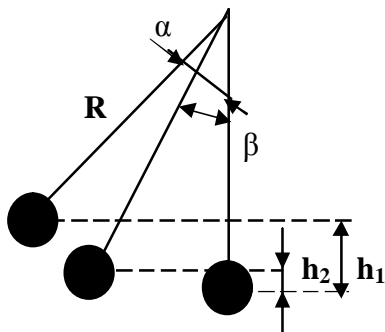


Рис.1

зіткнення. Оскільки значення k відрізняється від одиниці тільки в третьому знаку, то помітити різницю між початковим і кінцевим відхиленнями дуже важко. Для того, щоб цю різницю зафіксувати, намагаються помітити кут відхилення після n -го зіткнення.

Неважко збагнути, що в цьому разі

$$k = \sqrt[2n]{\frac{(1 - \cos \alpha_n)}{(1 - \cos \alpha_1)}}, \quad (5)$$

де корінь степеня $2n$.

Робота ж деформації при цьому подається виразом

$$A = (2mgh_1 - 2mgh_n)/n = 2mgR (\cos \alpha_n - \cos \alpha_1)/n \quad (6)$$

де m - маса кулі; g - прискорення вільного падіння.

Порядок виконання роботи:

1. Перевірити однаковість довжин ниток, на яких висять кулі, і при необхідності відрегулювати їх.
2. Для вибраної пари куль зробити пробні удари куль, відхиляючи їх на однакові кути. При відліку кутів u відхилення ввести корекцію на положення куль при контакті.
3. Виконати вимірювання: відхилити кулі на 10° і відпустити їх, помітити найбільші кути відхилення після удару. Якщо різниця не перевершує 1° , за відлік взяти середнє значення. При більшій різниці дослід повторити.
4. Дати кулям зіткнутись 8,16,32,... рази і зафіксувати максимальне відхилення після вказаного числа зіткнень.
5. Розрахувати k і A за (5) і (6).

6. Провести ще два досліди для двох інших початкових кутів відхилення і за (5) і (6) обчислити k і A . Довірчий інтервал розрахувати для надійності 0,7. Результати занести до таблиці:

α	β	R	$\cos \alpha_1$	$\cos \alpha_n$	k	Δk	A
0°							
13°							
15°							
Середні значення							

Дайте відповідь на запитання:

1. Чи можна змінити коефіцієнт відновлення?
2. Як вплинуть на точність вимірювань неоднакові довжини підвісів куль?
3. Як впливає на точність вимірювань дотик ниткою до шкали?

Лабораторна робота № 9.

Дослідження відношення маси тяжіння до маси інерції.

Прилади та приладдя: відцентрова машина з двома тягарями та градусною шкалою, тахометром і лабораторним трансформатором.

Мета роботи: поглибити поняття маси як міри інертності та міри тяжіння тіл.

Коротка теорія та метод дослідження

В інерціальних системах координат точно дотримується II закон Ньютона в формі:

$$a = F/m, \quad (1)$$

та закон тяжіння :

$$F_T = \gamma m_T M_T / R^2, \quad (2)$$

де F - сила, яка діючи на тіло, надає йому прискорення a . При цьому, як видно з (1), чим більша маса m тіла тим меншого прискорення набуває тіло. Тобто у даному випадку маса характеризує інерційні властивості тіла, є його мірою інерції (інертною масою). Згідно з законом всесвітнього тяжіння :

$$F_T = \gamma m_T M_T / R^2, \quad (3)$$

де: F_T – сила тяжіння, γ - гравітаційна стала, R відстань між тілами; m_T , M_T - маси тяжіння. У цьому випадку маса тіла m_T характеризує його властивість притягуватись до іншого (наприклад до Землі). Таким чином маси m_T і m виражають різні властивості тіла і тому в принципі можуть бути нерівні і непропорційні. Тому й виникає потреба у порівнянні цих мас.

Для цього розглянемо проявлення сил (1) та (2) в двох системах – інерціальній та неінерціальній, що рухається з прискоренням відносно першої. Хай інерціальна система координат зв'язана з поверхнею Землі, а неінерціальна - з вагоном, що рухається по закругленню радіуса r . При русі вагона зі швидкістю v підвішене до його стелі тіло відхилиться від вертикалі на деякий кут α (рис. 1).

В неінерціальній системі координат це відхилення зумовлено дією доцентрової сили $F = m a = mv^2 / r$, яка діє через підвіс і надає тілу прискорення, примушуючи його рухатися по колу. В неінерціальній системі вагона спостерігач, не знаючи нічого про рух вагона, робить висновок про те, що причиною відхилення є деяка горизонтальна сила інерції, протилежна доцентровій:

$$F_i = mv^2 / r. \quad (3)$$

де h - висота підняття головки маятника дорівнює $h = R(1 - \cos \alpha)$, де R - відстань від осі обертання до її центру ваги.

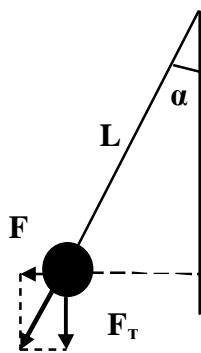


Рис.1

Отже в неінерціальних системах сили інерції проявляють себе як діючі на тіло сили, які разом з силою тяжіння визначають його рух. Сила тяжіння може бути визначена як

$$F_T = \gamma m_T M_T / R^2 = m_T g, \quad (4)$$

де g - прискорення вільного падіння тіла.

Для спостерігача у вагоні є єдина можливість розрізнити сили (3) і (4), якщо буде виявлена відношення мас m / m_T .

Досліди, що виконуються із все зростаючою точністю, показують, що відношення цих мас відрізняється від одиниці в одинадцятому знакові після дробової коми. Це серйозна підстава вважати, що m і m_T є проявленням однієї і тієї ж величини. Ця обставина була використана А. Ейнштейном як одне із обґрунтувань розробки теорії тяжіння в загальній теорії відносності.

Завдання даної лабораторної роботи є перевірка рівності $m/m_T=1$ на відцентровій машині з двома тілами однакової маси.

При обертанні ротора на тіло діє відцентрова сила інерції -

$$F = mv^2 / r = \omega^2 r, \quad (5)$$

де кутову швидкість ω ми виразимо через число обертів n ротора, за хвилину

$$\omega = 2\pi n / 60 = \pi n / 30 \quad (6)$$

З рис. 1 випливає, що

$$r = L \sin \alpha \quad (7)$$

Підставляючи (6) і (7) в (5), одержимо:

$$F = m \pi^2 n^2 L \sin(\alpha) / 900 \quad (8)$$

Знайдемо відношення сил (4) і (9):

$$\frac{F}{F_T} = \frac{m \pi^2 n^2 L \sin(\alpha) / 900}{m_T g}$$

На рис. 1 видно, що це відношення дорівнює $\text{ctg } \alpha$, тому

$$k = \frac{m \pi^2 n^2 L \sin(\alpha) / 900}{m_T g \cos(\alpha)} \quad (9)$$

Вимірюючи довжину підвісу L до центру тіл, число обертів n і кут відхилення α , за (9) можна обчислити відношення інерційної і тяжіючої мас.

Порядок виконання роботи:

1. Познайомитися з установкою, градусною шкалою, зі шкалою тахометра.
2. Виміряти довжину підвісу L до центру тіл.
3. Опустити тягарі і стрілки в нижнє положення, ввімкнути автотрансформатор в мережу і поступово підвищуючи напругу, надати роторові обертання, при якому стрілки підіймуться на $35-50^\circ$.
4. Дочекавшись рівномірного обертання ротора, помітити показання тахометра і вимкнути мережу. Після повної зупинки ротора записати кути відхилення усіх чотирьох стрілок з точністю до $30'$ і занести їх до таблиці.
5. Виконати вимірювання за пп. 3-4 ще два рази, кожний раз трохи збільшуючи число обертів.
6. Для кожного вимірювання визначити середній по 4 –х відліках кут α і за (9) обчислити k .
7. Знайти довірчий інтервал визначення k для надійності 0,7.
8. Результати вимірювань і розрахунків записати в таблиці.

Кінцевий результат записати у вигляді

$$k = \langle k \rangle \pm \Delta k.$$

Подати приклад розрахунків у таблиці:

№	L	α_1	α_2	α_3	α_4	$\alpha_{\text{ср}}$	n	k	Δk
1									
2									
3									
Середні значення									

Дайте відповіді на запитання:

1. Відтворіть рис. 1 за описанням його в тексті теорії.
2. Чи є інерціальною система, зв'язана з поверхнею Землі?
3. Необхідна умова для повороту велосипеда, вагона, машин, що рухаються. Що потрібно, аби всі вони не перекинулися на повороті?

Лабораторна робота № 10.

Вивчення гармонічних коливань на прикладі математичного маятника.

Прилади та приладдя: Установка з маятником і градусною шкалою, лінійка, секундомір.

Мета роботи: вивчення основних законів гармонічного коливання.

Коротка теорія і метод вимірювання

Гармонічними називають коливання тіла, близьке до положення рівноваги під дією сили, пропорційної зміщенню тіла з положення рівноваги і направленої до положення рівноваги

$$F = - cx, \tag{1}$$

де c - коефіцієнт пружної (квазіпружної) сили.

Знак мінус вказує на протилежність x і F . Якщо сила F є єдина прикладена до тіла, то вона спричинить його прискорення a і згідно з II законом Ньютона

$$F = m a = m d^2x / dt^2, \quad (2)$$

де m - маса тіла; d^2x/dt^2 - повторна (друга) похідна від зміщення за часом - прискорення тіла.

Із співвідношень (1) і (2) одержуємо рівняння, яке називають диференціальним рівнянням гармонічного коливання:

$$m d^2x/dt^2 = - cx, \quad (3)$$

розв'язком якого є

$$x = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

де: A - амплітуда - максимальне відхилення від положення рівноваги, $\omega t + \varphi$ - фаза коливання; φ - початкова фаза коливання, що відповідає моменту часу $t = 0$; ω - кругова або циклічна частота коливань, що дорівнює

$$\omega = \sqrt{c/m} \quad (5)$$

Найбільш простою наближеною моделлю гармонічного коливання може служити рух математичного маятника (рис.1), початково відхиленого від положення рівноваги на деякий невеликий кут ($\alpha \approx 5^\circ$). Діюча на матеріальну точку сила тяжіння - $P = mg$ розкладається на дві взаємно перпендикулярні складові. Складова F_1 і сила натягу нитки створюють доцентрове прискорення, а друга складова F викликає дотичне прискорення точки, що рухається по колу. За подібністю відповідних трикутників визначаємо:

$$F = P x / l, \quad (6)$$

де l довжина нитки.

При малих кутах α можна знехтувати відхиленням траєкторії від прямої і вважати, що дотичне прискорення дорівнює d^2x/dt^2 . Тоді виявляється справедливим (1) і, впливаючі з нього, (3) і (4). При цьому в ролі коефіцієнта пружної сили виступає відношення:

$$c = P / l, \quad (7)$$

що називається коефіцієнтом квазіпружної сили, тому що сила F в (4), звичайно ж, не є пружною, хоч і схожа з нею.

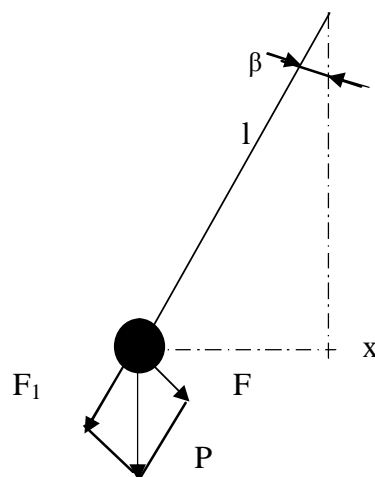


Рис.1

Підставляючи k із (7) в (5), одержуємо:

$$\omega = \sqrt{g/l} \quad (8)$$

Розглянемо коливання (4). Зміщення з положення рівноваги x періодичне в часі, і це відображується функцією синус, яка має період 2π . Зміні фази коливання на 2π відповідає найменший проміжок часу, через який повторюється процес коливання (період коливання). Якщо позначити період коливання T , то виявляється що $T\omega = 2\pi/T$, звідки:

$$T = 2\pi / \omega \quad (9)$$

що у випадку математичного маятника виглядає як

$$T = 2\pi \sqrt{l/g} \quad (10)$$

Отже, при гармонічних коливаннях період коливань математичного маятника, як це випливає з (10), не залежить від амплітуди коливань та маси і визначається довжиною маятника та прискорення вільного падіння тіла.

За відомими значеннями l і g з (8) та (10) можна розрахувати циклічну частоту і період коливань. З другого боку, період коливань нескладно визначити експериментально, а по ньому розрахувати за (9) циклічну частоту коливань.

В роботі використовується модель математичного маятника у вигляді металевої кульки, підвищеної на довгій нитці. Вивчається не тільки гармонічні, але й ангармонічні коливання, коли кут відхилення перевершує допустимі для гармонічних коливань значення в 3-4 рази.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з установкою виміряти довжину маятника l (від центра кульки). За формулою (8) обчислити теоретичне значення циклічної частоти ω , а за (10) - період T .

2. Відхилити маятник на $\alpha = 4-6^\circ$ і, відпустити його, виміряти секундоміром час Δt здійснення 50 коливань. Обчислити період коливань $T = \Delta t / 50$. За знайденим T за співвідношенням (9) обчислити ω . Визначити амплітуду коливань A з трикутника (рис.1):

$$A = x_{\max} = l \sin \alpha_{\max}$$

За знайденими величинами написати рівняння (4) при $\varphi = \pi / 2$.

3. Повторити дії п.2 для $\alpha_2 = 12-15^\circ$ та для $\alpha_3 = 18-20^\circ$.

4. Оцінити для кожного α відхилення одержаних з дослідів значень ω від їх теоретичного значення.

Дані вимірів і обчислень занести до таблиці:

	l	α	Δt	T	ω	$\Delta\omega$	A
Теоретичне		-	-			-	-
Вимірювання 1							
Вимірювання 2							
Вимірювання 3							

Дайте відповіді на запитання:

1. Як залежить точність виконання законів гармонічних коливань від кута відхилення математичного маятника ?

2. Приймаючи відносну похибку 0,03, оцінити за даними табл.1, для яких кутів можна застосовувати закони гармонічних коливань?

Лабораторна робота № 11.

Вивчення затухаючих коливань на прикладі фізичного маятника.

Прилади та приладдя: установка з фізичним маятником і градусною шкалою, лінійка, секундомір.

Мета роботи: Визначення параметрів затухаючих коливань.

Коротка теорія і метод вимірювань

Фізичним маятником називається тіло, вільно підвішене на нерухому вісь в точці, що не співпадає з центром інерції тіла. У відсутності тертя і при малих амплітудах коливань рух фізичного маятника можна розглядати як гармонічне коливання, яке здійснюється за законом синуса або косинуса :

$$x = A \sin \omega t, \quad (1)$$

де A - амплітуда коливання, ω - циклічна частота коливання, t - час, x - відхилення від положення рівноваги по горизонтальному напрямку.

Коливання фізичного маятника може бути зведено до коливання математичного маятника, для якого період коливання T і циклічна частота ω обчислюються за формулами:

$$T = 2\pi \sqrt{l/g}, \quad \omega = 2\pi / T, \quad (2)$$

де l - довжина математичного маятника, g - прискорення вільного падіння.

Довжина математичного маятника, період коливань якого співпадає з періодом коливань фізичного маятника називається приведеною довжиною фізичного маятника. Якщо виміряти період коливань фізичного маятника, то за формулою (2) можна обчислити приведену довжину фізичного маятника:

$$l = gT^2 / 4\pi^2. \quad (3)$$

При наявності тертя коливання маятника з плином часу затухають - зменшується амплітуда коливань. Рівняння затухаючих коливань має вигляд:

$$x = A_0 \exp(-\beta t) \sin \omega_3 t, \quad (4)$$

де $A = A_0 \exp(-\beta t)$ - амплітуда коливань, що зменшується з плином часу, A_0 - початкова амплітуда, β - коефіцієнт затухання, ω_3 - циклічна частота затухаючих коливань, яка менша за частоту ω незатухаючих - власних коливань:

$$\omega_3 = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}. \quad (5)$$

Графік затухаючих коливань подано на рис.1.

Ступінь затухання коливань характеризують декрементом затухання - відношенням двох послідовних амплітуд, взятих через період. Натуральний логарифм декременту затухання:

$$\Delta = \ln (A_n / A_{n+1}) = \ln [A_0 e^{-\beta t} / A_0 e^{-\beta (t+T)}] = \beta T \quad (6)$$

В даній роботі фізичний маятник являє собою стрижень з віссю обертання на шариковому підшипнику. Зміна періоду коливань маятника здійснюється зміною положення муфти, надітої на стрижень.

Завданнями роботи є визначення приведеної довжини фізичного маятника і вивчення закону затухаючих коливань. Неважко збагнути, що логарифмічний декремент затухання можна визначити за формулою

$$\Delta = \ln (A_0 / A_n)/n, \quad (7)$$

де A_n - амплітуда n -го коливання.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Ознайомитися з установкою. Встановити муфту верхнім краєм проти верхньої риски на стрижні і виміряти відстань r від осі обертання до центра муфти. Відхилити маятник на $15-20^\circ$ від положення рівноваги і в трьох дослідах виміряти секундоміром період коливань T .

2. Повторити заміри за пунктом 1 двічі, опускаючи кожного разу муфту на 5-10 см. Результати вимірювань і розрахунків подати в табл. 1. Порівняти значення r і l .

Таблиця 1

№	r	T	l	$r-l$	$(r-l)/l$

Завдання 2.

1. Залишаючи муфту в третьому положенні, відхилити маятник на $15-20^\circ$ і при коливаннях помітити відхилення початкового і кінцевого коливань. Зробити подібні вимірювання тричі. Кожного разу обчислити значення початкової і кінцевої амплітуди за формулою $A_n = l \sin \alpha_n$.

2. Знайти в кожній серії вимірів відношення початкової амплітуди до шостої (три значення). Згідно з (6) розрахувати логарифмічний декремент затухання як $\Delta = \ln (A_6 / A_0)/6 = 2,3 \lg (A_n / A_{n+1})/6$.

3. Визначити коефіцієнт затухання $\beta = \Delta/T$, використовуючи T з останнього рядка табл.1.

4. Дані вимірів та розрахунків за пп.3-5 подати в табл. 2. Обчислити циклічну частоту коливання за співвідношенням $\omega = 2\pi / T$.

Таблиця 2.

№	A_n	A_{n+1}	A_n / A_{n+1}	Δ	T	β
1				-	-	-
2				-	-	-
3				-	-	-
Середні значення						

Записати рівняння затухаючих коливань (4), підставляючи в нього знайдені числові значення.

Дайте відповіді на запитання:

1. Як змінюється різниця між положенням центру муфти і приведеною довжиною фізичного маятника при опусканні муфти?
2. Від чого залежить та як можна виміряти коефіцієнт затухання в цій роботі?
3. Як залежить період затухаючих коливань в даній роботі від положення муфти на стрижні фізичного маятника?

Лабораторна робота № 12.

Дослідження прискорення вільного падіння за допомогою оборотного маятника.

Прилади та приладдя: оборотний маятник, секундомір, міліметрова лінійка, призма для знаходження центра інерції фізичного маятника.

Мета роботи: засвоїти метод визначення прискорення вільного падіння за допомогою оборотного фізичного маятника.

Коротка теорія та метод вимірювання

Фізичним маятником називають будь-яке тіло, що коливається під дією сили тяжіння відносно осі, що не перетинає його центр інерції. Період коливань фізичного маятника може бути визначений за тією ж формулою, що і математичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{I/g} \quad (1)$$

де g - прискорення вільного падіння, I - так звана приведена довжина фізичного маятника.

Приведена довжина фізичного маятника може бути виражена через його момент інерції I відносно осі обертання, відстань d від m осі обертання до центра інерції і масу маятника:

$$l = I / md \quad (2)$$

Оборотний фізичний маятник (див. рис.1) складається з металевого стержня, вздовж якого можуть переміщуватися тягарі і опорні призми, що служать для підвішування маятника. Якщо маятник підвісити на одну, а потім на другу призму, то періоди коливань в цих двох випадках, згідно з співвідношенням (2), можуть бути подані у вигляді:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{I_1/m_1 d_1}; T_2 = 2\pi \sqrt{I_2/m_2 d_2} \quad (3)$$

де d_1 і d_2 - відстані від точок опори до центра інерції маятника C (рис.1); I_1 і I_2 - моменти інерції маятника відносно точок опори.

Згідно з теоремою Штайнера

$$I_1 = I_0 + md_1^2; I_2 = I_0 + md_2^2, \quad (4)$$

де I_0 - момент інерції маятника відносно осі, що проходить через інерції тіла. Із (3) з урахуванням (4) можна одержати такі співвідношення:

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2}{mgd_1} (I_0 + md_1^2); \quad T_2^2 = \frac{4\pi^2}{mgd_2} (I_0 + md_2^2).$$

Підставляючи I_0 із першого в друге рівняння, одержуємо

$$g = \frac{4\pi^2(d_1^2 - d_2^2)}{dT_1^2 - dT_2^2}. \quad (5)$$

Це – розрахункова формула для визначення g в першому завданні. При використанні в другому завданні рівності періодів коливань $T_1 = T_2 = T$ оборотного маятника на точках опори O_1 і O_2 (рис.1), коли рівні і їх приведені довжини $l_1 = l_2 = l$, із (3) і (4) одержуємо :

$$l = \frac{I_0 + md_1^2}{md_1} = \frac{I_0 + md_2^2}{md_2}. \quad (6)$$

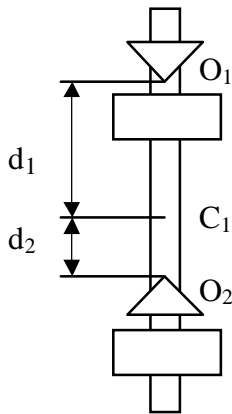


Рис.1

Визначаючи із (6) I_0 , приходимо до виразу

$$I_0 = md_1d_2. \quad (7)$$

Підставляючи значення I_0 із (7) в (6), одержуємо співвідношення, що дозволяє визначити приведену довжину фізичного маятника за прямими вимірюваннями:

$$l = d_1 + d_2. \quad (8)$$

Знаючи приведену довжину фізичного маятника і вимірюючи період коливань T_1 , за формулою (1) можемо визначити прискорення вільного падіння :

$$g = 4\pi^2 l / T^2 \quad (9)$$

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Розмістивши тягарі так, як вказано на рис. 1., відхилити кінець маятника на 3-4см, тричі визначити секундоміром час ста повних коливань, розрахувати значення T_1 і T_2 .

2. Поклавши маятник на ребро спеціальної призми і домігшись рівноваги, визначити положення центра інерції – точки C (рис.1) і виміряти відстані d_1 і d_2 .

3. За формулою (5) обчислити g_1 , результати внести в таблицю:

t_1	T_1	t_2	T_2	d_1	d_2	g_1

Завдання 2.

1. Перемістити на стрижні один тягар так, щоб зменшити різницю періодів T_1, T_2 відхилити кінець маятника на 3-4 см., визначити час t_1 10 коливань.

2. Перевертаючи маятник, зробити ті ж вимірювання, визначаючи t_2 .

3. Переміщуючи тягарі і повторюючи дії пп.1-2, домогтися співпадання t_1 і t_2 .

4. Уточнити положення тягарів, зробивши вимірювання ста коливань. Домогтися відміни t_1 і t_2 не більше ніж 1с.

5. Визначити середнє значення періоду коливань $T = (t_1 + t_2) / 200$.

6. За допомогою лінійки визначити відстань між призмами 1 - приведену довжину маятника.

7. За формулою (9) розрахувати g_2 і знайти різницю з результатом, одержаним в завданні 1 – $\Delta g = g_2 - g_1$:

Результати вимірів і розрахунків подати в таблиці:

t_1	t_2	T	l	g_1	g_2

Дайте відповіді на запитання:

1. Який з використаних методів є точнішим і більш раціональним?
2. Чому вказаними методами можна користуватися тільки при малих амплітудах коливань?
3. Чи залежить період коливань фізичного маятника від маси?
4. Як мають бути змінені вимірювання в другому завданні для збільшення точності визначення g ?

Лабораторна робота № 13.

Вивчення стоячої хвилі в трубі.

Прилади та приладдя: установка, що складається з металічної труби з пересувним поршнем, камертон з відомою власною частотою коливань, вимірвальна лінійка, термометр.

Мета роботи: методом резонансу визначити довжину хвилі та швидкість її поширення в повітрі.

Коротка теорія та метод вимірювання

Звукові хвилі в повітрі являють собою послідовність згущень та розріджень повітря, що чергуються та поширюються з певною швидкістю, залежною від пружних властивостей середовища та його густини. Відстань між сусідніми згущеннями або розрідженнями називається довжиною хвилі. Звукові хвилі повздовжні, в них коливання частинок повітря здійснюється за напрямком поширення хвилі.

Так зване рівняння біжучої хвилі можна одержати у такий спосіб. Нехай на початку координат здійснюються гармонічні коливання з амплітудою A і циклічною частотою $\omega = 2\pi\nu$ (ν - кількість коливань за секунду або проста частота):

$$x = A \sin(\omega t). \quad (1)$$

Нехай ці коливання передаються однорідному середовищу без втрат енергії, так що коливання поширюються в ньому з деякою сталою швидкістю v . Розглянемо деяку точку, що відстоїть від початку на відстані “ y ”. До цієї точки коливання дійдуть через проміжок часу $\Delta t = y/v$, що означає, що час коливань в точці, що розглядається, відстає від часу коливань на початку координат на Δt . Отже, точка “ y ” буде коливатися за законом

$$x_1 = A \sin \omega (t - y/v). \quad (2)$$

Одержане рівняння біжучої хвилі - коливання довільної точки в довільний момент часу при відомому коливанні на початку координат.

Якщо хвиля розповсюджується вздовж труби і відбивається від поршня, то відбита хвиля буде описуватися рівнянням, що подібне (2), а тільки замість “у” слід писати “-у”:

$$x_2 = A \sin \omega (t + y/v). \quad (3)$$

Складання прямої і відбитої хвиль призводить до такого коливання:

$$x = a \sin \omega t, \quad \text{де } a = 2A \cos (\omega y / v), \quad (4)$$

де а - амплітуда результуючого коливання в точці “у” залежить від її положення. Якщо зробити заміну за відомими співвідношеннями

$$\omega = 2\pi v; \quad v = \lambda v, \quad (5)$$

то для амплітуди результуючого коливання одержимо:

$$a = 2A \cos (2\pi y / \lambda). \quad (6)$$

При “у”, що дорівнює цілому числу півдовжин хвилі $y = k\lambda/2$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), амплітуда коливань перетворюється в нуль.

Що ж являє собою коливання (4)? Ці коливання є такими, що зупинилися, бо фазовий множник $\sin (\omega t)$ не містить координату “у”. Амплітуда цих коливань (6) в різних точках “у” різна. В тих місцях, де вона перетворюється в нуль, утворюються так звані вузли, а де амплітуда коливань максимальна - пучності. Коливання точок, що розміщені між сусідніми вузлами, відбуваються в одній фазі, що визначаються аргументом функції синус. Розподіл коливань в просторі нагадує, таким чином, хвилю, що зупинилася.

Якщо відбивання здійснюється від більш густого середовища, ніж те, в котрому поширюється пряма хвиля, то на місці відбивання завжди утворюється вузол. Отже, якщо вести відлік відстаней від поршня, то пучності відстоять від нього на відстанях:

$$l = (2k + 1) \lambda/4. \quad (7)$$

Якщо поршень зміщений на відстань l (7) від обрізу труби, то в місці розміщення джерела звуку (на обрізу труби) виникне пучність. При цьому коливання джерела звуку (камертона), попадаючи в резонанс з коливаннями звукової хвилі, призводять до різкого підсилення гучності звуку. В цьому і полягає метод досліджень в даній роботі. Переміщуючи поршень, домагаються підсилення звуку і вимірюють послідовний ряд відстаней l_1, l_2, l_3 , для яких справджується співвідношення (7). Складаючи значення $l_1 + l_2 + l_3 = \lambda/4 + 3\lambda/4 + 5\lambda/4$, визначають середнє значення довжини хвилі:

$$\lambda = 4 (l_1 + l_2 + l_3) / 9. \quad (8)$$

За відомою частотою ν коливань камертона і знайденою λ знаходять швидкість звуку при даній температурі: $v = \lambda/\nu$. Швидкість при $t = 0^\circ \text{C}$ знаходить за відомою температурою залежністю:

$$v_0 = v / \sqrt{1 + \alpha t} \quad (9)$$

Порядок виконання роботи:

1. Повільно відсовують поршень від обрізу труби, безперервно постукуючи молоточком по камертону. При різкому підсиленні звуку підбирають положення поршня, переміщуючи його вперед і назад, що відповідає найбільшій гучності звуку, і вимірюють відстань l_1 , від обрізу труби до поршня.

2. Переміщуючи поршень далі, повторюють дії пункту 1 і знаходять відстані l_1, l_2, l_3 .

3. Двічі повторюють дії пп.1-2, вимірюючи l_1'', l_2'', l_3'' . Обчислюють середнє значення величини довжини $l_1 = (l_1' + l_1'' + l_1''') / 3$ в кожній точці вимірювань.

4. За формулою (8) обчислюють λ , визначають $v = \lambda \nu$ і швидкість звуку при 0°C за співвідношенням (9).

Результати вимірювань і розрахунків дати в таблиці:

v	l_1	l_2	l_3	λ	v	v_0

У звіті подають повний розрахунок величин.

Дайте відповіді на запитання:

1. Як треба вести вимірювання, якщо камертон віддалити від труби на деяку відстань b ?
2. Як оцінити похибки вимірювань в цьому методі?
3. Як можна удосконалити метод вимірювань?

Лабораторная работа № 14.

Визначення показника адіабати повітря.

Прилади та приладдя: установка Клемана – Дезорма.

Коротка теорія та метод вимірювання

Адiabатичним називається процес, що протікає без теплообміну з навколишніми тілами. В газах адіабатичний процес можна здійснити при швидкому розширенні або стисканні газу. Проміжок часу стискання має бути такий, щоб не встиг відбутися теплообмін між газом і стінками посудини.

Адiabатичний процес описується рівнянням Пуассона:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma = \text{const}, \quad (1)$$

де p - тиск, створюваний газом на стінки посудини об'ємом V . При цьому індекс "1" відноситься до одного стану газу, а індекс "2" - до іншого.

Графік процесу називається адіабатою, а величину γ показником адіабати. Вона дорівнює відношенню теплоємності газу при сталому тиску до теплоємності його при сталому об'ємі. В молекулярно-кінетичній теорії теплоємностей газу доводиться, що величина γ визначається числом ступенів вільності "i" молекули газу -

$$\gamma = (i + 2) / i. \quad (2)$$

В одноатомних молекул число ступенів вільності $i=3$, у лінійних молекул $i=5$, у нелінійних розгалужених молекул $i=6$.

В даній роботі застосовується метод Клемана –Дезорма, в якому на основі здійснення адіабатичного процесу в газі визначається величина показника адіабати.

В балоні місткістю до 20 л знаходиться повітря при кімнатній температурі T_0 та атмосферному тиску P_0 . За допомогою насоса тиск в балоні підвищують та надають газіві час охолотитись до кімнатної температури. Маємо початковий стан газу, що характеризується тиском $P_0 + H$, об'ємом V_0 та температурою T_0 . Відкриваємо кран, надаємо газіві можливості розширитися та швидко закриваємо кран. Час розширення газу малий порівняно з часом теплообміну його з навколишнім середовищем. Процес можна вважати адіабатним. При адіабатному розширенні температура газу знижується до T_1 . Другий стан газу характеризується параметрами P_0 , V_1 і T_1 . Зв'язок параметрів газу в цих двох станах описується співвідношенням (1). Ми, на жаль, не знаємо ні об'єму V_1 , ні температури T_1 . Тому, застосувавши додатково до цих двох станів рівняння Менделєєва-Клапейрона, можна записати такі дві рівності:

$$(P_0 + H)V_0^\gamma = P_0V_1^\gamma, \quad V_0^{\gamma-1} = T_1V_1^{\gamma-1} \quad (3)$$

Після закриття крану в посудині виявилась інша маса газу, що характеризується атмосферним тиском P_0 , об'ємом V_0 і температурою T_1 . Якщо при закритому крані надати можливості газу нагрітись до кімнатної температури T_0 , то при незмінному об'ємі V_0 тиск газу підійметься до $P_0 + h$.

Маємо зв'язок двох станів при ізохоричному процесі

$$P_0 / T_1 = (P_0 + h) / T_0 \quad (4)$$

Із співвідношень (3) – (4) одержуємо рівність

$$(P_0 + h) / P_0 = T_0 / T_1 = (V_1 / V_0)^{\gamma-1} = (P_0 + H) / P_0)^{\gamma-1}$$

Розділимо почленно крайні члени останньої рівності

$$1+h / P_0 = (1 + H / P_0)^{\gamma-1}$$

і розкладемо праву частину рівності в ряд, приймаючи, що відношення h/P_0 , а також $H/P \ll 1$. Тоді приходимо до рівняння

$$1 + h / P_0 = 1 + (\gamma - 1) (H / P_0),$$

або

$$\gamma = H / (H - h) \quad (5)$$

Порядок виконання роботи:

1. Закрити випускний кран балона, обережно накачати насосом повітря, щоб різниця рівнів води в манометрі досягла 15-25 см. При накачуванні виконується робота стискування газу, тому температура його підіймається.

2. Зачекати 2-3 хв., доки температура в балоні зрівняється з кімнатною і перестануть змінюватися показання манометра. Відлічити показання різниці рівнів в манометрі H в міліметрах водяного стовпа.

3. Здійснити адіабатичний процес. Для цього швидко відкрити випускний кран і негайно закрити його, щойно зрівняються рівні води в манометрі. При

цьому тиск в балоні дорівнюватиме атмосферному, температура буде нижчою за кімнатну.

4. Зачекати 2-3 хвилини до вирівнювання температури повітря в балоні з кімнатною. Це видно по затримці підвищення тиску в балоні. Записати різницю рівней в манометрі h в міліметрах водяного стовпа.

5. За формулою (5) обчислити показник адіабати .

Здійснити дії пунктів 1-5 ще 4 рази, змінюючи кожний раз тиск у вказаних межах.

Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці; знайти довірчий інтервал визначення показника адіабати для надійності 0,7:

№	H	h	γ	$\Delta\gamma$	$\gamma_i = \frac{i+2}{i}$
1					-
2					-
3					-
4					-
5					-
Середні значення					

8. Беручі до уваги, що повітря складається в основному з двоатомних молекул азоту та кисню, для яких число ступенів вільності $i=5$, обчислити за (2) теоретичне значення показника адіабати.

Результати роботи подати у вигляді: $\gamma = \gamma_{\text{ср.}} \pm \Delta\gamma_{\text{ср.}}$

Дайте відповіді на запитання:

1. Який процес називається адіабатичним і як здійснити цей процес?
2. Як змінюється температура системи при адіабатичному розширенні, стисканні?
3. В чому полягає причина різниці експериментально і теоретично знайденого значень показника адіабати?
4. Чому в даній роботі застосовують водяний, а не ртутний манометр?

Лабораторна робота № 15.

Дослідження вологості повітря.

Прилади та приладдя: психрометр Асмана, барометр-анероїд, таблиця тиску насиченої водяної пари (пружності водяної пари), психрометрична таблиця – номограма.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання вологості повітря.

Коротка теорія та метод вимірювань

Велика маса води на Землі призводить до того, що її атмосфера в значній мірі насичена водяною парою. Для багатьох цілей важливо знати кількість водяної пари, що міститься в атмосферному повітрі.

Одною з характеристик атмосфери є вологість повітря. Розрізняють абсолютну та відносну вологість.

Абсолютну вологість характеризують масою водяної пари, що міститься в 1 м^3 повітря. Оскільки водяну пару в повітрі можна розглянути як своєрідну суміш газів, то до неї можна застосувати закон Дальтона: “Тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків компонентів”.

Парціальний тиск – це тиск, що створювався б одним компонентом при тій же температурі, що й суміш, якби він (даний компонент) займав весь об’єм, наданий суміші. Це вказує шлях для зведення характеристики абсолютної вологості як парціального тиску водяної пари.

При даній температурі є певна кількість пари, яка може міститься в одиниці об’єму, або інакше: при кожній температурі є гранично високий тиск пари. Пара при гранично високому при даній температурі тискові називається насиченою. Перевершення тиску насиченої пари у наявності центрів конденсації веде до конденсації лишків пари і пониження тиску до тиску насиченої пари. Тиск насиченої водяної пари при нормальному атмосферному тискові протабульований.

Абсолютна вологість не повністю характеризує стан атмосфери, бо одна і та ж кількість пари в одиниці об’єму при різних температурах по різному впливає на різні фізичні та інші процеси: пара, що ненасичена при високій температурі, стає насиченою при зниженні температури. В зв’язку з цим вводять ще одну характеристику – відносну вологість повітря як відношення тиску пари води, що міститься в повітрі при даних умовах, до тиску насиченої пари при тій же температурі (інколи – у відсотках).

$$B = (P / P_H) 100\% \quad (1)$$

Психрометр Асмана складається з двох термометрів, ртутний резервуар одного з яких обгорнуто батистом, змоченим у воді. Під час вимірювань термометри інтенсивно обдуваються повітрям за допомогою вентилятора. Внаслідок випаровування води, більшого відводу тепла від вологого термометра його температура T_B встановлюється нижчою, ніж сухого T_C .

Різниця температур $T_C - T_B$, що встановилася, свідчить про те, що кількість тепла Q , яке надходить з повітряного потоку, дорівнює кількості тепла Q_1 , що витрачається на випаровування води. Згідно з законом Фур’є, кількість тепла, що надходить з повітряного потоку, можна подати як

$$Q = \lambda (T_C - T_B) S \Delta t, \quad (2)$$

де λ - коефіцієнт теплопередачі від повітря до вологого термометра; S - площа поверхні термометра, що бере участь у теплообміні; Δt - деякий проміжок часу. Кількість тепла, що йде на випаровування, можна подати виразом

$$Q_1 = k l S (P_H' - P) \Delta t / H, \quad (3)$$

де k - характеризує теплопередачу від балона термометра до вологого батисту; l - характеристика повітряного потоку; H - атмосферний тиск; P - тиск повітряної пари; P_H' - тиск насиченої пари при температурі вологого термометра. Прирівнюючи Q і Q_1 і вводячи позначення $A = \lambda / kl$, одержуємо співвідношення для визначення тиску пари, що знаходиться в повітрі, тобто абсолютної вологості:

$$P = P_H' - AH (T_c - T_b). \quad (4)$$

Сталу A визначають дослідним шляхом. Для психрометра Асмана в даній роботі $A = 0,0005 \text{ K}^{-1}$.

Порядок виконання роботи:

1. Обережно зняти психрометр з зачіпки, ознайомитись з його конструкцією, впевнитись, що один з термометрів має батистову обгортку.
2. Наповнити водою ємність і вмочити кінець термометра обгорнутого батистом у воду.
3. Завести пружину вентилятора, обережно почепити психрометр на своє місце та спостерігати показання T_c і вологого T_b термометрів.
4. При усталеній температурі вологого термометра записати показання обох термометрів з точністю до $0,1^\circ\text{C}$.
5. За таблицею пружності насиченої пари визначити тиск насиченої пари P_H' при температурі T_b .
6. Обчислити абсолютну вологість за формулою (4), підставляючи атмосферний тиск H за показанням барометра та приймаючи $A=0,0005 \text{ K}^{-1}$.
7. Обчислити відносну вологість за формулою (1), для чого з таблиці тиску насиченої пари знайти тиск P_H , що відповідає температурі сухого термометра T_c .
8. Користуючись номограмою або психрометричною таблицею, знайти відносну вологість B' за показаннями T_c та T_b .

Результати вимірювань та розрахунків подати в таблиці:

T_c	T_b	A	H	P_H'	P	P_H	B	B'

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке абсолютна та відносна вологість? Якими одиницями вони можуть бути виміряні?
2. Чому роса випадає вночі та вранці?
3. Що треба зробити, щоб підвищити або знизити відносну вологість в приміщенні?

Лабораторна робота № 16.

Дослідження теплопровідності твердих тіл.

Прилади та приладдя: прилад Христиансена, комплект термопар з перемикачем, гальванометр, пароутворювач, набір дисків з гуми, ебоніту та досліджуваних матеріалів, лійка і склянка для заливання води в пароутворювач.

Мета роботи: засвоїти один із методів визначення коефіцієнта теплопровідності.

Коротка теорія та метод вимірювань

Теплопровідність - це явище, пов'язане з переносом тепла від більш до менш нагрітого тіла при контактуванні тіл або більш нагрітої частини одного тіла до менш нагрітої.

При виникненні різниці температур спочатку йде процес так званої нерівноважної теплопровідності, при якій температура в будь-якій точці з плином часу змінюється. Проте, якщо між будь-якими частинами тіла підтримувати незмінну різницю температур, то нерівноважна теплопровідність з часом перейде в рівноважну, коли по всьому тілу встановиться незмінний з часом розподіл температур. При цьому за проміжок часу t через будь-який переріз S в тілі переноситься кількість тепла Q , яка визначається законом Фур'є:

$$Q = -k \frac{dT}{dl} S t, \quad (1)$$

де k - коефіцієнт теплопровідності даного тіла, що визначається його фізичною природою; dT/dl - градієнт температури. Градієнт даної фізичної величини - це похідна по напрямку найбільшого її росту; при сталості похідної по даному напрямку градієнт можна визначити як зміну фізичної величини, віднесену до одиниці довжини по даному напрямку.

Наявність знака "мінус" в (1) вказує, що перенос тепла відбувається за напрямком зменшення температури, де $dT/dl < 0$. Смысл коефіцієнта теплопровідності k стане зрозумілим, коли в (1) покласти $dT/dl = 1$ К/м, $S = 1\text{ м}^2$, $\Delta t = 1\text{ с}$. Тоді коефіцієнт теплопровідності чисельно буде дорівнювати кількості тепла, що переноситься через площу 1 м^2 за 1 с при градієнті температури 1 К/м . Чим більший коефіцієнт теплопровідності k , тим краще тіло проводить тепло. Високу теплопровідність мають метали, меншу - діелектрики, найменшу - гази.

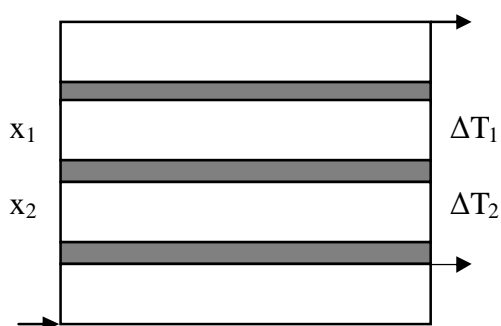


Рис.1

В даній роботі використовується прилад Христиансена, в якому різниця температур створюється потоками води і пари, що пропускаються через дві камери. Між камерами вкладаються пластини і щільно притискаються одна до одної гвинтом-затискачем (рис. 1).

Складемо установку у такий спосіб: нижня камера - холодильна, тонкий шар м'якої гуми, еталонне тіло, знову тонкий шар м'якої гуми, нагрівальна камера.

Для забезпечення добрих теплових контактів проміжні пластини виготовляють з м'якої гуми. Різницю температур між поверхнями досліджуваних тіл вимірюють диференціальними термопарами.

Пропустимо через нижню камеру водопровідну воду, а через верхню - пару з кип'ятильника. Якщо різниці температур ΔT_1 і ΔT_2 не змінюються, то це значить, що встановився за часом розподіл температур, і процес переносу тепла можна описувати співвідношенням (1).

Потурбуймося про те, щоб розміри пластин були набагато більші за їх товщину. Це необхідно для того, щоб можна було вважати, що тепловий потік не відводиться через бокові зрізи пластин, а проходить перпендикулярно до пластин.

Оскільки товщини еталонної пластини x_1 і досліджуваної x_2 малі, то градієнти температури в пластинах можна замінити відношеннями $\Delta T_1 / x_1$ і $\Delta T_2 / x_2$, де ΔT_1 - різниця температур між протилежними поверхнями еталонної пластини, ΔT_2 - те ж саме для досліджуваної.

Застосуємо співвідношення (1) для кількості тепла, що пройшло через еталонну і досліджувану пластини:

$$\Delta Q_1 = - k_1 (\Delta T_1 / x_1) S \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta Q_2 = - k_2 (\Delta T_2 / x_2) S \Delta t. \quad (3)$$

В співвідношеннях (2) і (3) площі пластин та проміжки часу однакові.

Кількості тепла ΔQ_1 і ΔQ_2 однакові, тому що втрати тепла із-за відводу його через бокові зрізи ми нехтуємо. Прирівнюючи (2) і (3), знайдемо невідомий коефіцієнт теплопровідності k_2 :

$$k_2 = k_1 (\Delta T_1 / x_1) / (\Delta T_2 / x_2). \quad (4)$$

В роботі показання термопар пропорційні різницям температур, тому відношення градієнтів температур в (4) можна замінити відношенням градієнтів показань гальванометра:

$$k_2 = k_1 (I_1 / x_1) / (I_2 / x_2). \quad (5)$$

де I_1 - показання гальванометра при приєднанні термопар до еталонної, а I_2 - до досліджуваної пластини.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з установкою. Відгвинтити впускний отвір і наповнити пароутворювач водою за допомогою склянки і лійки. Перевірити нульове положення стрілки гальванометра.

2. Підготувати установку до вимірів: вкласти на нижню камеру гумовий диск, один спай термопар 1, еталонний диск, другий спай термопар 1, гумовий диск, перший спай термопар 2, досліджуваний диск, другий спай термопар 2, гумовий диск, нагрівальну камеру. Скріпити весь стос затискним гвинтом.

3. Злегка відгвинтити кран і пропустити через нижню камеру струмінь водопровідної води. Ввімкнути до мережі штепсель пароутворювача.

4. Дочекатись кипіння, потім ще почекати 3-5 хвилин, послідовно перемкнути термопар і записати показання гальванометра. Якщо показання гальванометра на термопарах не змінюються, то записують його показання I_1 на "еталонній" термопарі і I_2 - на термопарі, приєднаній до досліджуваного тіла.

5. Вимкнути пароутворювач, закрити водопровідний кран, розібрати стос дисків, виміряти товщину кожного в трьох місцях. Знайти середнє значення товщини кожного диска.

Виконати за формулою (5) розрахунки, приймаючи для ебоніту $k_1=0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Результати вимірювань та обчислень дати в таблиці:

k_1	x_1	J_1	J_2	x_2	k_2

Дайте відповіді на запитання:

1. Який основний закон покладено в основу роботи?
2. Чому в даному методі вимірювань діаметри пластин мають бути значно більшими за їх товщину?
3. Чому нагрівальна камера знаходиться зверху?

Лабораторна робота № 17.

Дослідження властивостей газів методом витікання їх через капіляр.

Прилади та приладдя: експериментальна установка, що складається з балона з капіляром та краником, водяного манометра та насоса з краном, секундомір, барометр, термометр.

Мета роботи: засвоїти один із методів визначення параметрів теплового хаотичного руху молекул в газах.

Коротка теорія і метод вимірювання

В роботі визначаються деякі параметри, що характеризують тепловий хаотичний рух молекул газів, за допомогою співвідношень молекулярно-кінетичної теорії. За основний приймається метод, що ґрунтується на вимірюванні коефіцієнта внутрішнього тертя (в'язкості) газу при його витіканні через трубку кругового перетину – капіляр.

В усталеному потоці маса газу, що переноситься через елемент поверхні dS за час t , може бути знайдена як добуток густини газу ρ на об'єм газу V , що перенесений через перетин площею S із швидкістю v :

$$dm = \rho dV = \rho v t dS. \quad (1)$$

В зв'язку з наявністю внутрішнього тертя швидкість газу v в різних точках перетину капіляра різна: вона максимальна на осі капіляра і дорівнює нулю біля його стінок. Пуазейль отримав формулу для розподілу швидкостей газу або рідини в трубці радіусу r на різних відстанях r_x від осі в залежності від різниці тиску $P' - P$ на кінцях трубки довжиною l :

$$v = \frac{P' - P}{4\eta l} (r^2 - r_x^2), \quad (2)$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя газу.

Якщо об'єм посудини, в якій знаходиться газ, і температура газу сталі, то величину η можна пов'язати зі зміною тиску газу в посудині. Дійсно, із рівняння Менделєєва-Клапейрона знаходимо, що

$$dm = \frac{\mu V}{RT} dP, \quad (3)$$

де μ - молярна маса газу; R - універсальна газова стала; T - температура газу; dP - зміна тиску в посудині, пов'язана з витіканням з неї газу.

Прирівнюючи (1) і (2), а також виконуючи інтегрування одержаного виразу, можна записати вираз для коефіцієнта в'язкості газу:

$$\eta = \frac{\pi P t}{8 V \ln(h_1/h_2)}, \quad (4)$$

тут V - об'єм балона; l - довжина капіляра; h_1 і h_2 - початковий і кінцевий надлишкові тиски газу в балоні, відлічені на манометрі як різниця рівнів; P - атмосферний тиск (в паскалях); T - температура газу; t - час витікання газу. Надлишковий тиск газу має бути малим порівняно з атмосферним тиском.

Кінетична теорія ідеального газу дає зв'язок коефіцієнта в'язкості η з густиною ρ газу, середньою довжиною вільного пробігу молекул λ :

$$\eta = \rho \lambda u / 3. \quad (5)$$

Знаходячи густину газу із рівняння Менделєєва-Клапейрона і підставляючи в (5) значення $u = \sqrt{8RT/\pi\mu}$, можна знайти величину середньої довжини вільного пробігу молекул:

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}. \quad (6)$$

Кінетична теорія газів встановлює залежність середньої довжини вільного пробігу молекул від ефективного діаметра молекул d і числа молекул в одиниці об'єму n :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n d}. \quad (7)$$

де $n = P/(kT)$; k - стала Больцмана.

У такий спосіб за відомою λ можна знайти ефективний діаметр молекул. Підставляючи n в (7), одержуємо

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\lambda P}}. \quad (8)$$

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з установкою, визначити всі необхідні для розрахунків параметри і занести їх до таблиці.
2. Відкрити кран насоса і закрити кран капіляра. Накачати насосом повітря в балон, так щоб різниця рівнів досягала 25-40 см. Закрити кран насоса.
3. Через 3-5 хв., коли температура повітря в балоні зрівняється з температурою навколишнього середовища і не буде змінюватись рівень води в манометрі, зробити відлік різниці рівнів h_1 в манометрі з точністю до 1 мм.

4. Відкрити краник капіляра, одночасно включити секундомір і виміряти час t опускання надлишкового тиску до 8-12 см водяного стовпа.

5. Записати атмосферний тиск і температуру повітря.

6. Вимірювання за пунктами 2-5 провести тричі для однакових h_1 і h_2 .

Користуючись відповідними співвідношеннями, обчислити коефіцієнт внутрішнього тертя η , середню довжину вільного пробігу молекул λ і газокінетичний діаметр молекул повітря d ; молярна маса повітря дорівнює 0,029 кг/моль.

Результати вимірів та розрахунків подати в таблиці:

№	r	l	V	P	T	h_1	h_2	t	η	λ	d
1											
2											
3											
Середні значення											

Дайте відповідь на запитання:

1. Який фізичний смисл коефіцієнта внутрішнього тертя?
2. Як має змінюватись в'язкість газів в залежності від температури?
3. Що таке середня довжина вільного пробігу молекул і від чого вона залежить?
4. Як залежить середня довжина вільного пробігу молекул від тиску при сталій температурі?

Лабораторна робота № 18.

Визначення універсальної газової сталої акустичним методом.

Прилади і приладдя: труба з рухомим поршнем, гумовий молоточок, масштабна лінійка, термометр.

Мета роботи: засвоїти акустичний метод дослідження газів.

Коротка теорія

Звукові коливання, поширюючись в повітрі, являють собою періодично повторювані розрідження та згущення повітря. Якщо частота коливань висока, то, внаслідок малої теплопровідності повітря, не встигає відбуватися теплообмін між місцями згущень і розріджень. Процес поширення звуку в повітрі можна вважати адіабатичним, тобто таким, що відбувається без теплообміну. На цій основі одержано такий вираз для швидкості поширення звуку в газах:

$$v = \sqrt{\gamma P / \rho} \quad (1)$$

де $\gamma = C_p / C_v$ - показник адіабати, що дорівнює відношенню молярних теплоємностей при ізобаричному C_p і ізохоричному C_v процесах, P і ρ - тиск і густина газу.

Відношення P / ρ можна визначити з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1) і визначаючи швидкість звуку як $v = \sqrt{\gamma R/\mu}$, визначимо із останнього універсальну газову сталу:

$$R = \mu v^2 / \gamma. \quad (3)$$

Показник адиабати γ виразимо через ступенів вільності молекул газу i : $\gamma = C_p/C_v = (i+2)/i$. Підставивши його значення в (3), одержуємо

$$R = \mu i v^2 / (i+2) T. \quad (4)$$

Швидкість звуку можна виразити через довжину хвилі λ і частоту коливань ν .

$$v = \lambda \nu. \quad (5)$$

Тому остаточно з (4) одержуємо

$$R = \mu i \lambda^2 \nu^2 / (i+2) T. \quad (6)$$

Порядок виконання роботи:

1. Повільно рухаючи поршень від обрізу труби, безперервно постукуючи молоточком по камертону, при різкому підсиленні звуку підібрати положення поршня, що відповідає найбільшій гучності звуку. Виміряти відстань l_1 від обрізу труби до поршня.

2. Продовжуючи рух поршня, знайдіть інше положення l_2 резонансного звучання.

3. Виконати дії за пунктами 1-2 тричі і обчислити середні значення l_1 і l_2 .

4. Визначити за середніми l_1 і l_2 довжину хвилі згідно роботи № 13:

$$\lambda = 2(l_2 - l_1).$$

5. Для молекул повітря прийняти число ступенів вільності $i=5$, молярну масу

$\mu = 0,029$ кг/моль. Обчислити за (6) універсальну газову сталу.

Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці:

ν	l_1	l_2	λ	T	I	μ	R

Дайте відповідь на запитання:

1. Який процес називається адіабатичним?
2. Чому процес розповсюдження звуку можна розглядати як адіабатичний?
3. Як впливає на результат наявність вологи в повітрі, якщо прийняти для молекул води $i=6$?

Лабораторна робота № 19.

Дослідження зміни ентропії в реальних процесах.

Прилади та приладдя: пароутворювач, нагрівач, калориметр, два термометри, два досліджуваних твердих тіла (мідне та алюмінієве), технічні терези, різноваги.

Мета роботи: засвоїти поняття однієї з важливих характеристик системи – ентропії.

Коротка теорія та метод вимірювання

Будь-який реальний процес переходу системи з одного стану в інший протікає у такий спосіб, що неможливо його провести в зворотному напрямку без змін в навколишніх тілах. Це пов'язано з розсіянням частини енергії, з наявністю тертя, теплопередачі, випромінювання та інших причин. Реальні процеси в природі незворотні. В будь-якому з них змінюється стан системи, частина енергії розсіюється. Для характеристики цієї загальної для всіх систем властивості і вводять фізичну величину – ентропію, яка служить мірою безповоротного розсіяння тепла. Це виявляється надто важливим, тому що багато процесів в природі протікають за участю тепла. Поняття зміни ентропії вводиться як відношення елементарної теплоти процесу dQ до температури T , при якій відбувається цей безмежно малий процес:

$$dS = dQ / T. \quad (1)$$

Зміна ентропії в кінцевому процесі знаходиться як інтеграл від (1):

$$\Delta S = \int (dQ / T). \quad (2)$$

Запишемо перше начало термодінаміки

$$dQ = dW + dA, \quad (3)$$

де dQ - теплота, отримана системою; dW - зміна внутрішньої енергії системи; dA - робота, виконувана системою проти зовнішніх сил. Підставляючи в (3) із (1) $dQ = T dS$, отримаємо

$$T dS = dW + dA. \quad (4)$$

Розглянемо ще одну з характеристик системи - вільну енергію, яка визначається так:

$$F = W - T S. \quad (5)$$

Знайдемо диференціал від (5) і підставимо в нього значення dW :

$$dF = - S dT + dA. \quad (6)$$

Із (6) для ізотермічного процесу ($dT = 0$) впливає важливий висновок: робота, виконувана системою в ізотермічному процесі, дорівнює зміні вільної енергії системи. В ізотермічному процесі вся вільна енергія системи може бути використана для виконання роботи. Що ж стосується внутрішньої енергії системи, то із (5) впливає, що не вся внутрішня енергія системи в ізотермічному процесі може бути використана для виконання роботи, а тільки частина її за виключенням TS . За рахунок так званої зв'язаної енергії TS в ізотермічному процесі неможливо виконати роботу. В ізотермічному процесі ентропія виступає таким чином, як міра безкорисності частини внутрішньої енергії системи з точки зору виконання роботи.

В даній роботі розглядається система з двох тіл, нагрітий шматок металу при температурі T_1 і вода в калориметрі при температурі T_2 . Визначимо зміну ентропій цих тіл при зміні температури металу на dT .

Нехай маси та питомі теплоємності відповідно у тіл системи такі: m, c - у металу; m_1, c_1 - у води; m_2, c_2 - у калориметра. При зміні температури на dT метал віддає воді і калориметру кількість тепла $dQ = mcdT$, а вода і калориметр одержують кількість тепла $dQ' = (m_1 c_1 + m_2 c_2) dT'$. Елементарна зміна ентропії тіла $dS = dQ / T = m c dT / T$, води і калориметра $dS' = dQ' / T' = (m_1 c_1 + m_2 c_2) dT' / T'$, причому у виразах для dS і dS' використовуються значення температур відповідних тіл, при яких відбувається теплообмін у кожного тіла окремо.

Загальна зміна ентропії дорівнює, згідно з (2):

$$\Delta S = \int m c dT / T + \int (m_1 c_1 + m_2 c_2) dT' / T', \quad (7)$$

де інтегрування легко провести, якщо вважати, що при теплообміні не відбувається зміни мас і питомих теплоємностей тіл. В цьому випадку з під інтегралу можна винести відповідні множники, і після чого одержати

$$S = m c \int dT / T + (m_1 c_1 + m_2 c_2) \int dT' / T'. \quad (8)$$

Інтегрування в кожному доданку правої частини (8) проводиться у власних межах зміни температури: інтегрування в першому доданку проводиться від початкової температури металу T_1 до рівноважної T_0 , а інтегрування в другому – від початкової температури води та калориметра T_2 до рівноважної T_0 . Звичайно, можливими втратами системою теплоти будемо нехтувати. Табличний інтеграл $dx/x = d(\ln x)$, тому з (8) одержуємо остаточний вираз

$$\Delta S = m c \ln(T_0 / T_1) + (m_1 c_1 + m_2 c_2) \ln(T_0 / T_2), \quad (9)$$

за яким підраховується зміна ентропії при теплообміні нагрітого металу з водою і калориметром.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Налити воду в пароутворювач і ввімкнути його в мережу.
2. На технічних терезах визначити масу мідного тіла з точністю до 1 г.
3. Ввести тіло в нагрівач і зачинити його. Через отвір в кришці нагрівача вставити термометр.
4. Зважити калориметр і знайти m_2 .
5. Налити в калориметр води приблизно до $1/2$ висоти і знову зважити його. Різниця між масою калориметра з водою і масою порожнього калориметра дає масу води m_1 .
6. Коли температура в нагрівачі досягне 60-70 °С, визначити температуру води в калориметрі T_2 , нагрітого тіла T_1 в нагрівачі і швидко опустити нагріте тіло в калориметр з водою.
7. Повертаючи калориметр з підставкою з боку на бік і перемішуючи тим самим воду, домогтися встановлення рівноважної температури T_0 .
8. За даними експерименту визначити зміну ентропії ΔS системи за формулою (9), приймаючи табличні значення питомих теплоємностей.

Результати подати в таблицю:

Тіло	m	m ₁	m ₂	c	c ₁	c ₂	T ₁	T ₂	T ₀	ΔS

Завдання 2.

Зробити все, що вказано в завданні 1, для алюмінієвого тіла.

Дайте відповідь на запитання:

1. Збільшується чи зменшується ентропія у вивчених процесах?
2. Чому зміни ентропії для випадків нагрітих мідного і алюмінієвого тіл виявляються різними?

Лабораторна робота № 20.

Дослідження поверхневого натягу води.

Прилади та приладдя: вимірювальна установка, металеве кільце, штангенциркуль, різноваги, чашка Петрі, дистильована вода, розчини мила, цукру та кухонної солі.

Мета роботи: засвоїти один з методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини.

Коротка теорія та метод вимірювання

В поверхневому шарі будь-якої рідини товщиною близько 10^{-9} м діють незрівноважені сили молекулярного тиску, які призводять до появи сил поверхневого натягу. Сили молекулярного тиску в поверхневому шарі спрямовані перпендикулярно до поверхні рідини і стискають нижче розташовані шари. Поверхневий шар є своєрідною плівкою, що обтягує рідину і стискає її.

Для того, щоб розірвати поверхневу плівку рідини, потрібна деяка сила, спрямована по дотичній до поверхні рідини. Для характеристики індивідуальних властивостей різних рідин вводиться фізична величина (коефіцієнт поверхневого нааатягу), що чисельно дорівнює силі поверхневого натягу, діючій по дотичній до поверхні рідини, яка припадає на одиницю довжини контура, перпендикулярного до напрямку дії сили. Коефіцієнт поверхневого натягу (α) дорівнює:

$$\alpha = F / l. \quad (1)$$

Щоб довести, що α є індивідуальною характеристикою рідини, розглянемо детальніше стан молекул в поверхневому шарі рідини.

На відміну від молекул, що знаходяться всередині об'єму рідини, на молекули поверхневого шару діють сили з боку молекул, що наповнюють напівпростір з боку рідини. Рівнодіюча окремих сил спрямована по нормалі всередину рідини і втягує молекули поверхневого шару в об'єм рідини. На місце молекул, що залишили поверхню рідини, із об'єму рідини надходять інші молекули, але такі, енергія котрих в середньому більша за середню енергію

молекул всієї рідини. Отже, поверхневий шар рідини формується з молекул, повна енергія яких більша, ніж у молекул в об'ємі рідини. Поверхневий шар рідини має надлишкову енергію в порівнянні з будь-якими молекулами, виділеними в рідині.

При збільшенні поверхні рідини на ΔS її надлишкова поверхнева енергія підвищується на деяку величину ΔW , тому на збільшення поверхні на одну одиницю потрібна питома надлишкова поверхнева енергія

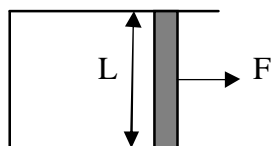


Рис. 1

Розглянемо роботу зовнішньої сили, що збільшує поверхню плівки рідини (рис. 1). Хай на дротяний каркас натягнуто мильну плівку. Правий бік каркасу рухомий. Подіємо на цю сторону силою F вздовж поверхні рідини в напрямку нормалі до сторони.

$$w = \Delta W / \Delta S. \quad (2)$$

Якщо переміщення вздовж напрямку дії сили дорівнює Δx , то сила виконує роботу, яка дорівнює добутковій величині F на Δx : $A = F \Delta x$. Силу F визначимо, згідно з (1), як αl , де l - довжина рухомої боковиці каркасу. Тоді виконана робота може бути подана як

$$A = \alpha l \Delta x. \quad (3)$$

Ця робота пішла на збільшення надлишкової поверхневої енергії рідини, яку, згідно з (2), можна подати як $W = w \Delta S$. Прирівнюючи останнє значення виразу з (3), одержимо

$$\alpha l \Delta x = w \Delta S,$$

звідки знаходимо

$$\alpha = w \Delta S / (l \Delta x) = w. \quad (4)$$

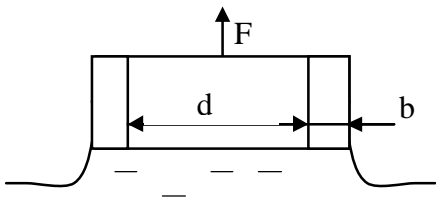
тому що $l \Delta x$ саме і є величина збільшення поверхні ΔS . Отже, коефіцієнт поверхневого натягу рідини чисельно дорівнює питомій поверхневій надлишковій енергії рідини. Енергетичні характеристики індивідуальні, вони залежить від складу рідини. Так, чиста вода має при кімнатній температурі коефіцієнт поверхневого натягу майже 0,07 Н/м. Додаток до води жирних кислот або мила значно знижує коефіцієнт поверхневого натягу. Такі домішки називають поверхнево активними речовинами.

Як зазначалось, силу поверхневого натягу можна виміряти, розриваючи поверхневий шар рідини. В даній роботі застосовується відрив кільця від змочуючої його рідини. При підйомі кільця з рідини разом з ним підіймається частина рідини. Якщо знехтувати вагою цієї рідини, то основне зусилля визначається силами поверхневого натягу. Згідно з рис. 2, сила поверхневого натягу, діюча на зовнішню поверхню кільця у відповідності з (1), дорівнює:

$$F = \alpha l = \alpha [\pi D + \pi (D - 2b)] = 2 \alpha \pi (D - b),$$

де b - товщина стінки кільця; D - зовнішній діаметр кільця.

За виміряною силою з останнього співвідношення знаходимо коефіцієнт поверхневого натягу:



Установка в даній роботі виключає необхідність зважування кільця, а застосовується для безпосереднього вимірювання сили F . Кільце підвішують на нежорстку пружину і підіймають

$$\alpha = F / 2\pi (D - b) \quad (5)$$

Рис.2

столік, на якому встановлюється посудина з досліджуваною рідиною. Після змочування нижнього краю кільця столик повільно опускають на шкалі реєструють його найбільше опускання в момент відриву кільця від рідини. Після цього навантажують чашечку над кільцем різновагами і домагаються того ж розтягування пружини, що і в момент відриву кільця від рідини. Вага різновагів при цьому дорівнює силі F .

Знайдене значення сили F використовують для обчислення коефіцієнта поверхневого натягу за (5).

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Ознайомитися з установкою. Виміряйте штангенциркулем зовнішній діаметр кільця D і його товщину b .

2. Налийте в чашку Петрі досліджувану рідину (воду) і поставте на предметний столик під кільце. Обертаючи ручку, підніміть столик до дотику кільця з рідиною, потім повільно опускайте столик і по верхньому зрізу кільця помітьте на шкалі його положення в момент відриву його від рідини.

3. Знявши фільтрувальним папером краплі, що прилипли до кільця, навантажте чашку кільця різновагами, домагаючись того ж положення, що і в момент відриву кільця від рідини.

4. За (5) обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу.

5. Виконайте дії за пунктами 2-4 ще двічі.

Результати вимірювань і розрахунків подати в таблиці; знайти довірчий інтервал визначення коефіцієнту поверхневого натягу для надійності 0,7:

№	D	b	F	α	$\Delta\alpha$
1					
2					
3					
Середні значення					

Завдання 2.

Додайте в дистильовану воду поверхнево активну речовину (етиловий спирт або розчин мила) і проробіть те, що вказано в завданні 1, та заповніть табл.2 аналогічно табл.1.

Дайте відповідь на запитання:

1. Від яких факторів залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
2. Чому поверхнево активні речовини зменшують коефіцієнт поверхневого натягу?
3. Чому коефіцієнт поверхневого натягу зменшується з підвищенням температури?
4. Чи існують умови, при яких зникає поверхневий натяг?

Лабораторна робота № 21.

Дослідження в'язкості рідини методом Стокса.

Прилади і приладдя: скляний циліндр на підставці з досліджуваною рідиною, мікрометр, дрібні кульки, пінцет, секундомір.

Мета роботи: засвоїти один із методів дослідження руху тіл у в'язкому середовищі.

Коротка теорія та метод вимірювань

Будь-яка рідина спричинює опір відносному переміщенню її шарів. Цю властивість, зумовлену зчепленням молекул рідини між собою, називають в'язкістю, або внутрішнім тертям.

Силу внутрішнього тертя визначає закон Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dl} S, \quad (1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості; S - площа шарів, що труться; $\frac{dv}{dl}$ - градієнт швидкості, тобто зміна швидкості v на одиницю довжини в напрямку найбільш швидкої зміни (вздовж нормалі до шарів що труться). З (1) можна впевнитися, що в системі коефіцієнт в'язкості вимірюється в кг/(м с).

В роботі для визначення коефіцієнта в'язкості застосовується метод падаючої кульки, запропонований Стоксом. Він ґрунтується на вимірюванні швидкості опускання важкої кульки. Стокс знайшов співвідношення, яке описує силу тертя, що його зазнає сферичне тіло при русі у в'язкому середовищі:

$$F = 6 \pi R \eta v, \quad (2)$$

де: R - радіус кульки, v - швидкість її руху.

Якщо важка кулька падає у в'язкій рідині, то поза силою тертя (2) на неї діє сила тяжіння P і виштовхувальна архімедівська сила F_A , що дорівнює вазі

рідини, витісненої кулькою. Якщо радіус кульки R , густина матеріалу кульки і рідини відповідно ρ_1 і ρ_2 , то вага кульки і сила Архімеда можуть бути подані як

$$P = 4 / 3 \pi R^3 \rho_1 g; \quad F_A = 4 / 3 \pi R^3 \rho_2 g \quad (3)$$

На початку руху кулька рухається рівноприскорено під дією сили $F' = P - F_A$, але внаслідок зростання швидкості кульки зростає і сила внутрішнього тертя, спрямована проти швидкості руху. Це приводить до того, що результуюча сила стає рівною нулю:

$$F' = P - F_A - F = 0, \quad (4)$$

де F - сила внутрішнього тертя (2). Встановлюється стала швидкість руху кульки, яку можна виміряти.

Підставляючи в (4) значення сил, одержуємо:

$$6 \pi R \eta v = 4 / 3 \pi R^3 (\rho_1 - \rho_2) g \quad (5)$$

Звідси з'являється розрахункова формула для визначення коефіцієнта в'язкості рідини:

$$\eta = \frac{2}{9} (\rho_1 - \rho_2) \frac{g R^2}{v} \quad (6)$$

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з інструкцією та методикою вимірювань.
2. Змінюючи положення кульки, виміряйте мікрометром її діаметр в трьох напрямках: d_1, d_2, d_3 , визначте середнє значення радіуса -
 $R = d/2 = (d_1 + d_2 + d_3) / 6$.
3. Опустіть кульку в рідину і за допомогою секундоміра виміряйте час t опускання кульки між двома помітками на циліндрі.
4. Виміряйте відстань між помітками l , розрахуйте швидкість опускання кульки $v = l / t$. За формулою (6) знайдіть значення коефіцієнта в'язкості η .
5. Для зменшення похибок повторіть виміри і розрахунки ще для двох кульок, знайдіть довірчий інтервал визначення η для надійності 0,7.
6. Результати вимірів та розрахунків дати в таблиці:

№	R	t	l	v	η	$\Delta\eta$
1						
2						
3						
Середні значення						

При розрахунках використовуйте значення густин: (ρ) свинцю – $11,4 \cdot 10^3$ кг/м³, сталі – $7,80 \cdot 10^3$ кг/м³ та гліцерину – $1,18 \cdot 10^3$ кг/м³.

Дайте відповіді на запитання:

1. Як залежить швидкість опускання кульки від її радіуса?
2. Який коефіцієнт в'язкості - води чи гліцерину – можна визначити точніше розглянутим методом? Чому?
3. Як залежить коефіцієнт в'язкості рідин від температури?

4. Де на практиці використовують відносно мале внутрішнє тертя рідин в порівнянні з тертям між поверхнями твердих тіл?

Лабораторна робота № 22.

Дослідження рідин малої в'язкості капілярним віскозиметром.

Прилади та приладдя: капілярний віскозиметр з краником, еталонна рідина – дистильована вода, досліджувана рідина, мірний циліндр, терези, склянка.

Мета роботи: засвоїти метод вивчення коефіцієнта внутрішнього тертя з допомогою віскозиметра.

Коротка теорія та метод вимірювання

Будь-яка рідина (або газ) мають властивість протидіяти відносному переміщенню її шарів. В газах ця властивість зумовлена переносом імпульсу хаотичним тепловим рухом молекул, а в рідинах - здебільшого зчепленням молекул, і називається ця властивість внутрішнім тертям, або в'язкістю рідини чи газу.

Сила внутрішнього тертя визначається законом Ньютона:

$$F = \eta \frac{dv}{dl} S, \quad (1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості; S - площа дотику шарів; $\frac{dv}{dl}$ - градієнт швидкості, тобто зміна відносної швидкості шарів на одиницю довжини в напрямку найбільшого її зростання (вздовж нормалі до S).

Наявність в'язкості є причиною того, що швидкість плинину рідини всередині труби круглого перерізу в різних точках поперечного перерізу виявляється різною і змінюється від $v = 0$ поблизу стінок труби до деякого максимального значення на осі труби.

Для труби кругового перерізу Пуазейль одержав співвідношення для “секундного” об'єму рідини, що витікає

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta l}, \quad (2)$$

де R - радіус труби; ΔP - перепад тисків на кінцях труби довжиною l ; η - коефіцієнт в'язкості.

В даній роботі рідина витікає із віскозиметра під дією власної віги, тому перепад тисків ΔP можна подати співвідношенням

$$\Delta P = \rho g h, \quad (3)$$

де ρ - густина рідини; h - висота рівня рідини над вихідним отвором. Якщо вихідний рівень h_0 стосується об'єму рідини V_0 у віскозиметрі, то рівень h стосується об'єму $V_0 - V$, де V - об'єм рідини, що вибігла. Позначаючи площу перерізу циліндричної частини віскозиметра через S , отримаємо $h = (V_0 - V) / S$, і тоді із (3) маємо:

$$\Delta P = \rho g (V_0 - V) / S, \quad (4)$$

Підставляючи (4) в (2) і інтегруючи одержану рівність, приходимо до співвідношення:

$$\ln (V_0 / (V_0 - V)) = \pi R^4 \rho g t / (8 \eta l S), \quad (5)$$

де відношення $V_0 / (V_0 - V) = h_0 / h$; h_0 - вихідний рівень рідини у віскозиметрі над випускним перетином капіляра; h - кінцевий рівень; t - час вибігання рідини. Враховуючи все сказане, можна знайти коефіцієнт в'язкості у вигляді:

$$\eta = \pi R^4 \rho g t / (8 \ln (h_0 / h) l S), \quad (6)$$

де R - радіус капіляра віскозиметра; l - довжина капіляра; S - площа поперечного перетину циліндричної частини капіляра віскозиметра.

Часто розрахунки за (6) приводять до незадовільних результатів через сильний вплив похибок вимірювань величин, що входять до нього. В зв'язку з цим застосовують так званий метод порівняння з еталонною рідиною. Віскозиметр наповнюють еталонною рідиною до рівня h_0 і випускають її під дією власної ваги, доки рівень не досягне h .

Помічають час витікання t_0 . При тих же значеннях h_0 і h для досліджуваної рідини помічають час витікання t . Записуючи двічі (6) для цих двох випадків і беручи відношення другого до першого, одержимо:

$$\eta / \eta_0 = t / t_0, \quad (7)$$

тому що всі величини, які характеризують установку, скорочуються. За співвідношенням (7) і відомою в'язкістю еталонної рідини знаходять в'язкість досліджуваної.

Порядок виконання роботи:

1. Наповнити капілярний віскозиметр, що складається з скляного мірного циліндра з краником і з'єданого з капіляром, еталонною рідиною – водою – до деякого рівня над нижнім перерізом капіляра.

2. Тричі виміряти час витікання t рідини з капіляра до рівня h , кожний раз вибираючи приблизно однаковий вихідний і кінцевий рівні рідини в віскозиметрі і повертаючи рідину у віскозиметр.

3. Звільнити віскозиметр від води, наповнити його досліджуваною рідиною до того ж рівня h_0 і виміряти час t_1 витікання рідини до рівня h . Повторити цю процедуру ще двічі, вибираючи кожен раз приблизно однакові значення h_0 і h .

4. Розрахувати значення коефіцієнта в'язкості води за формулою (5), знайти середні за трьома значеннями, довірчий інтервал при надійності 0,7. Порівняти одержане значення з табличним значенням $\eta = 1,05 \cdot 10^{-2}$ кг/(м с).

5. Розрахувати значення коефіцієнта в'язкості для досліджуваної рідини, знайти середнє за трьома значеннями, довірчий інтервал визначення середнього при надійності 0,7.

6. Вибрати дані для трьох пар однакових значень h_0 , h еталонної і досліджуваної рідини і за (7) знайти коефіцієнт в'язкості останньої, користуючись для еталонної рідини табличним значенням коефіцієнта в'язкості.

7. Порівняти всі одержані результати і зробити висновок про надійність прямого і непрямого методів вимірювань.

Данні вимірювань та розрахунків внести в таблицю:

Таблиця 1

№	t	h ₀	h	R	l	S	η ₀	Δη ²	t ₁	η	Δη ²
1											
2											
3											
Середні значення											

Дайте відповіді на запитання:

1. Як змінити вибіг рідини при збільшенні діаметра труби в 2 або 3 рази при сталих інших величинах?
2. Які переваги має метод порівняння перед прямим методом?

Лабораторна робота № 23.

Дослідження температурної залежності коефіцієнта поверхневого натягу.

Прилади та приладдя: колба з капілярною трубкою і термометром, аспіратор, манометр, металева посудина з рідиною і електродами, хімічна склянка.

Мета роботи: засвоїти метод Ребіндера дослідження поверхневого натягу рідини.

Коротка теорія і метод вимірювання

Установка складається з наповненого водою аспіратора, з'єданого Т-подібною трубкою з манометром і великою колбою. В колбу наливається досліджувана рідина так, щоб кінець капіляра торкався поверхні рідини. Коли з аспіратора витікає вода, то тиск повітря у великій колбі знижується, і при деякому його значенні Р під дією атмосферного тиску Р₀ через капіляр в рідину протискаються пухирці повітря. Різниця ΔР = Р₀ - Р, виміряна манометром, дорівнює тиску Р₁, зумовленим поверхневим натягом (глибина занурення капіляра невелика, тому гідростатичним тиском нехтуємо):

$$\Delta P = P_0 - P = P_1 \quad (1)$$

Для сферичної поверхні пухирця тиск Р₁ визначають за формулою Лапласа:

$$P_1 = 2\alpha / R, \quad (2)$$

де α - коефіцієнт поверхневого натягу рідини; R - радіус сферичної поверхні пухирця.

Тиск в пухирці максимальний при найменшому значенні радіуса сфери, що дорівнює радіусу капіляра R. З урахуванням цього з (1) і (2) одержуємо

$$\alpha = \Delta P R / 2. \quad (3)$$

Величина $k = R / 2$ є стала приладу, тому формулу (3) можна подати у вигляді

$$\alpha = k \Delta P \quad (4)$$

Знаючи для дистильованої води коефіцієнт поверхневого натягу при кімнатній температурі та визначивши при цій температурі ΔP , за (4) знаходять сталу приладу k, яку потім використовують в інших вимірюваннях.

Порядок виконання роботи:

1. Відкрити пробку аспілятора і наповнити його водою. При цьому рівні рідини в манометрі стають однаковими.

2. Закривши пробку аспілятора, відкривають його кран настільки, щоб зміна тиску відбувалась дуже повільно і можна було легко відлічити різницю висот рівнів у манометрі в момент відриву пухирця. Коли частота утворення пухирців на кінчику капіляра усталиться, здійснюють відлік за манометром ΔP (різниця рівнів), беручи до уваги, що тиск в 1 мм водяного стовпа дорівнює 9,8 Па. Одночасно з ΔP роблять відлік температури у великій колбі. За формулою (4) визначають k, користуючись табличним значенням α для води.

3. Ввімкнувши до мережі електронагрівач, повільно нагрівають воду і через кожні 5 с роблять відліки за манометром. Нагрівання великої колби доводять до 343-353 К.

4. За формулою (4) вираховують α для всіх вимірювань і будують залежність α від температури.

Результати вимірювань і розрахунків подати в таблиці:

T								
ΔP								
α								

Дайте відповіді на запитання:

1. Від яких факторів залежить α ?
2. Як залежить α від температури?
3. Чи існують умови, при яких зникає поверхневий натяг?
4. Чому пухирець під дією сил поверхневого натягу набуває сферичної форми?
5. Якою рідиною треба заповнювати манометр, щоб похибка вимірювань була мінімальною?

Лабораторна робота № 24.

Дослідження справедливості закону Дюлонга і Пті для хімічно простих

тіл.

Прилади та приладдя: пароутворювач, нагрівач, калориметр, два термометри, два досліджувані тверді тіла, технічні терези, різноваги.

Мета роботи: засвоїти один із методів дослідження теплоємності.

Коротка теорія і метод вимірювання

При не зовсім низьких температурах для твердих тіл справедливий закон Дюлонга і Пті, згідно з яким молярна теплоємність хімічно простих речовин в кристалічному стані дорівнює

$$C = 3R, \quad (1)$$

де R - універсальна газова стала.

Дюлонг і Пті встановили це співвідношенням дослідним шляхом, хоч воно може бути одержано на основі молекулярно-кінетичних уявлень у такий спосіб. Атоми твердого тіла при температурі далеко від абсолютного нуля здійснюють коливання відносно стійких положень рівноваги. При невеликих порівняно з міжатомними відстанями зміщеннях атомів з положень рівноваги на атом діє квазіпружна сила, пропорційна його величині:

$$f = -k x, \quad (2)$$

де k - коефіцієнт квазіпружної сили; x - зміщення.

Атом, що коливається, має потенціальну

$$w_{\text{п}} = k x^2 / 2 \quad (3)$$

і кінетичну енергію

$$w_{\text{к}} = m v^2 / 2, \quad (4)$$

так що повна енергія атома дорівнює

$$w = m v^2 / 2 + k x^2 / 2$$

Середнє значення за один період коливання (отже, і за багато більший проміжок часу) потенціальної енергії дорівнює середньому значенню кінетичної енергії; і згідно з теоремою про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності дорівнює:

$$\langle w_{\text{п}} \rangle = \langle w_{\text{к}} \rangle = k T / 2. \quad (5)$$

Колівання частинок в твердому тілі можна розкласти по трьох незалежних напрямках x, y, z , які зручно вибрати так, щоб коливання за ними відбулися з рівними ступенями імовірності. Тоді середнє значення повної енергії одного атома можна подати як

$$\langle w \rangle = \langle w_x \rangle + \langle w_y \rangle + \langle w_z \rangle. \quad (6)$$

Енергія одного моля хімічно простої речовини в такому випадку має бути поданою у такий спосіб:

$$W = w N = 3 k N T = 3 R T, \quad (7)$$

де N - стала Авогадро; R - універсальна газова стала.

Молярною теплоємністю речовини C називається кількість тепла, потрібного для нагрівання 1 моля речовини на 1К -

$$C = \Delta Q / \Delta T = \Delta W / \Delta T, \quad (8)$$

де вважається, що роботою розширення можна знехтувати. Підставляючи (7) в (8), одержуємо закон Дюлонга і Пті:

$$C = \Delta (3 R T) / \Delta T = 3R. \quad (9)$$

В даній роботі перевіряється справедливність закону Дюлонга і P_t для хімічно простих твердих тіл. Експериментально знаходяться питомі теплоємності міді і алюмінію, а потім обчислюються їх молярні теплоємності.

Питома теплоємність речовини c - це кількість тепла, потрібного для нагрівання 1 кг речовини на 1К. Тоді молярну теплоємність C можна зв'язати з питомою теплоємністю співвідношенням

$$C = \mu c, \quad (10)$$

де μ - молярна маса речовини.

Щоб визначити питому теплоємність твердого тіла, вимірюють його масу, нагрівають в спеціальному нагрівачі, опускають у воду і помічають початкову температуру калориметра з водою, температуру тіла і температуру калориметра після опускання в нього тіла і усталення кінцевої температури. Якщо маса досліджуваного тіла m , температура після нагрівання T_1 , то тіло при охолодженні віддало кількість тепла.

$$Q = m c (T_1 - T_0). \quad (11)$$

Ця кількість тепла тратиться на нагрівання води, калориметра при умові, що втратами тепла в навколишнє середовище можна знехтувати. Кількість тепла, що тратиться на нагрівання води в калориметрі, дорівнює:

$$Q_1 = (m_1 + \omega) c_1 (T_0 - T_2), \quad (12)$$

де m_1 - маса води в калориметрі; c_1 - питома теплоємність води; T_2 - температура води в калориметрі до опускання в нього нагрітого тіла; ω - водяний еквівалент установки, що вводиться як деяка маса води, яка поглинає таку ж кількість тепла, як калориметр, термометр і мішалка. У застосованій роботі установці $\omega = 0,018$ кг.

На основі закону збереження енергії випливають рівності (11) і (12), з яких одержуємо питому теплоємність:

$$c = \frac{Q_1}{m(T_1 - T_0)} \quad (13)$$

Порядок виконання роботи:

1. Налити воду в пароутворювач і ввімкнути його в мережу.
2. На технічних терезах визначити масу m одного із тіл з точністю до 0,1 г.
3. Почепити тіло на гачок, ввести його у нагрівач і закрити заслінку. Через отвір у кришці нагрівача вставити термометр.
4. Визначити з точністю до 0,1 г масу m_2 калориметра.
5. Налити воду в калориметр (приблизно $\frac{1}{2}$ його висоти) і знайти масу m_3 з водою. Різниця $m_1 = m_3 - m_2$ дає масу води. Поставити калориметр на обертовий столик.
6. Коли температура нагрівача T_1 досягне 40-60°C, виміряти температуру води в калориметрі T_2 , температуру нагрітого тіла T_1 , зняти кришку калориметра з термометром і негайно опустити нагріте тіло в калориметр з водою і накрити кришкою.
7. Повертаючи калориметр зі столиком і саме цим перемішуючи воду, домогтися встановлення рівноважної температури T_0 .

8. За даним експерименту визначити питому теплоємність c , користуючись (13).

9. За (10) обчислити молярну теплоємність C .

10. За (1) обчислити теоретичне значення C_T .

Результати вимірювань та обчислень подати в таблиці:

Речовина	m	m_1	m_2	c_1	T_1	T_2	T_0	w	c	C

Дайте відповіді на запитання:

1. Чим пояснити отриману різницю між теоретичним та експериментальним значеннями молярної теплоємності?

2. Які засоби використано у роботі з метою зменшення похибок при вимірюванні теплоємності?

3. Якою повинна бути молярна теплоємність хімічно складних тіл, наприклад солі $NaCl$?

ЕЛЕКТРИКА

Лабораторна робота № 25.

Вимірювання опору провідників містковою схемою.

Прилади та приладдя: калібровані опори (декади опорів), гальванометр, шунтуючий резистор з вимикачем, магазин опорів, джерело постійного струму (акумуляторна батарея), вимикач, вимірювальні опори.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання опорук із застосуванням схеми мосту постійного струму (міст Уїтстона).

Коротка теорія і метод вимірювань

Електричним струмом називається спрямований рух електричних зарядів. Необхідною умовою існування електричного струму є наявність напруги або різниці потенціалів на кінцях провідника. Напруга на даній ділянці кола дорівнює сумі різниці потенціалів і електрорушійної сили (ЕРС), що діє на даній ділянці кола. У відсутності останньої напруга співпадає з різницею потенціалів на кінцях ділянки кола.

Сила струму I , згідно з законом Ома, пропорційна напрузі U на даній ділянці кола і обернено пропорційна її опоріві R :

$$I = U / R. \quad (1)$$

Електричний опір провідника R зумовлений гальмуванням носіїв електрики за допомогою їх зіткнень з коливаннями іонів у кристалічній ґратці металу. Опір провідника R залежить від матеріалу провідника, від його довжини та площі поперечного перетину і температури.

Для визначення опору провідників існують методи, найточнішим із яких є міст постійного струму (місток Уїтстона). Принципова схема містка подана на рис.1. Вимірювальний опір R_X та три інших змінних опори (R_0 - магазин опорів, та R_1 , R_2 -калібрувальні опори) з'єд'юють так, що вони утворюють замкнутий чотирикутник $ACBD$. В одну діагональ чотирикутника увімкнено гальванометр (ця ділянка і є містком), а в іншу через вимикач - джерело постійного струму з ЕРС E . При замиканні кола гальванометр покаже наявність струму на ділянці CD . Проте можна підібрати опори R_0 , R_1 та R_2 такі, що потенціали точок C і D стануть рівними. Тоді струм в колі гальванометра відсутній (при замиканні ключа K стрілка гальванометра залишається на нульовій поділці). Оскільки у розгалужень AC і AD точка A спільна, а потенціали точок C і D однакові, то беручи до уваги, що в цих ділянках відсутні ЕРС, падіння напруг на них при цьому будуть, згідно з (1), однакові. Те ж саме справедливе і для розгалужень CB і DB :

$$I_0 R_0 = I_1 R_1; I_X R_X = I_2 R_2. \quad (2)$$

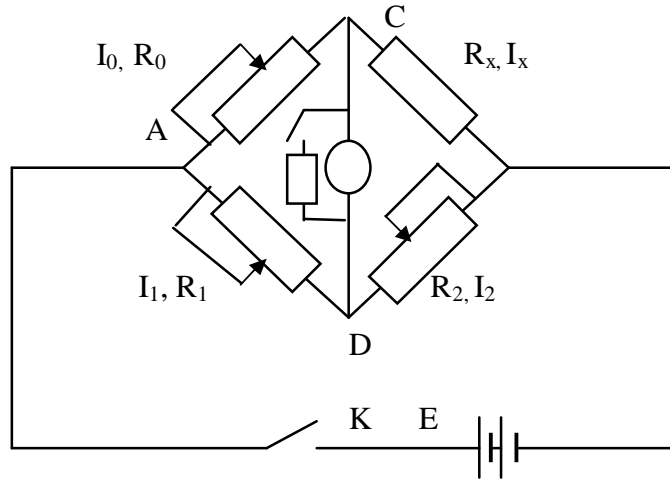


Рис. 1.

Оскільки в ділянці CD струм відсутній, то по ділянці CB іде такий же струм, як і по AC, а в розгалуженні DB, як і в AD, тобто $I_0 = I_x$, $I_1 = I_2$. Поділивши рівняння (2) і скорочуючи, згідно останнім співвідношенням для струмів, значення струмів, одержимо основне співвідношення зрівноваженого мостика:

$$R_0 / R_x = R_1 / R_2. \quad (3)$$

Звідки знаходимо шуканий опір R_x :

$$R_x = R_0 (R_2 / R_1) \quad (4)$$

Розглянутий метод можна застосовувати і для ланцюгів змінного струму. В розгалудженні AC можна розмістити, наприклад, замість R_0 еталонний конденсатор або індуктивність, а в розгалуженні CB - невідому ємність або індуктивність. Досягаючи зміною співвідношення R_1 / R_2 відсутності струму в містку CD, за відомим значенням еталонної величини можна знайти невідому.

В даній роботі в ролі опору R_0 виступає магазин опорів, в ролі опорів R_1 і R_2 - калібровані опори (декади).

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть електричне коло згідно зі схемою (рис.1). Замість опору R_x ввімкніть один з реостатів з невідомим опором R' або R'' .

2. Встановіть однакові значення калібрувальних опорів (декад) $R_1=R_2$. Замкнувши шунтуючий пристрій вимикачем K' , і коло батареї вимикачем K, підберіть опір R_0 в магазині так, щоб струм в гальванометрі зник, тобто стрілка гальванометра стояла на нульовій поділці. Розімкніть шунтуючий пристрій і доможіться відсутності струму у містку.

УВАГА! РОЗМИКАТИ ВИМИКАЧ ШУНТА ДОЗВОЛЯЄТЬСЯ ТІЛЬКИ ПІСЛЯ ГРУБОГО НАСТРОЮВАННЯ, ІНАКШЕ МОЖНА СПАЛИТИ ГАЛЬВАНОМЕТР.

3. Підставте значення опорів в (4) і знайдіть значення R' .

4. Замініть перший реостат R' на другий R'' і у відповідності з пунктами 1-3 визначте його опір.

5. Ввімкніть реостати R' і R'' спочатку послідовно, а потім – паралельно і виміряйте опори цих з'єднань згідно пп.1-3, одержуючи значення $R_{пс}$ і $R_{пр}$.

6. За відомими формулами $R_{пс} = R' + R''$ та $1/R_{пр} = 1/R' + 1/R''$ обчисліть опори послідовного і паралельного сполучення реостатів та занесіть значення їх до колонки R_x таблиці:

7. Одержані дослідним шляхом результати $R_{пс}$ і $R_{пр}$ співставте з розрахованими значеннями і визначте їх відхилення.

8. За допомогою омметра виміряйте R' і R'' і результати запишіть в таблицю. Всі дані вимірювань і розрахунків подайте в таблиці.

За вимірюваннями				За розрахунками	
R_1	R_2	R_0	R_x	R_x	ΔR_x

Дайте відповіді на запитання:

1. Чому опори металів збільшуються при нагріванні?
2. Від чого залежить точність вимірювань опору містковим методом?
3. Чи зміняться умови рівноваги, якщо джерело і гальванометр поміняти місцями?

Лабораторна робота № 26.

Дослідження потужності і ККД електродвигуна за допомогою стрічкового гальма.

Прилади і приладдя: електродвигун, стрічкове гальмо з динамометром, лічильник обертів, електросекундомір, вольтметр на 300 В, амперметр на 1А, штангенциркуль.

Мета роботи: засвоїти один із методів вимірювання характеристик електродвигуна.

Коротка теорія та метод вимірювань

Потужність електродвигуна може бути обчислена за формулою

$$P = A / t, \tag{1}$$

де

$$A = F S \tag{2}$$

- робота додання сили тертя F ; S - шлях, на якому діє сила тертя. Силу тертя F , що долається двигуном, можна знайти за різницею сил натягів F_1 і F_2 розгалужень гальмівної стрічки, які визначаються динамометром при натягу стрічкового гальма

$$F = F_1 - F_2 \tag{3}$$

Якщо радіус шків дорівнює r , число обертів двигуна є N , то шлях S знаходять за співвідношенням

$$S = 2\pi r N. \tag{4}$$

З урахуванням співвідношень (2) – (4) із (1) одержуємо потужність електродвигуна на валі:

$$P = 2\pi r N (F_2 - F_1) / t \quad (5)$$

Потужність споживаного струму визначається величиною сили струму в двигуні і напругою на ньому:

$$P = I U, \quad (6)$$

де I - сила струму, U - напруга на двигуні.

Коефіцієнт корисної дії знайдемо як відношення потужності двигуна на валі до потужності струму, що споживається:

$$\eta = P / P_T. \quad (7)$$

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть коло згідно зі схемою (рис.1). Виміряйте штангенциркулем радіус шківів r .

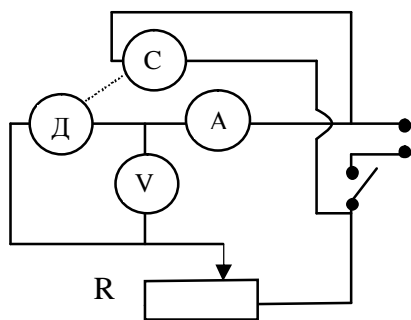


Рис. 1.

2. Закріпіть планку з динамометром в прорізі стояка таким чином, щоб динамометри давали рівні показання F'_1 і $F''_2 = 1\text{Н}$.

3. Увімкніть електродвигун. В результаті цього динамометри дадуть різні показання F_1 і F_2 . Запишіть їх в таблицю і визначте силу тертя $F = F_1 - F_2$.

4. Визначте за вольтметром і амперметром напругу U і силу споживаного струму I і занесіть результати відліків до таблиці.

5. Спостерігаючи за лічильником обертів, помітьте момент співпадання поділки шкали лічильника з 1000 або 2000 обертів, включіть секундомір, визначте його показання під час роботи двигуна та виключіть двигун.

6. Не вмикаючи двигуна, підніміть динамометри вище і збільшіть натяг стрічкового гальма на 0,5Н. Знову проведіть виміри.

7. Збільшуючи натяг стрічкового гальма через 0,5Н, повторіть дослід 4 рази. Результати дослідів занесіть до таблиці. За формулами (5) – (7) визначте шукані величини.

№	r	F'	t	N	I	U	P_T	F_1	F_2	F	P	η
1												
...												
5												

Дайте відповідь на запитання:

1. На якому явищі ґрунтується робота електродвигуна?
2. Яка частина електричної енергії йде на нагрівання обмотки?
3. Чому при надто великому навантаженні двигун може вийти з ладу?
4. Побудуйте за даними таблиці залежність ККД від потужності електродвигуна.

Лабораторна робота № 27.

Градуювання термоелемента.

Прилади та приладдя: термомпари, гальванометр, дві посудини з водою, електронагрівач.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання температури за допомогою термомпари.

Коротка теорія та метод вимірювань

Майже вільні електрони, що знаходяться у металі в стані хаотичного руху, утримуються всередині металу електричними силами. Для виходу електрона із металу треба затратити енергію і виконати за її рахунок роботу A , що зветься роботою виходу електрона із металу. Величина роботи виходу залежить від природи металу, а також його стану. При дотику двох різних металів електрони в результаті теплового руху переходять із одного металу в інший і зворотньо в різних кількостях. Кількість електронів, що перетинають межу розділу в одиницю часу, залежить від роботи виходу і концентрації електронів в одиниці об'єму - n .

У різних металів величини A і n різні, тому перехід електронів через контактний шар відбувається в більшій кількості від металу з меншою роботою виходу і з більшою концентрацією вільних електронів. При цьому провідник з надлишком електронів набуває негативного потенціалу, а інший, що втратив частину електронів, - позитивного. Виникаюче і зростаюче при цьому електричне поле сповільнює процес переходу електронів від одного металу до іншого і призводить до рівноважного стану, при якому потоки електронів в обох напрямках вирівнюються. Різниця потенціалів, що з'являється між металами, називається контактною різницею потенціалів. Величина її залежить від температури контакту.

Якщо укласти замкнуте коло із двох спаяних кінцями (рис.1) різнорідних металів L і M , яке називають термомпарою, то в місцях спаїв 1 і 2 виникнуть протилежні за знаком контактні різниці потенціалів. При однакових температурах спаїв ($T_1 - T_2$) сумарна різниця потенціалів дорівнює нулеві. А при наявності різниці температури сумарна різниця потенціалів відмінна від нуля. Нехай спай 1 витримується при температурі T_1 , а спай 2 – при T_2 і нехай $T_2 > T_1$. Позначимо контактну різницю потенціалів у спаях 1 і 2 відповідно V_1 і V_2 . Тоді, враховуючи протилежність V_1 і V_2 . сумарне падіння напруги в колі можна подати як

$$E = V_1 - V_2. \quad (1)$$

Подана співвідношенням (1) різниця потенціалів у даному випадку відмінна від нуля і носить назву термоелектрорушійної сили. Теоретичний розгляд явища термоелектрики в квантовій фізиці приводить до такого виразу для термоЕРС:

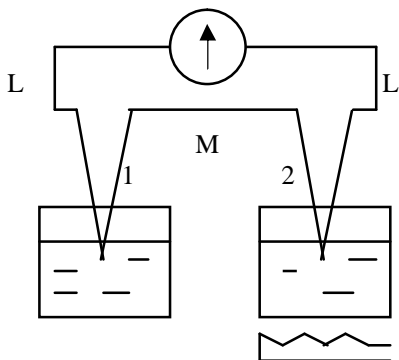


Рис.1

$$E = \alpha (T_1 - T_2) \quad (2)$$

де α - так званий коефіцієнт термоЕРС.

Співвідношення (2) справедливе для термоелементів у деякому інтервалі різниці температур, тому що величина α слабо залежить від температури.

У вузькому інтервалі температур можна знехтувати залежністю α від температури і вважати її сталою для даного термоелементу. В цьому випадку її звуть сталою термопар. Згідно з виразом (2) величина α визначається як термоЕРС, що виникає при різниці температур у 1 К. Тобто параметр α характеризує чутливість термоелемента до температури. При наявності термоЕРС в колі виникає термоелектричний струм I , величина якого визначається за законом Ома:

$$I = E / (R + r), \quad (3)$$

де R - зовнішній опір кола; r - опір термопар.

Як бачимо із (3), сила струму в гальванометрі пропорційна термоЕРС, а остання пропорційна різниці температур її спаїв. На цій залежності ґрунтується термоелектричний метод вимірювання температури. Для цього термоелемент має бути заздалегідь проградуєваним. Результати градуєвання зображують у вигляді графіка і у вигляді формули з відомим значенням α .

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть установку за схемою (рис.1). Перевірте рівність температур води в посудинах. При рівності температур стрілка гальванометра має стояти на нулевій.
2. Увімкніть електронагрівач однієї з посудин.
3. За відхиленням стрілки гальванометра визначить струм у колі (ціна поділки вказана на приладі). Повільно нагрівайте воду в посудині та через 2 К записуйте значення відповідних струмів. Температуру не підвищуйте понад 90°C.
4. Вимкніть електронагрівач і за формулою (3) визначте термоЕРС E для одержаних значень струму I . Опір термопар $r = 1,5$ Ом. Значення R позначено на гальванометрі.
5. На основі дослідних даних побудуйте графік залежності $E = f(\Delta T)$. За нахилом графіка визначте величину α згідно з (2) як кутовий коефіцієнт нахилу графіка до осі температур.

Результати вимірювань і розрахунків подайте в таблиці:

№	T_{1i}	T_{2i}	ΔT_i	I_i	E	α

Дайте відповіді на запитання:

1. Назвіть причини появи контактної різниці потенціалів.
2. Які переваги і недоліки мають термоелементи в порівнянні зі звичайними термометрами?
3. Назвіть можливі застосування термоелементів у техніці, біології, сільському господарстві.
4. Чому при однакових температурах спаїв термоЕРС в колі відсутня?

Лабораторна робота № 28.

Дослідження температурної залежності опору напівпровідників.

Прилади та приладдя: напівпровідникові термометри (термістори), магазин опорів, гальванометр, джерело струму, посудина з водою, термометр, електронагрівач.

Мета роботи: засвоїти метод вимірювання температури за допомогою термісторів.

Коротка теорія та метод вимірювання

За величиною електроопору всі речовини поділяються на три класи: провідники, напівпровідники та діелектрики. Для провідників характерна велика концентрація вільних носіїв заряду (електронів або іонів), тому у них електропровідність велика, а опір - малий. Питомий опір у металів звичайно має значення $10^{-8} - 10^{-7}$ Ом м.

На протилежність металам мала провідність (високий опір) діелектриків зумовлена надто малою концентрацією вільних носіїв заряду. Їх питомий опір надто великий і має величину, що знаходиться в межах $10^8 - 10^{18}$ Ом м.

Напівпровідники за питомим опором займають проміжне положення між металами і діелектриками. Питомий опір напівпровідників знаходиться в межах $10^8 - 10^{-7}$ Ом м. Різниця між провідниками та напівпровідниками не обмежується тільки величиною питомого опору. Напівпровідники мають різний характер провідності. Розрізняють власну та домішкову провідність напівпровідників. Характерні особливості власної та домішкової провідності напівпровідників ми розглянемо на прикладі кристала германію, який є типовим напівпровідником. Розглянемо три випадки.

1. Кристал германію не має домішок. В цьому випадку кожний атом германію зв'язаний з чотирма навколишніми атомами ковалентними зв'язками (рис.1а). Кожна риска на рисунку відповідає електрону, що утворює міжатомний зв'язок. Всі чотири валентних електрони атома германію беруть участь в утворенні хімічних зв'язків. У тепловому русі або під дією якого-небудь випромінювання уможливується відхід одного з валентних електронів "e" від зв'язку, в результаті чого утворюється носії струму – вільний електрон "e" і електронна вакансія "p", що одержала назву "дірки". Атом, поблизу якого є електронна вакансія, володіє незкомпенсованим елементарним зарядом, є позитивним іоном. Під дією електричного поля валентні

електрони із сусідніх зв'язків перестрибуючи один за одним проти поля, можуть заповнити вакансію, в результаті чого дірка зміщується за напрямком поля. При цьому по чергові позитивним іоном стають другий, третій і далші атоми. Насправді переміщуються електрони, проте складається враження, що у напрямку, протилежному напрямкові перескоків електронів, переміщується позитивний заряд разом з електронною вакансією. В зв'язку з цим дірку зручно розглядати як частку з масою, що дорівнює приблизно масі електрона, і позитивним елементарним зарядом. Крім розглянутого, існує ще й інший механізм переміщення заряду – вільні електрони переміщуються проти поля до зустрічі з діркою. Ця зустріч закінчується рекомбінацією (об'єднанням) електрона і дірки. У наступаючій рівновазі число вивільнених електронів дорівнює числу рекомбінованих. При підвищенні температури чи потужності падаючого на напівпровідник випромінювання число утворених вільних електронів і дірок зростає. В зв'язку з цим збільшується рівноважна концентрація носіїв струму, підвищується провідність та знижується опір напівпровідника. Провідність напівпровідника, що не містить домішок, має назву власної і складається з електронної та діркової складових.

2. Кристал германію містить домішку елементу, атоми якого мають валентність на одиницю більшу, ніж у Ge. Нехай це буде, наприклад, миш'як (рис. 1б - As). П'ятий валентний електрон атому As "e" не бере участі в утворенні зв'язків. При тепловому русі цей електрон значно легше відривається від атому As, ніж інші електрони. В результаті утворюється вільний електрон, що бере участь в провідності напівпровідника, і позитивний іон миш'яку, міцно закріплений в кристалічній ґратці і не спроможний брати участі у провідності. В розглянутому випадку носіями струму можуть бути тільки електрони. Провідність напівпровідника, зумовлена рухом електронів, носить назву електронної провідності, або провідності n-типу. З підвищенням температури концентрація домішкових носіїв струму швидко досягає насичення. В розглянутому випадку домішка називається донорною.

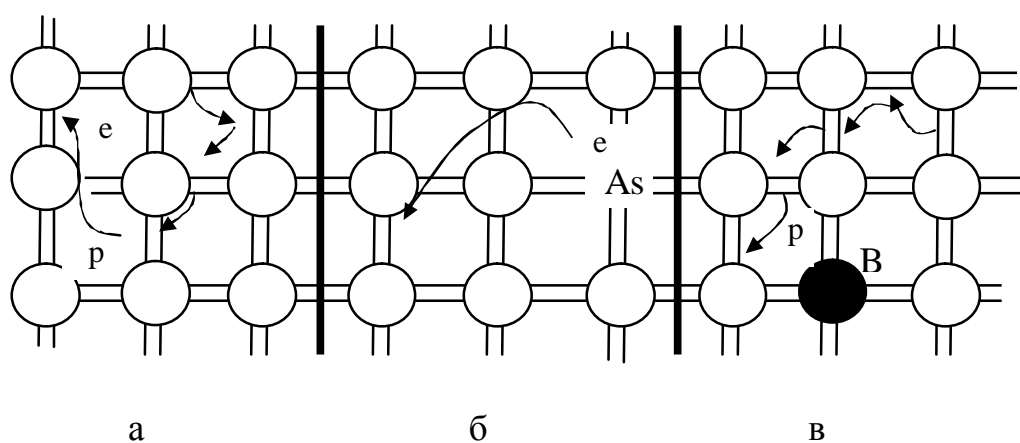


Рис. 1

3. В кристал Ge введена домішка, атоми якої мають валентність на одиницю меншу ніж атоми Ge. Нехай, наприклад, це будуть тривалентні атоми бору (рис. 1в - B). Для утворення хімічних зв'язків з навколишніми атомами германію атому бору не вистачає одного електрона. Електрон, що його не вистачає атому B, останній захоплює із зв'язку іншого атому Ge. В результаті утворюється негативно

заряджений іон бору, міцно зв'язаний з кристалічною ґраткою і неспроможний брати участі в провідності. Крім цього, утворюється рухома електронна вакансія “р” в зв'язках германію – дірка. Атом Ge, що лишився без електрона, намагається захопити електрон у сусіднього атома Ge, той у наступного і т.д. В результаті в напівпровідникові спостерігається провідність, що визначається наявністю дірок. Така провідність носить назву діркової провідності або провідності р-типу. З підвищенням температури концентрація дірок швидко досягає насичення. Розглянута домішка носить назву акцепторної домішки.

Отже, з підвищенням температури концентрація домішкових носіїв струму швидко досягає насичення, тобто практично вивільнюються всі електрони у донорної домішки або акцепторної домішки захоплюють електрони.

Зі зростанням температури починається відбиватися на загальній провідності власна провідність напівпровідника, так що при високих температурах провідність напівпровідника буде складатися із домішкової і власної. При низьких температурах переважає домішкова, а при високих – власна провідність.

Розглядання температурної залежності провідності у домішкового напівпровідника ускладнюється наявністю двох механізмів провідності - домішкової і власної. В разі ж механізма власної провідності залежність опору напівпровідника від температури може бути подана співвідношенням:

$$R = A \exp (\Delta W / (2 k T)), \quad (1)$$

де ΔW - ширина забороненої зони, в межах якої електрон не має певної енергії, k – стала Больцмана. Для переходу із зв'язаного стану у вільний електрону треба надати енергію, що дорівнює ΔW . Величина A в (1) залежить від природи напівпровідника і не залежить від температури.

Залежність опору напівпровідника від температури застосовується на практиці для вимірювання температури приладами, що зветься термісторами.

В даній роботі за даними вимірювань будується графік залежності $R=f(T)$, який згодом може бути використаний при вимірюванні температури термістором або налагодження систем автоматичного регулювання температури.

Для визначення ширини забороненої зони будується графік залежності

$$\ln R = f(1/T). \quad (2)$$

Із рівняння (1) витікає, що

$$\ln R = \Delta W / (2 k T) + \ln (A). \quad (3)$$

Графік функції (3) в координатах $(\ln R, 1/T)$ є пряма, кутовий коефіцієнт нахилу якої до осі $1/T$ визначається як

$$C = \Delta W / (2 k) \quad (4)$$

Співвідношення (4) являється вихідними для визначення ΔW .

В роботі використовується метод визначення опорів - метод містка постійного струму (рис.2) . Вимірюваний опір (термістор R) вмикається в одне із чотирьох плечей містка. Інші плечі містка зібрані із однакових опорів $R_1 = R_2$ та із магазину опорів R_M . Вимірювання полягає в підборі такого опору R_M , при якому відсутній струм в гальванометрі. При рівновазі містка опори в плечах містка задовольняють співвідношенню $R R_1 = R_M R_2$. Звідки:

$$R = (R_2 / R_1) R_M \quad (5)$$

При використанні в схемі $R_1=R_2$ одержуємо $R=R_M$. Отже, опір, установлений на магазині, дорівнює вимірюваному опоріві.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1.

1. Зберіть вимірювальну схему у відповідності з рис. 2. Заповніть посудину свіжою водою з крану.

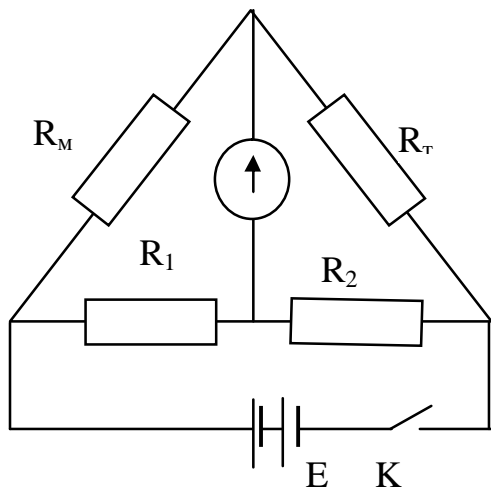


Рис. 2

2. Після перевірки схеми викладачем занурте термометр опору разом з скляною трубкою у воду. Підбирайте опір R_M так, щоб гальванометр вказував на нульове відхилення, виміряйте опір термістора. Запишіть показання термометра і відповідний опір $R = R_M$.
3. Повторюйте вимірювання до того моменту (через 1-3 хвилини), поки перестане змінюватись R - термістор набув температури води. Запишіть температуру і усталене значення R у таблицю.

4. Поставте посудину з водою на елетроплитку і розпочніть повільно нагрівати, час від часу вимикаючи плитку, доводячи температуру до $80 - 90^\circ\text{C}$ і вимірюючи опір R через кожні 2°C . Результати занести у таблицю:

$t^\circ\text{C}$										
R										
$1/T$										
$\ln R$										

5. За даними таблиці побудуйте графік залежності $R = f(T)$.

Завдання 2.

6. Побудуйте графік залежності (2), відкладаючи по осі абсцис значення $1/T$, а по осі ординат – значення $\ln R$.

ДОТРИМУЙТЕСЯ ПРАВИЛ ПОБУДОВИ ГРАФІКІВ!

7. За допомогою побудованого графіка визначить величину енергетичної щільності ΔW в - електрон-вольтах, приймаючи значення $k = 8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$.

Дайте відповіді на запитання:

1. Чому домішкові напівпровідники мають достатньо високу провідність навіть при низьких температурах?

2. Чи існує діркова провідність в напівпровідниках n – типу, електронна в напівпровідниках p-типу?

3. В яких випадках, відомих Вам з практики, застосовуються термістори?

Дослідження вольт-амперної характеристики селенового і германієвого випрямлячів.

Прилади та приладдя: селеновий стовпчик, германієвий діод, міліамперметр, вольтметр на 15В, потенціометр на 500 Ом, джерело напруги на 24В, двополюсний перемикач, однополюсний перемикач.

Мета роботи: засвоїти використання напівпровідникових випрямлячів.

Коротка теорія і метод вимірювань

При контакті електронного (n-типу) і діркового (р-типу) напівпровідників у відсутність зовнішнього електричного поля між ними виникає контактна різниця потенціалів (рис.). В результаті дифузії в зустрічних напрямках через граничний шар дірки і електрони рекомбінують один з одним. В зв'язку з цим р- n-перехід виявляється збідненим на носії струму і набуває великого опору. Збіднення р-напівпровідника на дірки і n-напівпровідника на електрони призводить до того, що перший (р-типу) в пограничному шарі набуває негативного заряду і перешкоджає зустрічному рухові електронів, а другий (n-типу) в такому ж шарі набуває позитивного заряду і в свою чергу перешкоджає зустрічному рухові дірок. Контактна різниця потенціалів, що утворилася, зв'язана з результуючим полем, що спрямоване так, як це показано на рис.1, а. При певному значенні запираючого поля E_z встановлюється рівновага, дифузійний струм припиняється.

Подано на р- n-перехід зовнішнє електричне поле E . Якщо поле E співпадає за напрямком з власним запираючим полем E_z (рис.1,б), то величина загального запираючого поля зростає, електрони і дірки ще більше віддаляються від області р-n-переходу, тим самим збільшуючи товщину шару. Різке зростання опору р-n-переходу призводить до того, що через перехід йтиме малий струм, котрий називається зворотнім струмом.

У другому випадку зовнішнє поле E спрямоване протилежно власному запираючому полю E_z (рис. 1, в). Під дією цього поля електрони в n-напівпровідникові і дірки в р-напівпровідникові будуть підштовхуватись до області контакту. Ширина запираючого шару зменшується, опір р-n-переходу різко падає, через перехід іде великий струм, що називється прямим струмом.

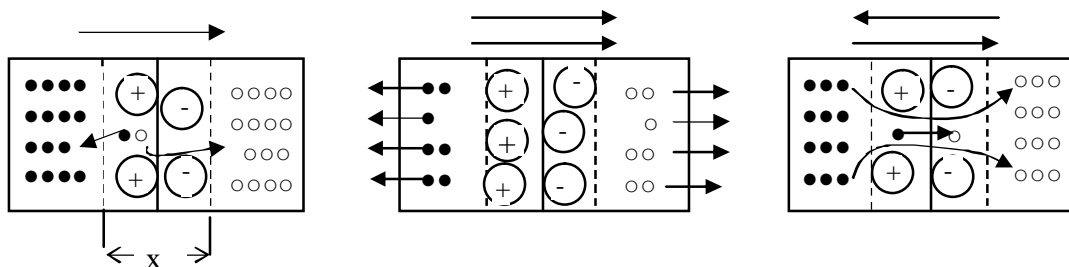


Рис.1а

Рис.1б

Рис.1в

В залежності від прикладеної напруги сила прямого та зворотного струму через перехід змінюється. Залежність сили струму від прикладеної напруги

називається вольт-амперною характеристикою. Типова вольт-амперна характеристика р-п-переходу подана на рис. 2.

Як бачимо, р-п-перехід має випрямляючу дію, що застосовується у випрямлячах змінного струму: селенових, германієвих, кремнієвих та ін. Пропускним напрямком є напрямок від діркового напівпровідника до електронного. Зворотній струм значно менший за прямий.

В даній роботі вивчається вольт-амперна характеристика селенового і германієвого випрямлячів. Для знімання вольт-амперної характеристики збирають схему, подану на рис.3. В коло по черзі вмикають або селеновий, або германієвий випрямляч В. Двополюсний перемикач П дає можливість змінювати напрямок струму через напівпровідник.

Вимірювати струм в цьому випадку треба за допомогою міліамперметра. При перемиканні П на клемі 3-4 через випрямляч іде зворотній струм. Він значно менший, за прямий, а виміряти його можна за допомогою мікроамперметра. Напругу U на випрямлячі змінюють за допомогою потенціометра R і вимірюють вольтметром V .

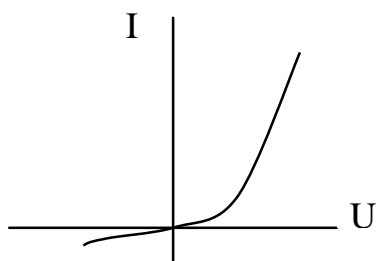


Рис.2

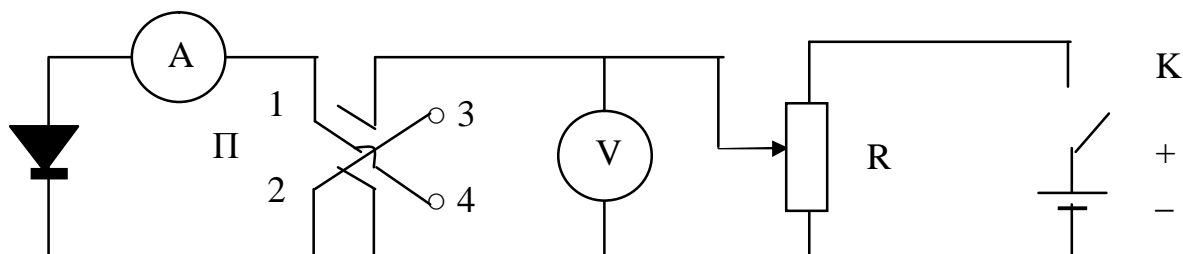


Рис.3

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть схему, подану на рис.3 з селеновим випрямлячем. В схему ввімкніть міліамперметр з границею 100 мА і вольтметр на 15 В.

2. Установіть рухомий контакт потенціометра в положення, що відповідає найменшій напрузі.

3. Після перевірки схеми викладачем замкніть перемикачі К і П (останній - в положення 1-2). Підвищуючи напругу за допомогою потенціометра, зніміть відліки струму при напругах: для селенового випрямляча – від 0 через 1 В і вище, для германієвого – від 0 через 0,1 В і вище. Величина верхньої границі визначається максимальним струмом 100 мА.

4. Перемикачі П в положення 3-4 і впевніться, що зворотній струм міліамперметром неможливо виміряти.

5. Розімкніть К і П, замініть випрямляч селеновий на германієвий. Вольтметр включіть на границю 1,5-3 В, перемикач П – в положення 1 – 2. Зніміть прямий струм для означених вище значень напруги.

6. Впевніться, що міліамперметром неможливо виміряти зворотній струм.

7. За даними вимірювань побудуйте графіки вольт-амперних характеристик. При цьому по осі абсцис відкладайте напругу, а по осі ординат – струми.

U(V)	0	2	4	5	6	7	8	9	10	11
Селеновий випрямляч										
I										
Германієвий випрямляч										
I										

Дайте відповіді на запитання:

1. Чому на контактi р- і n-напівпровідників виникає контактна різниця потенціалів?
2. Які переваги напівпровідникових діодів перед ламповими?
3. В яких пристроях застосовуються випрямлячі змінного струму?

Лабораторна робота №30.

Дослідження роботи двоелектродної вакуумної лампи.

Прилади та приладдя: вольтметр для вимірювання анодної напруги, міліамперметри для вимірювання струму розжарення катоду та анодного струму, потенціометр для регулювання анодної напруги, реостат для регулювання напруги розжарення, досліджувана двоелектродна лампа.

Мета роботи: вивчення закономірностей електричного струму у вакуумі і термоелектронної емісії на прикладі вакуумного діоду.

Коротка теорія і метод вимірювань

Робота вакуумних електронних ламп ґрунтується на явищі термоелектронної емісії – випусканні електронів з поверхні розжареного металу. Для виходу електрона із металу йому треба виконати роботу $A=e \cdot U$, де: e –заряд електрона, U - зовнішній скачок потенціалу на подвійному електричному шарі біля поверхні металу.

На явищі термоелектронної емісії ґрунтується дія різноманітних електронних приладів. Один із них – електронна вакуумна лампа – являє собою герметичний скляний або металевий балон, із якого відкачано повітря до вакууму, коли тиск відповідає 10^{-7} - мм. рт. ст. В балоні розміщуються електроди різної форми в залежності від конструкції лампи (рис.1). Один із електродів (катод) грає роль джерела електронів. Для інтенсивного випускання електронів катод розжарюється прямим або непрямым шляхом. При прямому розжаренні нитка катода виготовляється з тугоплавкого металу, і через нього пропускається струм від джерела розжарювальної напруги. При непрямому розжаренні струм пропускається через допоміжну нитку, яка розжарює катод без пропускання через нього струму.

Другий електрод в лампі зветься анодом. В тріоді, крім катода і анода, існує ще один електрод – керуюча сітка. Застосовують лампи і з більшою кількістю електродів: тетроди, пентоди і т.д. Діоди застосовують переважно для випрямлення змінного струму.

Розглянемо процеси, що відбуваються в діоді при створенні між катодом та анодом різниці потенціалів або анодної напруги. Під дією електричного поля електрони переміщуються в напрямку анода, і в лампі виникає анодний струм. Наявність просторового заряду електронної хмарки призводить до того, що при малому значенні напруги анодний струм може бути значно менше можливого значення струму емісії із катода, проте при підвищенні анодної напруги струм поступово збільшується. Залежність величини анодного струму від анодної напруги у двоелектродній лампі подається за законом Богуславського-Ленгмюра:

$$I = a U^{2/3}, \quad (1)$$

де a – стала, що залежить від форми та розмірів катода.

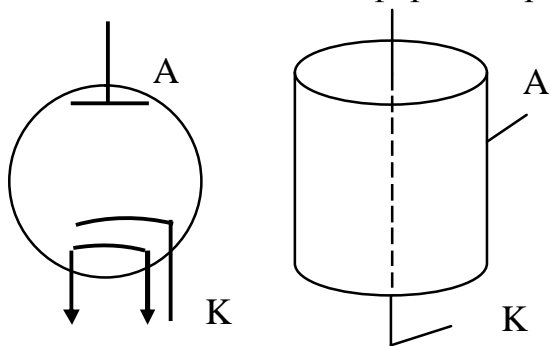


Рис.1

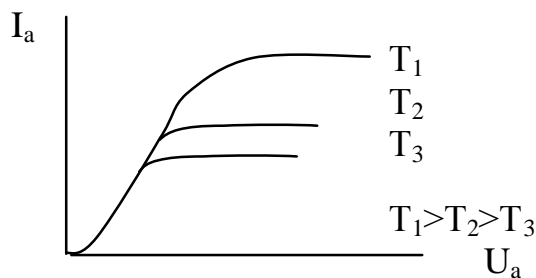


Рис.2

При досягненні певної напруги електронна хмарка біля катода повністю розсмоктується, і всі електрони, випущені катодом в одиницю часу, долітають до анода. Струм досягає максимального значення, і подальше збільшення анодної напруги не збільшує його. Це граничне значення анодного струму зветься струмом насичення. Величина струму при термоелектронній емісії визначається співвідношенням Річардсона-Дешмена :

$$I = B T^2 \exp(-A / (k T)), \quad (2)$$

де T - абсолютна температура катода; A – робота виходу електрона із металу; k - стала Больцмана; B - стала.

Катоди багатьох електронних ламп покривають шаром окисів барію або торію. Такі окисовані катоди мають меншу роботу виходу і дозволяють одержувати велику електронну емісію вже при температурах 600-800°C. Залежність анодного струму від анодної напруги – вольт-амперні характеристики – для різних температур розжарення катода подані на рис. 2.

Порядок виконання роботи:

Завдання 1. Побудова вольт-амперної характеристики діода.

1. Зберіть вимірювальне коло по схемі рис. 3.

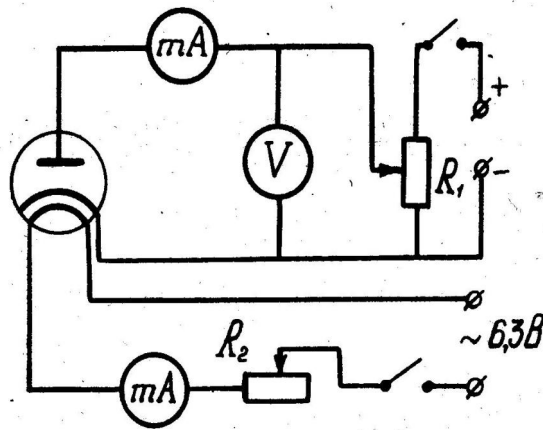


Рис. 3.

2. Після перевірки схеми викладачем замкніть кола анодної напруги і напруги розжарення.

3. За допомогою реостату R_2 встановіть струм розжарення катода $I_H = 180$ мА і підтримуйте його сталим в наступних вимірюваннях.

4. Протягом 5-10 хв. лампа має прогрітися, потім потенціометром змінюйте напругу на аноді через 1,5 – 2,0 В у межах від 0 до 25 В, вимірюючи при цьому анодний струм I_a . Одержані значення U_a і I_a занесіть до табл. 1 і за цими даними побудуйте графік залежності $I_a = f(U_a)$. На графікові мають бути нанесені що найменше 10 точок. Одержали вольт-амперну характеристику діоду.

5. Повторіть дослід при значеннях струму розжарення у 210 та 240 мА і побудуйте графік залежності $I_a = f(U_a)$ на тих же осях, що і для струму розжарення в 180 мА.

6. Закінчивши вимірювання, розімкніть коло.

Таблиця 1

$I_H, \text{ мА}$	180	U_a	0	2,0	4,0	6,0	...	25
		I_a						
	210	U_a	0					
		I_a						
	240	U_a	0					
		I_a						

Завдання 2. Отримання температурної (емісійної) характеристики діода.

1. Потенціометром R_1 встановіть величину анодної напруги $U_a = 15,0$ В і підтримуйте його сталим під час всього досліді.

2. Потенціометром R_2 встановіть струм розжарення 180 мА і виміряйте величину анодного струму.

3. Підтримуючи анодну напругу сталою, змінюйте струм розжарення I_H від 180 до 300 мА через кожні 15-20 мА і для кожного I_H виміряйте анодний струм. Одержані значення I_a і I_H занесіть до табл.2. За даними таблиці побудуйте графік залежності анодного струму від струму розжарення $I_a = f(I_H)$ - емісійну характеристику діоду.

4. Повторіть дослід при $U_a = 12,0$ і $9,0$ В. За результатами вимірювань побудуйте графік $I_a = f(I_H)$ на тих же осях, що й при анодній напрузі 15,0 В.

$U_a, \text{В}$	15,0	I_H	180	185	210	225	...	300
		I_a						
	12,0	I_H	180	185	210	225	...	300
		I_a						
	9,0	I_H	180	185	210	225	...	300
		I_a						

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке робота виходу і від чого вона залежить?
2. Намалюйте вольт-амперну характеристику діода і поясніть форму цієї кривої.
3. У який спосіб на основі вимірювань струму в діоді можна визначити роботу виходу електронів із металічної нитки катода?

Лабораторна робота № 31.

Дослідження транзистора типу МП-40, увімкненого за схемою зі спільним емітером.

Прилади та приладдя: установка для дослідження транзисторів, транзистор типу МП-40, джерело живлення на 3 і на 10 В.

Мета роботи: дослідження роботи транзистора, увімкненого за схемою з загальним емітером у статичному режимі.

Коротка теорія і методика вимірювань

Транзистор – триелектродний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючі електронно-діркові переходи. В транзисторі за типом провідності чергуються три області напівпровідника: р-п-р або п-р-п. Принцип роботи їх однаковий.

Розглянемо транзистор типу р-п-р (рис. 1). На схемі: 1 – емітерний р-п перехід; 2 – колекторний п-р перехід; Б – омичний контакт. Площа колекторного переходу S_k значно більша за площу емітерного переходу S_e . Товщина бази складає від часток до кількох десятків мікрометрів. Концентрація домішок в базі невелика і значно менша за їх концентрацію в областях колектора і емітера.

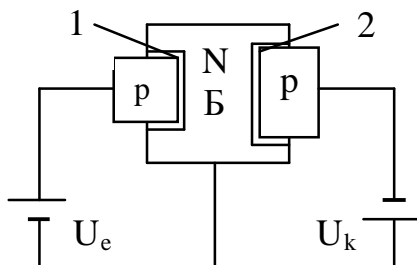


Рис.1

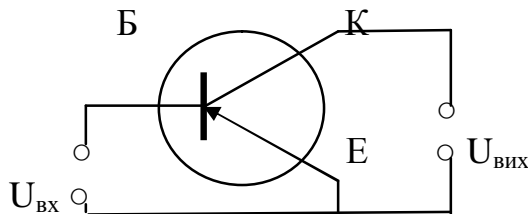


Рис.2

При вмиканні джерела напруги емітерного переходу U_e (джерело U_k вимкнене) в область бази з боку емітера інжектуються дірки, які порушують електричну нейтральність бази, в результаті чого потенціал бази зростає. Це сприяє притоку електронів із зовнішнього кола, які нейтралізують позитивний заряд бази,

зумовлений притоком дірок з боку емітера. В колі бази тече струм бази I_B , приблизно однаковий зі струмом емітера I_e - відкритий емітерний контакт.

При одночасному ввімкненні джерела U_e і U_k картина суттєво змінюється. Дірки, що ввійшли до бази з боку емітера, спрямовуються до колекторного переходу, тому що поле для них є прискорюючим. Втягуючись полем колекторного переходу в область колектора, дірки зумовлюють колекторний струм, рекомбінуючи з електронами, що прийшли в область колектора із зовнішнього колекторного кола. Частка дірок (приблизно 0,1%) рекомбінують у базі, що сприяє притоку електронів із зовнішнього кола бази і визначає струм I_B . Отже, струм емітера дорівнює:

$$I_e = I_k + I_B. \quad (1)$$

В загальному випадку рівність (1) може бути подана інакше:

$$I_B = \alpha I_e. \quad (2)$$

Коефіцієнт $\alpha < 1$ називається коефіцієнтом передачі струму бази. Крім того, у колі колектора протікає зворотний струм колектора I_{ko} , співпадаючий за напрямком зі струмом I_k . Таким чином, остаточно одержуємо

$$I_k = \alpha I_e + I_{ko}. \quad (3)$$

Розрізняють три схеми вмикання транзистора: зі спільною базою (СБ), зі спільним колектором (СК) і зі спільним емітером (СЕ). Найбільш поширеною є схема зі спільним емітером (рис. 2), яка й досліджується в даній роботі. В цій схемі спільною точкою вхідного та вихідного кола є емітер, що й зумовило назву схеми. Основним параметром схеми є коефіцієнт підсилення струму β , який визначається співвідношенням

$$\beta = I_k / I_B = I_k / (I_e - I_k) = \alpha / (1 - \alpha), \quad (4)$$

де $\alpha = I_k / I_e$ визначено співвідношенням (2). Крім коефіцієнта передачі струму, для розрахунків схем на транзисторах треба мати статичні характеристики. Статичною вхідною характеристикою є залежність струму бази I_B від напруги між базою та емітером при сталій напрузі між колектором та емітером, тобто $I_B = f(U_{вх})$ при $U_{вх} = \text{const}$. Типовий вигляд цих характеристик при різних напругах $U_{вх} = 0, 2, 5, 8$ В показано на рис.3. Статичною вихідною характеристикою схеми є залежність струму колектора I_k від напруги між колектором та емітером $U_{вих}$ при сталому струмі бази, тобто $I_k = f(U_{вих})$ при $I_B = \text{const}$. Вигляд цих характеристик подано на рис. 3 для різних струмів $I_B = 0, 20, 40, 60, 80$ мкВ.

Порядок виконання роботи:

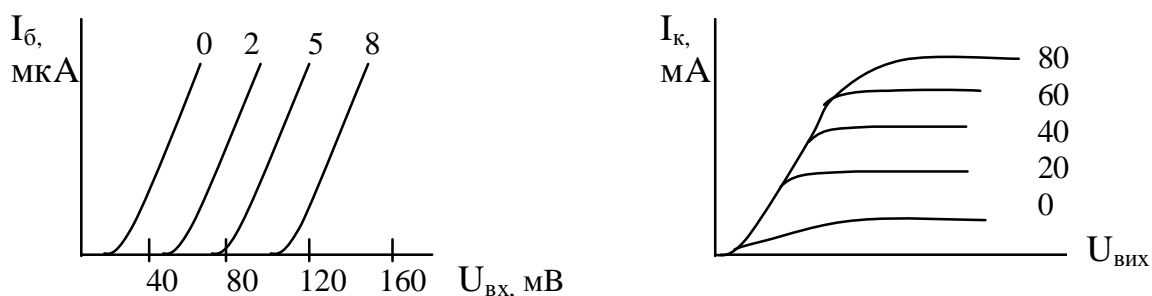


Рис.3

1. Ознайомтеся з установкою. Зберіть коло досліджень згідно зі схемою (Рис. 4) і отримайте дозвіл викладача на виконання вимірювань.

2. Зніміть експериментальні дані для побудови статичної вхідної характеристики $I_6 = f(U_{BX})$ при $U_{ВИХ} = 0$. Для цього потенціометри R_1 і R_2 виведіть в крайнє положення, щоб $U_1 = U_2 = 0$. Зробіть перший відлік струму бази I_6 за мікроамперметром мкА. Залишаючи $U_2 = 0$, змінійте за допомогою потенціометра R_1 напругу між емітером та базою транзистора $U_1 = U_{BX}$, згідно з табл.1, і записуйте величину струму бази за показаннями мікроамперметра. Одержані значення струму бази занесіть до табл. 1.

3. Одержіть експериментальні дані для побудови статичної вхідної характеристики $I_6 = f(U_{BX})$ при $U_{ВИХ} = 5$ В. Для цього потенціометр R_1 виведіть в крайнє положення $U_1 = U_{BX} = 0$, і за допомогою потенціометра R_2 установіть напругу між емітером та колектором $U_{ВИХ} = U_2 = 5$ В.

Змінюючи потенціометром R_1 напругу між базою та емітером, згідно з табл. 1, зробіть відлік струму бази за мікроамперметром.

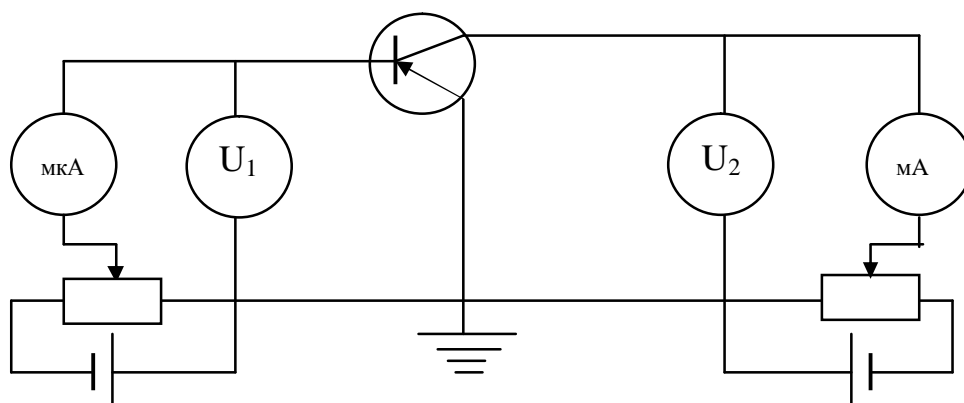


Рис.4.

Дані експерименту занесіть до таблиці 1.

Таблиця 1.

	$U_{BX} = U_1$ (мВ)	0	40	80	120	160	200	240
$U_{ВИХ} = U_2 = 0$ В	I_6 , мкА							
$U_{ВИХ} = U_2 = 5$ В	I_6 , мкА							

4. На міліметровому папері побудуйте дві статичні характеристики $I_6 = f(U_{BX})$ при $U_{ВИХ} = 0$ та $U_{ВИХ} = 5$ В.

Завдання 2.

5. Отримайте експериментальні дані для побудови сімейства статичних вихідних характеристик $I_K = f(U_{ВИХ})$ при $I_6 = \text{const}$. З цією метою встановіть почергово $I_6 = 50, 200, 300$ мкА, у відповідності з табл. 2 змінійте потенціометром R_2 напругу між колектором і емітером $U_{ВИХ} = U_2$ і робіть відліки колекторного струму I_K за міліамперметром.

Одержані значення струму колектора занесіть до табл. 2.

Таблиця 2.

	$U_{ВИХ} = U_2$ (В)	0	1	2	3	4	5	6
$I_6 = 50$ мкА	I_K , мА							
$I_6 = 200$ мкА	I_K , мА							
$I_6 = 300$ мкА	I_K , мА							

6. За експериментальними даними табл. 2 побудуйте на міліметровому папері сімейство статичних вихідних характеристик.

Дайте відповіді на запитання:

1. Що називають транзистором?
2. Який вигляд мають статичні вхідні та вихідні характеристики?
3. Як працює транзистор р-п-р-типу?

Лабораторна робота № 32.

Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля

Землі.

Прилади та приладдя: тангенс-гальванометр, міліамперметр на 25 мА, джерело постійного струму, двополюсний перемикач, масштабна лінійка, реостат на 200 Ом.

Мета роботи: засвоїти один з методів вимірювання напруженості магнітного поля.

Коротка теорія та метод вимірювань

Земля являє собою величезний магніт, полюси якого розміщені біля географічних полюсів: біля північного географічного – південний магнітний полюс S, а біля південного географічного – північний магнітний полюс N. Силкові лінії магнітного поля Землі поблизу екватора спрямовані горизонтально, а біля магнітних полюсів їх напрямок майже вертикальний. В інших точках земної поверхні вони йдуть під деяким кутом до горизонту. Вектор напруженості магнітного поля в довільній точці спрямований по дотичній до силової лінії. Величину проекції напруженості земного магнітного поля H_z на горизонтальну площину називають горизонтальною складовою напруженості магнітного поля Землі H . Напрямок цієї складової приймається за спрямованість магнітного меридіану, а вертикальна площина, що проходить через нього, називається площиною магнітного меридіану. Ще зовсім недавно вважали, що точне значення величин, що характеризують магнітне поле Землі, необхідне тільки в практиці водіння кораблів. Проте дослідження останніх років довели, що магнітне поле Землі впливає і на живі організми. Тому вміння визначити магнітне поле Землі стає необхідним і при розв'язанні практичних задач біологічних наук.

В даній роботі проводиться вимірювання тільки горизонтальної складової напруженості поля Землі із застосуванням тангенс-гальванометра. Тангенс-

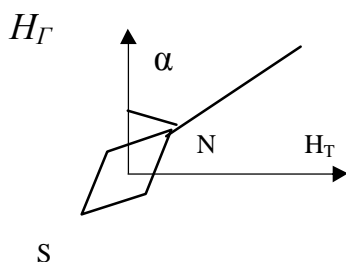


Рис. 1

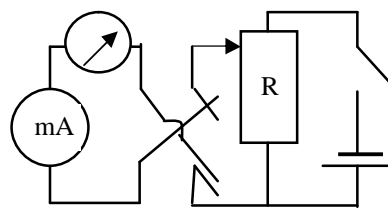


Рис. 2

гальванометр являє собою плоску вертикальну котушку радіусом r з відомим числом витків $n=180$. В центрі котушки в горизонтальній площині розміщено компас. Магнітна стрілка компасу у відсутність струму в котушці встановлюється по магнітному меридіану, тому що на неї діє тільки сила магнітного поля Землі. Поворотом котушки навколо вертикальної осі можна добитись суміщення площин котушки і магнітного меридіану. Якщо в цьому положенні котушки пропускати через неї постійний струм, то її магнітне поле, згідно з правилом правого свердлика, буде перпендикулярним до магнітного поля Землі і складеться з ним. Стрілка повернеться на деякий кут α . На магнітну стрілку діє два взаємно перпендикулярних поля, а отже, і дві сили, що відповідні горизонтальній складовій напруженості поля Землі H та магнітному полю котушки зі струмом H_T , як це показано на рис.1. Під дією цих полів магнітна стрілка встановиться за напрямком їх рівнодіючої.

Із рис.1 впливає, що $\text{tg } \alpha = H_T / H$, або

$$H = H_T / \text{tg } \alpha . \quad (1)$$

Величина напруженості магнітного поля, створюваного в центрі колового витка зі струмом, обчислюється за співвідношенням, яке впливає із закону Біо-Савара-Лапласа: $H'_T = I / 2r$, де I - сила струму у виткові (ампери); r - радіус витка (метри) . Котушка має n витків, тому напруженість її поля в n разів більша

$$H_T = H'_T n = I n / 2r . \quad (2)$$

Підставивши значення H_T із (2) в (1), одержимо робочу формулу

$$H = I n / 2r \text{tg} \alpha . \quad (3)$$

Напруженість магнітного поля в системі СІ вимірюється в амперах на метр (А/м).

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть електричне коло за схемою (рис.2). При цьому тангенс-гальванометр встановлюйте якомога далі від інших приладів та феромагнітних матеріалів, щоб уникнути їх впливу на магнітну стрілку.
2. Повертаючи тангенс-гальванометр, встановіть площину котушки в площині магнітного меридіану. Повертаючи шкалу компасу сумістіть її нульову поділку з північним кінцем полюсу стрілки.
3. Встановіть повзунок потенціометра в положення, що відповідає мінімальній напрузі, яка знімається з нього. Переміщуючи повзунок потенціометра в бік збільшення напруги, підберіть такий струм у котушці, щоб відхилення магнітної стрілки було не менше 10-20°. Коли стрілка компасу прийде в рівновагу, відлікуйте по шкалі кут відхилення стрілки α_1 і запишіть силу струму I .
4. Зберігаючи силу струму I , змініть перемикачем його напрямок на протилежний і виміряйте величину відхилення стрілки в протилежний бік (α_2). За кутами α_1 і α_2 знайдіть середнє значення кута відхилення α .
- 5 Змініть положення повзунка на потенціометрі в бік збільшення напруги і виміряйте відхилення стрілки при двох збільшених значеннях струму у котушці.
6. Виміряйте міліметровою лінійкою середній радіус витків котушки r .
7. Підставляючи послідовно середні значення α і I в формулу (3), знайдіть три значення H .

Результати вимірювань і розрахунків подайте в табл.1 і знайдіть похибки вимірювань.

У звіті наведіть зразок розрахунків.

Таблиця 1.

№	I	α_1	α_2	$\text{tg } \alpha$	H_i	ΔH_i	ΔH_i^2
Середні значення							

Дайте відповіді на запитання :

1. Які властивості магнітного поля Землі?
2. Які Вам відомі гіпотези про походження магнітного поля Землі?
3. Чому магнітна стрілка тангенс-гальванометра має малі розміри?
4. Чому вимірювання найліпше проводити при кутах відхилення, близьких до 45° ?

Лабораторна робота № 33.

Вивчення роботи трансформатора.

Прилади та приладдя: досліджуваний трансформатор, амперметри до 1 А та до 5 А, вольтметри до 250 В та до 15 В, реостат, вимикач.

Мета роботи: засвоїти метод визначення коефіцієнта трансформації в залежності від навантаження трансформатора.

Коротка теорія та методика вимірювань

Трансформатор являє собою залізне чи феритове осердя, на якому намотані дві обмотки з різним числом витків N_1 і N_2 . Якщо на одну з них - первинну – подати змінну напругу:

$$U_1 = U_{01} \cos \omega t, \quad (1)$$

то в ній потече змінний струм, в осерді виникне магнітне поле, що створює змінний магнітний потік Φ . Згідно з законом Фарадея у другій - вторинній - обмотці з'являється ЕРС взаємоіндукції, на виході вторинної обмотки виникає напруга U_2 , що змінюється з тою ж частотою, але в протилежній фазі до прикладеної

$$U_2 = U_{01} \cos (\omega t - \pi). \quad (2)$$

Вторинна обмотка може бути застосована як джерело змінного струму з напругою, що відрізняється від поданої на первинну обмотку. Отже, трансформатор є перетворювачем напруги. Теорія трансформатора надто громіздка, але основні кількісні співвідношення можна одержати на простій основі.

Нехай на первинну обмотку подана змінна напруга U_1 , а вторинна обмотка розімкнута. Впливом вторинної обмотки на первинну в цьому випадку ми можемо знехтувати. Якщо знехтувати також тепловими втратами енергії в первинній обмотці, то за другим законом Кірхгофа в первинній обмотці сума напруг дорівнювати нулю, тобто виникаюча в ній ЕРС дорівнює за модулем і протилежна за фазою підведеної напрузі. З урахуванням закону Фарадея ЕРС індукції для первинної обмотки запишеться у вигляді

$$U_1 = - N_1 d\Phi / dt,$$

(3) де Φ – магнітний потік у магнітопроводі, який пропорційний струмові I_1 первинній обмотці. Цей же магнітний потік пронизує витки вторинної обмотки. Отже, там виникає ЕРС індукції, яка при розімкненій вторинній обмотці дорівнює напрузі на її клеммах

$$U_2 = - N_2 d\Phi / dt. \quad (4)$$

Поділивши рівність (3) на (4), визначимо коефіцієнт трансформації як відношення напруги на первинній обмотці до напруги на вторинній обмотці:

$$k = U_1 / U_2 = N_1 / N_2, \quad (5)$$

тобто він пропорційний відношенню чисел витків в обмотках.

Трансформатори можуть діяти як понижувальні ($U_2 < U_1$), так і як підвищувальні ($U_2 > U_1$) напругу. В понижувальному трансформаторі первинною обмоткою є обмотка з більшим числом витків, а вторинна обмотка має менше число витків.

Якщо первинна обмотка вмикається до промислової мережі, то при навантаженій вторинній обмотці напруга на первинній обмотці залишається незмінною, тоді як напруга на вторинній обмотці буде змінюватися в залежності від величини навантаження. При збільшенні струму через вторинну обмотку величина навантаження зростає, а напруга, вимірювана на її виході, буде зменшуватись у зв'язку з ростом падіння напруги на внутрішньому опорі обмотки. Отже, в співвідношенні (5) величина U_1 залишається незмінною, тоді як U_2 зменшується. В зв'язку з цим коефіцієнт трансформації, що визначається відношенням U_1/U_2 , буде зростати зі збільшенням навантаження трансформатора.

В даній роботі вивчається знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації близько 40. Індуктивність вторинної обмотки невелика, зсувом фаз між струмом і напругою в ній можна знехтувати. У зв'язку з цим потужність, споживану вторинним колом, можна подати як

$$P_2 = U_2 I_2, \quad (6)$$

де I_2 - сила струму у вторинній обмотці; U_2 - напруга на її виході. Змінюючи величину навантаження P , можна прослідкувати за зміною коефіцієнта трансформації k .

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть коло згідно зі схемою (рис.1) і одержіть дозвіл викладача на виконання вимірювань.

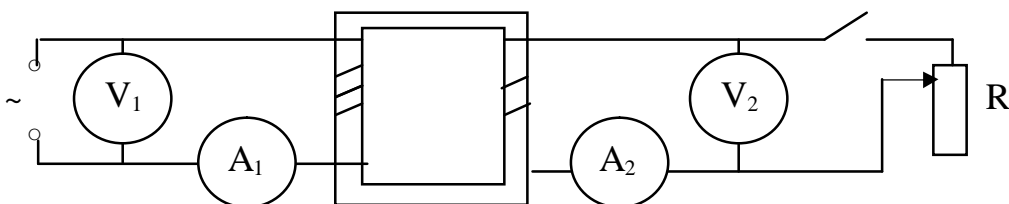


Рис. 1

2. Увімкніть первинну обмотку трансформатора в мережу змінного струму при розімкнутій вторинній обмотці. При $I_2=0$ виміряйте U_1 і U_2 і обчисліть коефіцієнт трансформації ненавантаженого трансформатора.

3. Встановіть повзунок реостата в середнє положення і увімкніть його як навантаження вторинної обмотки трансформатора.

4. Змінюючи опір реостата, встановіть струми I_2 , що дорівнюють 1, 2, 3, 4 А і при кожному струмові запишіть значення U_1 і U_2 .

5. За співвідношенням (5) і (6) обчисліть коефіцієнт трансформації і споживану потужність. Результати вимірювань і розрахунків занесіть до таблиці:

I_2	U_2	P	U_1	k

6. На міліметрованому папері побудуйте графік залежності коефіцієнту трансформації від споживаної потужності P .

Дайте відповіді на запитання:

1. Яке явище лежить в основі дії трансформатора?
2. Чому зміна сили струму у вторинній обмотці приводить до непропорційної зміни сили струму у первинній?
3. Чи може перегоріти первинна обмотка при короткому замиканні вторинної?
4. Змінювати силу струму і напругу можна за допомогою реостату і потенціометра. Яка ж необхідність виникла у трансформаторі?

Лабораторна робота № 34.

Визначення питомого заряду електрона методом магнітного фокусування.

Прилади та приладдя: електронно-променева трубка, вольтметр постійного струму на 100В, випрямляч на 1000В, реостат на 300Ом, випрямляч на 30В, амперметр.

Мета роботи: вивчення закономірностей руху часток у магнітному полі за допомогою електронно-променевої трубки.

Коротка теорія та методика вимірювань

Основна властивість магнітного поля полягає в тому, що в ньому діють сили на провідники зі струмом. За формулою Ампера на відрізок провідника, довжиною dL зі струмом I з боку магнітного поля з індукцією B діє сила

$$dF = I B dL \sin\alpha, \quad (1)$$

де α - кут між напрямком струму та вектором індукції магнітного поля. Сила dF перпендикулярна до площини, що містить елемент I , dL і вектор B , і спрямована в бік, звідки видно найкоротший поворот від елемента струму до вектора B проти годинникової стрілки. Струм зумовлений переміщенням заряджених часток, тому природно допустити, що сила, діюча на провідник зі струмом, зумовлена силами, що діють з боку магнітного поля на окрему рухом заряджену частку. Дійсно, якщо струму в провідникові немає, то заряджені частки рухаються неупорядковано, і сили, що діють на них з боку магнітного поля, мають безладні орієнтації. При складанні таких сил результуюча при великій кількості складових буде невеликою, бо середня сила, що діє на окрему частку, є незначною.

При впорядкованому русі заряджених часток, яким i є електричний струм, з'являється спільна для всіх зарядів складова швидкості, тому в цьому випадку i одержується помітна величина сили, діючої з боку магнітного поля на електричний струм. Відповідні міркування приводять до співвідношення для сили, що діє з боку магнітного поля на відокремлений рухомий заряд, у вигляді:

$$F = q u B \sin \alpha, \quad (2)$$

де q - величина заряду, u - так звана дрейфова швидкість його.

Співвідношення (2) вперше було одержано Г. Лоренцом. Тому силу, діючу на рухомий заряд з боку магнітного поля, називають силою Лоренца.

Сила Лоренца перпендикулярна до напрямку швидкості, тому вона змінює тільки її напрямок, не змінюючи величину u . Звідси випливає важливий висновок: робота сили Лоренца дорівнює нулю, тобто постійне магнітне поле не здійснює роботи при переміщенні зарядженої частки і не змінює її кінетичної енергії.

Для визначення питомого заряду електрона (так називають відношення e/m , де e і m - відповідно заряд і маса електрона, в даній роботі застосовується метод фокусування електронного пучка повздовжнім магнітним полем.

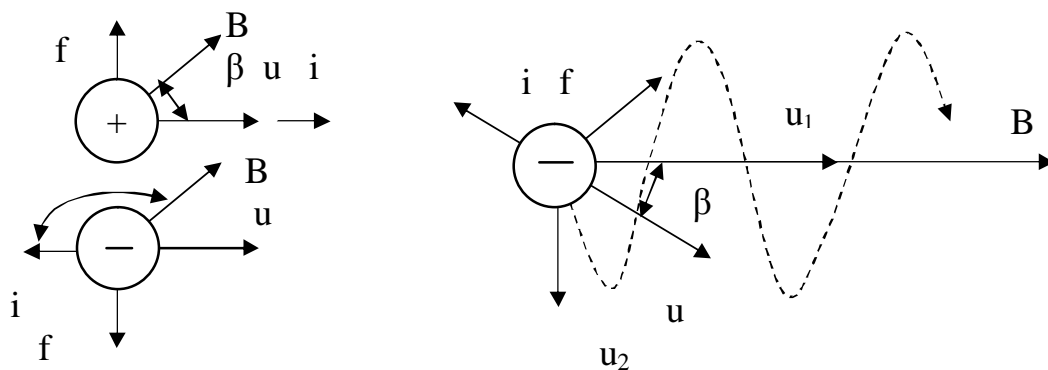


Рис.1.

Розглянемо рух електрона в магнітному полі. Нехай електрон летить зі швидкістю u , що складає кут α з напрямком магнітного поля B . Розкладемо швидкість електрона на дві складові: вздовж поля $u_1 = u \cos \alpha$ і перпендикулярно полю $u_2 = u \sin \alpha$ (рис.1).

Сила Лоренца на повздовжню складову не діє і змінює тільки напрямок поперечної складової. Оскільки u_2 , B і кут α між u_2 і B (прямий!) залишаються сталими, то електрон в площині, перпендикулярній B , буде описувати коло. Сила Лоренца стане доцентровою по відношенню до u_2 . Із того, що $m u_2^2 / r = e u_2 B$, де r - радіус кола, випливає, що

$$r = m u_2 / B e q. \quad (3)$$

Враховуючи, що на повздовжню складову u_1 з боку магнітного поля не діє сила, то рух електрона складається з рівномірного прямолінійного руху вздовж поля із швидкістю u_1 і рівномірного обертання навколо поля зі швидкістю u_2 . Ясно, що траєкторія руху електрона буде являти собою гвинтову лінію. Час одного оберта навколо поля, тобто період обертання, $T = 2\pi r / u_2$, що з урахуванням (3) дає

$$T = 2\pi m / (B e). \quad (4)$$

На співвідношенні (4) і ґрунтується метод визначення відношення e/m для електронів, який складається ось із чого. Електрони, що випускаються катодом K , проходять через отвір в аноді A . Між катодом і анодом прикладається прискорююча

напруга U . Отже, із “електронної гармати” вилітає пучок електронів, швидкість яких визначається співвідношенням

$$m u^2 / 2 = e U \quad (5)$$

За анодом електрони рухаються в просторі, вільному від електричного поля, і попадають на люмінесцентний екран. На трубку надягається довга котушка (соленоїд), що створює всередині трубки однорідне магнітне поле з індукцією

$$B = \mu_0 \mu n I, \quad (6)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ - відносна магнітна проникність; n - число витків на одиницю довжини соленоїда; I - сила струму в соленоїді.

Електрони, що вилетіли за межі аноду під невеликим кутом до магнітного поля, рухаються по циліндричних спіралях. За час одного оберту T електрони вздовж поля пролітають відрізок

$$l = u_1 T = 2\pi m u_1 / (B e). \quad (7)$$

Це означає, що електрони, вилітаючи із катода під деяким кутом α , знову перетинають вісь пучка в точках на відстанях l ; $2l$; $3l$ і т.д. від анода. В цих точках відбувається фокусування електронного пучка (рис.2). Отже, якщо монотонно змінювати

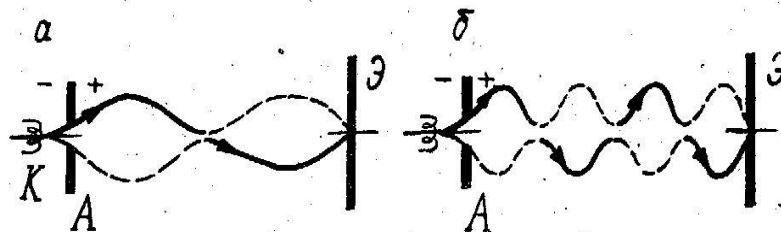


Рис. 2

магнітне поле або швидкість електронів, то спочатку розмита пляма на екрані буде періодично стягатися в малу пляму. Якщо відстань L між анодом A і екраном дорівнює l , то електрони пучка по завершенню одного оберту зустрінуться на екрані. При $L = 2l$ електрони зустрінуться на екрані після двох обертів і т.д. Отже, умовою фокусування пучка на екрані є рівність $L = kl$, де k - ціле число з ряду: 1, 2, 3 і т.д. Важаючи кути α малими ($\cos \alpha \approx 1$), із співвідношень (5) – (7) одержуємо

$$e / m = 2U \left(k \frac{2\pi}{\mu_0 \mu n l} \right)^2. \quad (8)$$

Вимірюючи значення U і I , при яких відбувається фокусування пучка на екрані, за формулою (8) обчислюють відношення e/m .

Порядок виконання роботи:

1. Вивчіть принципову схему установки (рис. 3). Схему живлення трубки,

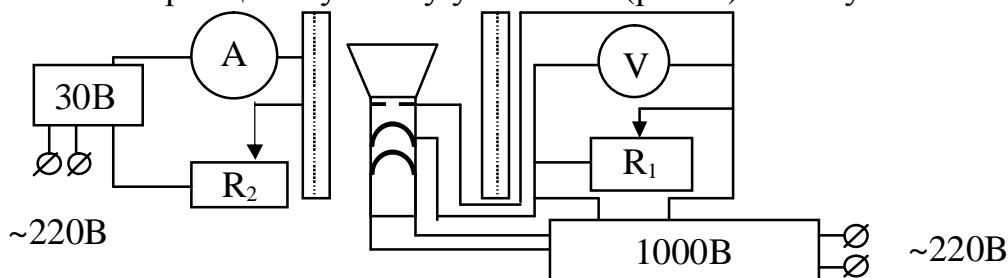


Рис. 3

вольтметр на 1000 В і потенціометр плавного регулювання змонтовано в окремому корпусі.

2. Під'єднайте живлення до соленоїда згідно зі схемою.
 3. Після перевірки схеми викладачем ввімкніть в мережу змінного струму обидва випрямляча і встановіть потенціометром R_1 напругу 1000 В між катодом і анодом трубки. Дайте трубці прогрітися на протязі 2-3 хвилин.
 4. Повільно збільшуючи силу струму в соленоїді, добивайтеся першого фокусування електронного пучка на екрані трубки, запишіть відповідне значення струму.
 5. Визначте силу струму, що відповідає другому і третьому фокусуванню.
 6. За формулою (8) розрахуйте величину питомого заряду електрона за результатами трьох вимірів та оцініть похибки вимірювань.
- Результати вимірювань і розрахунків занесіть до таблиці:

k	n	L	U	I	e / m	$\Delta(e / m)^2$
1						
2						
3						
Середні значення						

Дайте відповіді на запитання:

1. Маса частинки залежить від швидкості її руху у відповідності зі спеціальною теорією відносності за формулою $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Чи принципово можна за допомогою методу даної роботи дослідити цю залежність?
2. Чим принципово відрізняються дії магнітного та електричного полів на рухоми заряджену частинку?
3. Знайдіть відношення e/m за табличними даними і поясніть його відміну від знайденого у Ваших дослідах.

Лабораторна робота № 35.

Визначення ємності конденсатора за допомогою змінного струму.

Прилади та приладдя: досліджувані конденсатори, еталонний конденсатор, реостат на 3500 Ом, міліамперметр на 500 – 1000 мА, вольтметр на 300 В, вимикач, перемикач.

Мета роботи: засвоїти один із методів вимірювання ємності за допомогою змінного струму.

Коротка теорія і методика вимірювань

Змінну напругу синусоїдальної форми можна подати у вигляді

$$U = U_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

де U_0 - амплітуда напруги; $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна частота; ν - частота змінної напруги. Якщо напругу (1) подати в коло, що складається із послідовно ввімнених опору R , ємності C та індуктивності L , то в колі виникне змінний струм

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Амплітуда струму I_0 , що залежить від параметрів електричного кола і частоти ν , виражається співвідношенням

$$I_0 = U_0 / Z, \quad (3)$$

яке подібне закону Ома для постійного струму $I=U/R$, якщо вважати, що величина Z - імпеданс кола - відіграє роль опору кола змінного струму. Відповідні міркування призводять до такого співвідношення для імпедансу:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (4)$$

Імпеданс узвичаємо розглядати як векторну силу двох опорів - активного R і реактивного X :

$$X = \omega L - 1 / \omega C$$

(5)

При проходженні струму по активному опорі електрична енергія перетворюється в енергію теплового руху згідно з законом Джоуля-Ленца:

$$dQ = I^2 R dt. \quad (6)$$

На реактивному опорі теплові ефекти не виникають, але відбувається перетворення електричної енергії джерела струму в енергію електричного поля конденсатора і енергію магнітного поля індуктивності. Наявність реактивного опору в колі змінного струму призводить до зсуву ϕ фази струму відносно фази напруги ωt . Величини, що визначають реактивні опори

$$R_L = \omega l; \quad R_C = 1 / \omega C \quad (7)$$

мають розмірність опору і тому називаються відповідно індуктивним і ємнісним опорами кола.

В даній роботі визначається ємність конденсатора при застосуванні змінної напруги мережі міської напруги з частотою $\nu=50$ Гц. З цією метою коло збирається так, щоб в ньому можна було знехтувати активним і індуктивним опорами порівняно з ємнісним. Покладаючи $R=0, L=0$ в (4) і застосовуючи (3), перепишемо (2) у вигляді

$$I = U_0 \omega C \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

Прилади, що вимірюють змінний струм, проградуєвані в значеннях ефективних величин: ефективна сила струму, яку показує амперметр, дорівнює $I = I_0 / \sqrt{2}$, ефективна напруга - $U = U_0 / \sqrt{2}$. Крім того, показання приладу звичайно не залежить від зсуву фаз ϕ . Якщо за допомогою приладів для двох різних ємностей одержані результати $I = \omega C U$ та $I_1 = \omega C_1 U_1$, з відношення I / I_1 маємо

$$C = C_1 I U_1 / (I_1 U) \quad (9)$$

Якщо відома еталонна ємність C_1 та виміряні інші величини правої частини (9), то із (9) можна знайти шукану C .

В даній роботі співвідношення (9) є розрахунковим.

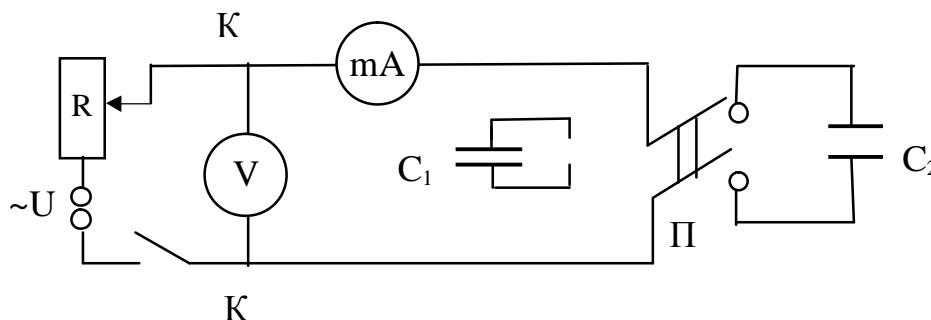


Рис.1.

Порядок виконання роботи:

1.Зберемо коло змінного струму згідно зі схемою (рис.1) .

2. Перемикачем П ввімкніть у вимірювальний контур еталонний конденсатор. Після перевірки кола викладачем подайте в коло напругу вимикачем К, повзунком реостата підберіть напругу $U_1 \approx 100-150\text{В}$ і виміряйте струм I_1 . Змінюючи напругу приблизно на 30В вверх-вниз, виконайте вимірювання ще двічі. Значення I_1 та U_1 занесіть до поданої нижче таблиці.

3. Вімкніть до вимірювального контура один з досліджуваних конденсаторів С і повторіть дії пункта 2, записуючи три значення U та I .

4. Обчисліть три значення ємності досліджуваного конденсатора С за формулою (9) і визначте похибки вимірювань.

№	C_1	U_1	I_1	U	I	C	$(\Delta C)^2$

Дайте відповіді на запитання:

1. Як змінюється сила струму в колі при зміні ємності?
2. Як можна спростити метод вимірювання ємностей, що вивчається?
3. Яка різниця існує між активним і реактивним опорами ?
4. В чому полягає систематична похибка при вимірюваннях за схемою (рис.1)?

Лабораторна робота № 36.

Дослідження індуктивності котушки за допомогою змінного струму.

Прилади та приладдя: досліджувана котушка з залізним осердям до неї, реостат на 1000Ом, амперметр з границями вимірювань до 15В, батарея акумуляторів, трансформатор 220-12 В, перемикач.

Мета роботи: засвоїти один із методів вимірювання індуктивності.

Коротка теорія та методика вимірювань

Змінну напругу синусоїдальної форми можна подати у вигляді виразу:

$$U = U_0 \cos (\omega t), \quad (1)$$

де U_0 - амплітуда напруги, $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна частота; ν - частота змінної напруги.

Якщо напругу (1) подати в коло, що складається із послідовно ввімкнених опорів R, ємності C та індуктивності L, то в ньому піде змінний струм

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де I_0 - амплітуда струму, що залежить від параметрів електричного кола і частоти і виражається співвідношенням:

$$I_0 = U_0 / Z, \quad (3)$$

яке подібне до закону Ома для постійного струму $I=U/R$, якщо вважати, що величина Z - імпеданс кола - відіграє роль опору кола змінному струму. Відповідні міркування призводять до такого співвідношення для імпедансу:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (4)$$

Імпеданс узвичаємо розглядати як векторну суму двох опорів - активного R і реактивного X:

$$X = \omega L - 1 / (\omega C). \quad (5)$$

При проходженні струму по активному опорі електрична енергія перетворюється в енергію теплового руху згідно із законом Джоуля-Ленца

$$dQ = I^2 R dt. \quad (6)$$

На реактивному опорі теплові ефекти не виникають, а відбувається перетворення електричної енергії джерела струму в енергію електричного поля конденсатора і енергію магнітного поля індуктивності. Наявність реактивного опору в колі змінного струму призводить до зсуву фази φ струму відносно фази напруги ωt . Величини, що визначають реактивний опір

$$X_L = \omega L; \quad X_C = 1 / \omega C \quad (7)$$

мають розмірність опору, і тому називаються відповідно індуктивним і ємнісним опорами кола.

Для вимірювання індуктивності котушки (коефіцієнта самоіндукції) збирають коло у такий спосіб, щоб при вимірюваннях можна було знехтувати ємнісним опором. При $X_C = 1/(\omega C) = 0$ з (4) одержуємо

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (8)$$

Активний опір R котушки можна знайти за законом Ома, пропускаючи через котушку постійний струм I при відомій напрузі U.

$$R = U / I. \quad (9)$$

Прилади, що реєструють змінний струм, проградуєвані в значеннях ефективних величин: ефективна сила струму, котру реєструє амперметр, дорівнює $i = I_0/\sqrt{2}$, ефективна напруга $u = U_0/\sqrt{2}$. Крім того, показання приладу звичайно не залежить від зсуву фаз φ . Якщо пропускати через котушку вимірюваний змінний струм I та вимірювати напругу U на котушці, то за (8) можна визначити імпеданс котушки

$$Z = u / i \quad (10)$$

При відомих активному опорі R і імпедансі Z за (8) обчислюють шукану індуктивність L

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (11)$$

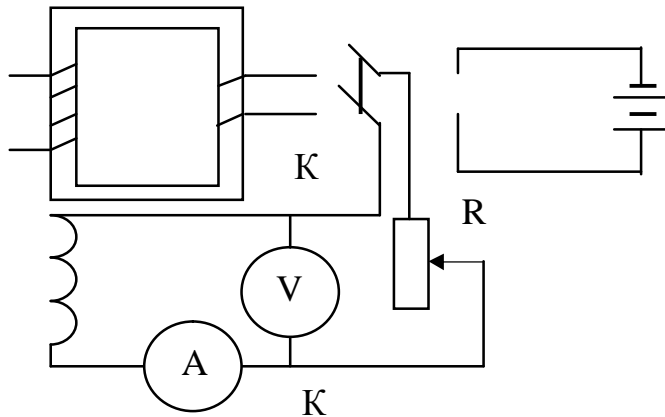


Рис. 1

Завдання 1.

1. Зберіть коло за схемою (рис.1). Трансформатор в розетку мережі не вмикайте!
2. Після перевірки кола викладачем ввімкніть джерело постійного струму перемикачем П. Користуючись реостатом, подайте на клемі К вимірювального контура напруги, при яких струм I через котушку дорівнює 0,5; 0,7; 0,9А. Запишіть відповідні значення постійної напруги U_1, U_2, U_3 .
3. За формулою (9) обчисліть R_1, R_2, R_3 .
4. Повторіть дії пунктів 2-3, вставивши в котушку осердя, і впевніться, що постійний струм не впливає на результати визначення R . Вийміть осердя.
5. Ввімкніть в мережу первинну обмотку трансформатора і перемикачем П подайте змінну напругу на котушку.
6. За допомогою реостата встановіть три різні значення змінного струму в котушці, запишіть відповідні напруги .
7. За формулою (10) знайдіть три значення імпедансу Z , визначте за (11) індуктивність котушки при $\omega = 2\pi \nu \approx 314 \text{ c}^{-1}$ ($\nu = 50 \text{ Гц}$). Зробіть оцінку похибок вимірювань.

Результати вимірювань і розрахунків подайте в таблиці:

№	I	U	R	i	u	Z	L	$(\Delta L)^2$
1								
2								
3								
Середні значення								

Завдання 2.

Вставте в котушку залізне осердя і виконайте дії пп. 2-7.

Дайте відповіді на запитання:

1. Які причини існування індуктивного опору?
2. Що може бути причиною похибок при вимірюванні за схемою (рис.1)?
3. Чому збільшується індуктивність при наявності осердя ?

Лабораторна робота № 37.

Дослідження електромагнітних хвиль за допомогою двохпровідної лінії.

Прилади та приладдя: генератор УКХ з випрямлячем для живлення від мережі змінного струму. Двопровідна лінія з індуктивним зв'язком, контактний місток з індикатором (лампочка розжарення), два контактних містки без індикаторів.

Мета роботи: засвоїти один із методів дослідження електромагнітних хвиль.

Коротка теорія та метод вимірювань

Розроблена Максвеллом в 19-му віці теорія єдиного електромагнітного поля сьогодні є теоретичною основою радіотехніки. Згідно з теорією Максвелла змінне електричне поле спричинює до змінного магнітного поля, а змінне магнітне поле в свою чергу спричинює до змінного електричного поля. Ці вторинні змінні поля мають вихровий характер: силові лінії змінного первинного поля концентрично охоплені силовими лініями вторинного поля. Деякі уявлення про характер змінного електромагнітного поля може дати рис.1, що є ніби миттєвим знімком поля. Горизонтальні кола Н зображують вторинні магнітні поля, а вертикальні кола Е - вторинні електричні поля.

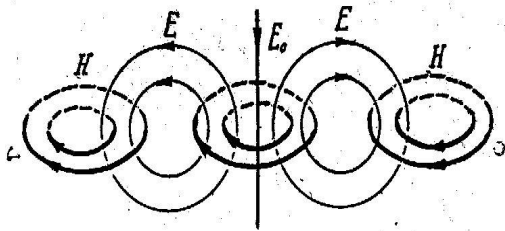


Рис.1

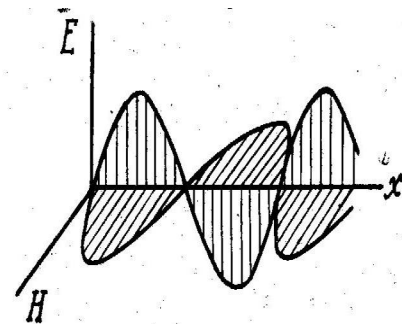


Рис.2

Будучи спочатку зв'язаними з зарядами і струмами; змінні електричні і магнітні поля можуть потім існувати незалежно від зарядів і струмів (відокремлюватись від них) і, породжуючи один одного, поширюватися в просторі зі швидкістю:

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon \mu} \quad (1)$$

або, якщо підставити числові значення і розмірності електричної ϵ_0 і магнітної сталей μ_0

$$v = c / \sqrt{\epsilon \mu},$$

(2)

де ϵ і μ - відносні діелектрична та магнітна проникність середовища. Згідно з формулою (2), у вакуумі електромагнітні поля поширюються зі швидкістю $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с, що відповідає швидкості світла у вакуумі ($\epsilon = \mu = 1$).

Особливістю електромагнітного поля є те, що вектори напруженості магнітного Н і електричного Е полів здійснюють коливання в однакових фазах у

взаємно перпендикулярних площинах перпендикулярно променеві. Напрямок векторів E , H і швидкості v пов'язані між собою правилом буравчика: якщо дивитися вздовж швидкості v , то поворот від E до H по найкоротшому шляху спостерігається по годинниковій стрілці. Отже, електромагнітне поле поширюється у вигляді поперечної хвилі, що складається з двох співпадаючих за фазами хвиль – хвилі напруженості електричного поля і хвилі напруженості магнітного поля (Рис.2). Довжина хвилі λ , період T , частота ν і швидкість v електромагнітної хвилі пов'язані відомим співвідношенням:

$$\lambda = v T = v / \nu. \quad (3)$$

Джерелами електромагнітних хвиль бувають змінні струми, тобто електричні заряди, що нерівномірно рухаються. В радіотехніці електромагнітні хвилі створюються з допомогою спеціальних пристроїв – генераторів електромагнітних коливань, основною частиною яких є коливальний контур Томсона, що складається з конденсатора C та індуктивності L (рис.3,а). Як відомо, процес електромагнітних коливань у такому контурі полягає в періодичному перетворенні енергії електричного поля зарядженого конденсатора в енергію магнітного поля котушки індуктивності, і навпаки. Коливальний контур характеризується єдиною власною частотою

$$\nu = 1 / 2\pi \sqrt{LC}. \quad (4)$$

Відомо, що в системі множини пов'язаних матеріальних точок (гумовий шнур, струна) коливальний рух може поширюватись у вигляді механічної хвилі. Аналогічно цьому в системі, що складається з множини пов'язаних між собою контурів, поширення коливань являє собою електромагнітну хвилю. Прикладом такої системи є двохпровідна лінія, в якій індуктивність і ємність розподілені безперервно по всій довжині лінії. Процес розповсюдження електромагнітної хвилі у двохпровідній лінії принципово не відрізняється від розглянутого раніше випадку для однорідного середовища. Різниця є лише в тому, що змінне електричне поле призведе до виникнення в проводах струмів провідності (рис.3,б), і тому воно зосереджено між проводами. У відсутність проводів силові лінії поля мали б ділянки, помічені на рисунку пунктиром. Проводи виготовлені з провідного матеріалу, тому напруженість електричного поля в них надто мала і пунктирних ділянок силових ліній в них немає.

На практиці завжди мають справу з короткими лініями, на довжині яких вкладається порівняно невелике число довжин хвиль. В цих випадках суттєву роль відіграє відбиття електромагнітних хвиль від кінців лінії. Відбиті хвилі складаються з первинною хвилею, в результаті чого виникають стоячі електромагнітні хвилі. Розглянемо головні особливості стоячої хвилі. Для цього введемо координатну вісь Ox , спрямовану вздовж двохпровідної лінії (рис.4, а), і припустимо, що коливання первинної хвилі в довільній точці можна подати так:

$$E = E_0 \sin [\omega (t - x/v)]. \quad (5)$$

Важаючи, що хвиля відбивається повністю, коливання відбитої хвилі в тій точці подано у вигляді

$$E_2 = E_0 \sin [\omega (t + x/v) - \varphi]. \quad (6)$$

Знак “+” біля доданку x/v в (6) вказує на рух цієї хвилі в негативному напрямку осі Ox . Величину φ - це запізнення за фазою коливань поля відбитої хвилі порівняно з коливаннями первинної хвилі в тій же точці. Це запізнення зумовлено

двома причинами. По-перше, до повернення в дану точку хвиля повинна пройти деякий шлях. По-друге, при відбитті можлива зміна фази. Складаючись, обидві хвилі дають результуюче поле $E = E_1 + E_2$. Виконавши звичайні тригонометричні перетворення і врахувавши (5) та (6), одержимо

$$E = 2 E_0 \cos (\omega x/v - \varphi / 2) \sin (\omega t - \varphi / 2). \quad (7)$$

Це рівняння показує, що в кожній точці лінії відбувається гармонічне коливання з частотою первинної хвилі ω і однаковою початковою фазою $\varphi / 2$. Амплітуда цих коливань залежить від координати точки x

$$E_a = 2 E_0 \cos (\omega x/v - \varphi / 2). \quad (8)$$

В певних точках E_a має максимуми, що відповідають значенням $\cos(\omega x/v - \varphi/2) = 1$. Ці точки називаються пучностями електричного поля. Їх координати визначаються умовою

$$\omega x/v - \varphi / 2 = 0, \pi, 2\pi, \dots, n\pi. \quad (9)$$

Відстань Δx між двома сусідніми пучностями можна визначити за різницею сусідніх аргументів косинуса, заданих співвідношенням (9): $\omega \Delta x/v = \pi$ або, враховуючи $v = \lambda / v$ і $\omega = 2\pi v$

$$\Delta x = \lambda / 2. \quad (10)$$

В інших точках двохпровідної лінії, що зветься вузлами, амплітуда E мінімальна (дорівнює нулю). Міркування, аналогічні попереднім, приводять, також до умови (10), тобто відстань між вузлами електричного поля дорівнює половині довжини хвилі.

Рис. 4.б пояснює характер коливань поля стоячої електромагнітної хвилі. На ньому вздовж горизонталі відкладені координати x лінії, а по вертикалі - амплітуда коливань E_a . В усіх точках між сусідніми вузлами (0-1, 1-2, і т.д.) коливання відбувається з однаковою початковою фазою, так що E в усіх точках одночасно досягає максимуму і одночасно перетворюється в нуль у відповідності з (7). Проте при переході через вузол $\cos(\omega x/v - \varphi / 2)$ змінює знак, що відповідає зміні фази коливань на π .

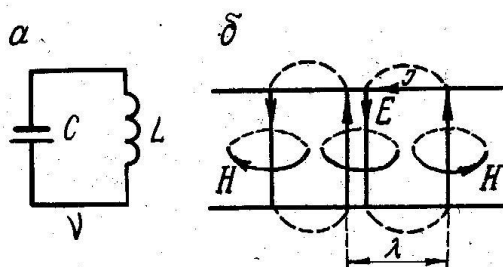


Рис.3

Розглянемо тепер магнітне поле. Як відомо, в електромагнітній хвилі, що поширюється, коливання електричного і магнітного полів відбувається в одній фазі. В стоячій хвилі це вже не має місця, тому що між коливаннями E і H з'являється різниця фаз у зв'язку з відбиванням хвилі від кінця лінії. В тому, що при відбиванні від кінця лінії має змінюватися на протилежну фаза одного із полів, можна впевнитися при простому міркуванні. При оберненні швидкості для дотримання правила правого буравчика маємо змінити напрямок E або H . Якщо лінія замкнута провідним містком, то напруга між кінцями лінії дорівнює нулю, і на кінці лінії буде розміщений вузол електричного поля. Це значить, що при відбиванні електричної хвилі від замкнутого кінця лінії відбувається зміна фази електричного поля на

протилежну. Амплітуда ж струму в провідному містку завжди максимальна, а отже, максимальне навколо нього магнітне поле, тобто при відбитті від замкнутого кінця лінії магнітне поле не змінює фазу коливань.

Таким чином, в стоячій електромагнітній хвилі вузли електричного поля співпадають з пучностями магнітного поля, і навпаки. Для виникнення в двопровідній лінії стоячої електромагнітної хвилі необхідно, щоб на довжині лінії вкладалось ціле число півхвиль

$$L = k \lambda / 2, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

На рис. 5 зображена стояча хвиля, що відповідає $k = 3$. Якщо умова (11) не виконується, то при відбиванні стійкої стоячої електромагнітної хвилі не одержується.

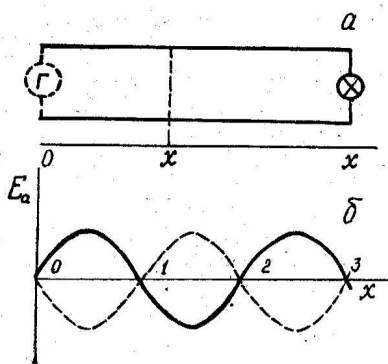


Рис. 4

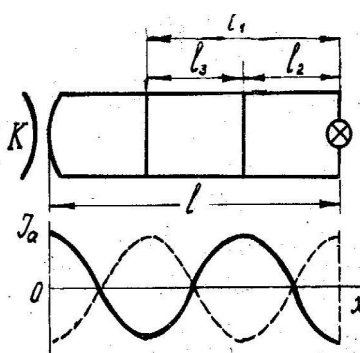


Рис. 5

Створюючи у двохпровідній лінії режим стоячої хвилі підбором довжини за розміщенням вузлів і пучностей H або E (за максимальним значенням I або U), можна визначити довжину хвилі, а при відомій частоті генератора – і швидкість її поширення.

Установка, що застосовується в даній роботі (рис.5), складається із генератора, індуктивно зв'язаного витком K з двохпровідною лінією. Виток зв'язку K разом з тим є індуктивністю контура генератора. Ємністю є міжелектродна ємність ламп генератора. У такий спосіб індуктивність і ємність в колі генератора зведені до мінімуму. Як впливає з (4), це дає можливість одержати коливання ультрависокої частоти (УВЧ). Індикатором в даній установці є лампочка розжарення малого опору. Це дозволяє вважати, що накладанням індикатора закорочують лінію, тобто в цьому місці відбувається зміна фази електричного поля на π з великою мірою точності. Для одержання стоячих хвиль в проводах закороченої лінії маємо на них вкласти ціле число півхвиль, тому система має бути налагоджена. Це робиться спостереженням яскравості свічення індикатора при переміщенні його вздовж проводів. Найбільша яскравість свічення лампочки індикатора в будь-якому місці вказує на те, що в проміжку між індикатором і початком лінії (витком зв'язку K) вклалось ціле число півхвиль і встановився режим стоячої хвилі з пучностями струму. На лампочці ж все-таки падає деяка напруга, тому вузол напруженості тут не виникає.

Якщо поблизу індикатора довільно розмістити контактний місток, то режим стоячої хвилі порушиться (лампочка погасне), але при зсуванні містка від індикатора на $\lambda / 2$ режим стоячої хвилі знову відновиться, і лампочка загориться. На цьому ґрунтується метод вимірювання довжини хвилі.

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть схему, під'єднавши до генератора блок живлення. Без перевірки схеми викладачем випрямляч в мережу не вмикайте!

2. Наладняйте схему. Для цього на двохпровідну лінію помістите лампочку-індикатор і, зсуваючи її, знайдіть місце найбільш яскравого свічення лампочки.

3. Залишивши лампочку в місці найбільш яскравого свічення, помістіть поблизу неї контактний місток (без лампочки) і переміщуйте його вздовж лінії доти, поки лампа-індикатор знову загориться яскраво. Аналогічно проробіть і з другим містком, помістивши його з того ж боку індикаторної лампи.

4. Виміряйте відстані L_1 , L_2 , L_3 (між індикаторною лампою, першим і другим містками, а також між перекидними містками).

5. Визначити відстані між сусідніми пучностями за формулою:

$$L_{\text{ср.}} = (L_3 + L_2 + L_1/2) / 3.$$

Знаючи, що довжина електромагнітної хвилі дорівнює $\lambda = 2L_{\text{ср.}}$, визначте довжину електромагнітної хвилі.

6. Обчисліть частоту генератора УКВ за формулою (3), приймаючи швидкість електромагнітних хвиль $v = 3 \cdot 10^8$ м/с. Дані не менше ніж трьох вимірів занесіть до таблиці і зробіть оцінку похибок вимірювань:

№	L_1	L_2	L_3	$L_{\text{ср}}$	λ	v	Δv
1							
2							
3							
Середні значення							

Дайте відповіді на запитання:

1. Як пояснити процес виникнення електромагнітних коливань в коливальному контурі?

2. Чи можна стверджувати, що електроенергія по міській мережі змінного струму передається у вигляді електромагнітних хвиль?

3. Чи можна одержати коливання ще більшої частоти, ввімкнувши до коливального контура генератора конденсатор, ємність якого менша за міжелектродну ємність лампи?

ОПТИКА ТА ФІЗИКА АТОМА

Лабораторна робота № 38.

Дослідження показника заломлення прозорих пластинок за допомогою мікроскопу.

Прилади та приладдя: мікроскоп, мікрометр, вимірювані прозорі пластинки зі штрихами на обох поверхнях.

Мета роботи: засвоїти один із методів вимірювання показника заломлення.

Коротка теорія і метод вимірювань

Абсолютним показником заломлення середовища називається відношення швидкості - c поширення світла у вакуумі до швидкості - v його поширення в даному середовищі

$$n = c / v. \quad (1)$$

Це відношення, згідно із законом заломлення, дорівнює відношенню синуса кута падіння променя у вакуумі до синуса кута заломлення в даному середовищі

$$n = \sin \alpha / \sin \beta. \quad (2)$$

Показник заломлення залежить від довжини хвилі світла і від властивостей середовища. Швидкість поширення світла у даному середовищі завжди менша, ніж у вакуумі. Тому абсолютний показник заломлення завжди більший за одиницю.

Відносний показник заломлення двох середовищ пов'язаний з їх абсолютними показниками заломлення n_1 і n_2 співвідношенням

$$n_{21} = v_1 / v_2 = n_2 / n_1, \quad (3)$$

де v_1 і v_2 - швидкості світла відповідно в першому і другому середовищах.

Для вивчення показників заломлення речовин застосовують різні методи. Одним з них є метод визначення показника заломлення прозорих тіл за допомогою мікроскопу. Метод ґрунтується на удаваному зменшенні товщини прозорої пластинки внаслідок заломлення променів. Розглянемо плоскопаралельну пластинку зі штрихами, нанесеними на верхній і нижній гранях (рис.1). Точка C , що лежить на штрихові нижньої грані, внаслідок заломлення, здається лежачою в точці C' . В зв'язку з цим d_1 - удавана, d - істинна товщина пластинки. За рис.1 знаходимо:

$$d = CD \operatorname{ctg} \beta; \quad d_1 = CD \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

При розгляданні штрихів на пластинці в мікроскоп, оптична вісь якого перпендикулярна до пластинки, кути α і β малі і тангенси кутів можна замінити синусами. Тоді вирази (4) можна записати у вигляді:

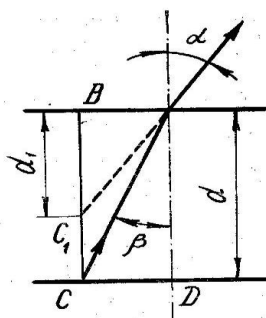


Рис.1.

$$d = C D / \sin \beta ; \quad d_1 = C D / \sin \alpha. \quad (5)$$

Знайдемо із (5) відношення $d_1/d = \sin \alpha / \sin \beta$. Якщо врахувати закон заломлення (2), то одержимо

$$d / d_1 = n. \quad (6)$$

Таким чином, показник заломлення прозорої пластинки може бути визначений за відношенням істинної її товщини до удаваної.

Порядок виконання роботи:

1. Виміряйте мікрометром істинну товщину пластинки d .

2. Визначте удавану товщину пластинки d_1 , для чого:

а) покладіть пластинку на столик мікроскопа під об'єктив так, щоб обидва штрихи перетинали оптичну вісь мікроскопа;

б) рухаючи тубус мікроскопу, одержіть чітке зображення штриха, нанесеного на верхню поверхню пластинки, запишіть відлік мікрометричного гвинта мікроскопу;

в) мікрометричним гвинтом опустіть тубус мікроскопа (рахуйте оберти гвинта) до одержання чіткого зображення штриха на нижній грані пластинки. Удавана товщина пластинки визначається за різницею кінцевого і початкового відліків

$$d_1 = (N Z + 0,001m), \quad (7)$$

де N - число повних обертів барабана гвинта; $Z = 0,1$ мм - відстань кроку гвинта; m - число поділок в неповному оберті барабана.

3. Вирахуйте показник заломлення пластинки за формулою (6).

4. Вимірювання істинної та удаваної товщин пластинки зробіть тричі, визначте середнє значення показника заломлення пластинки і оцініть похибки вимірювань.

Результати вимірювань і розрахунків подайте в табл. 1.

Таблиця 1

№	d	N	m	d_1	n	$(\Delta n)^2$
1						
2						
3						
Середні значення						

5. Вимірювання виконайте для двох інших пластинок, вносячи результати до таблиць 2 і 3, аналогічних таблиці 1.

Дайте відповіді на запитання:

1. Що називається показником заломлення?

2. В чому полягають причини залежності показника заломлення від природи речовини?

3. Чи можна застосувати метод, що вивчається, до досліджень рідин та газів? Як треба відозмінити для цього установку?

Лабораторна робота № 39.

Дослідження розчинів за допомогою рефрактометра.

Прилади та приладдя: рефрактометр, розчини цукру у воді невідомої концентрації, піпетка, фільтрувальний папір, таблиця для визначення концентрації цукру за показником заломлення розчину.

Мета роботи: засвоїти один із методів визначення концентрації розчинів.

Коротка теорія та методика вимірювань

При переході променя світла із одного середовища в інше справедливий закон заломлення світла: відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для двох даних середовищ і називається показником заломлення другого середовища відносно першого:

$$n_{21} = \sin \alpha / \sin \beta \quad (1)$$

Відносний показник заломлення n_{21} може бути виражений через абсолютні показники заломлення n_2 та n_1 , які визначають заломлення світла в даному середовищі відносно вакууму:

$$n_{21} = n_2 / n_1 \quad (2)$$

Показники заломлення n_{21} , n_2 , n_1 зв'язані з швидкостями світла у вакуумі (c) та в даних середовищах (v_2 та v_1):

$$n_{21} = v_2 / v_1; \quad n_2 = c / v_2; \quad n_1 = c / v_1 \quad (3)$$

Показник заломлення n є важливою характеристикою рідини, пов'язаною з хімічною структурою її молекул і концентрацією досліджуваного розчину.

Для швидкого і зручного визначення показника заломлення рідин і для визначення концентрації розчинів за їх показником заломлення використовуються спеціальні прилади - рефрактометри. Принцип дії одного із типів рефрактометрів базується на явищі повного внутрішнього відбивання, яке має місце при переході світла із середовища оптично більш густого (з більшим абсолютним показником заломлення) в середовище оптично менш густе (з меншим абсолютним показником заломлення) – $n_1 > n_2$.

При використанні формули (1) і співвідношень (2) та (3) для цього випадку $n_{21} < 1$, а тому кут заломлення β більший за кут падіння α . При малих кутах падіння

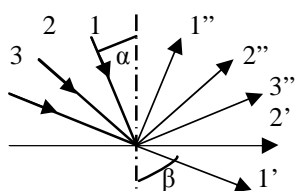


Рис. 1

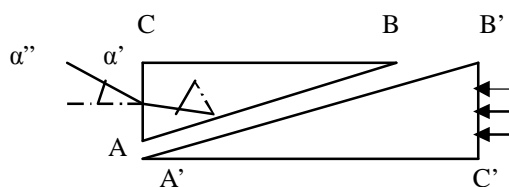


Рис. 2

(промінь 1 на рис.1.) на межі двох середовищ формуються два промені - заломлений $1'$ і відбитий $1''$. При збільшенні кута падіння завжди знайдеться такий кут падіння (промінь 2), при якому заломлений промінь $2'$ ковзає по межі розділу середовищ. При збільшенні кута падіння (промінь 3) заломленого променя $3'$ взагалі немає, а інтенсивність відбитого променя (промінь $3''$) дорівнює інтенсивності падаючого

променя - виникає повне внутрішнє відбиття. Промінь 2 і відповідний йому кут падіння α_{zp} визначають межу між звичайним ходом променя (із виникненням заломленого і відбитого променів) і повним внутрішнім відбиванням – вони так і називаються граничним променем і граничним кутом повного внутрішнього відбивання. При відомому показнику заломлення n_{21} з формули (1) можна обчислити α_{zp} , якщо в (1) підставити $\beta=90^\circ$. Тоді:

$$\sin \alpha_{zp} = n_{21} \quad (4)$$

При пропусканні променя із другого середовища в перше можна застосувати принцип зворотності променів: променю з кутом падіння 90° відповідає в більш густому середовищі заломлений промінь з кутом заломлення, що дорівнює α_{zp} .

Основними частинами рефрактометра є дві призми (рис. 2), виготовлені з скла флінтглас з великим показником заломлення $n = 1,72$. Між призмами вводять 2-3 краплі досліджуваної рідини, яка розпливається в тонкий шар при з'єднанні призм. Пучок світлових променів від дзеркальця, пройшовши через грань $B'C'$ освітлювальної призми, падає на грань $A'B'$, що торкається рідини. Грань $A'B'$ - матова, тому вона розсіює світло в рідині за всіма напрямками, і промені падають на грань AB вимірювальної призми ABC під різними кутами. Найбільший можливий кут падіння цих променів не перевершує 90° , а тому всередині призми ABC не може бути променів з кутами заломлення більше, ніж граничний кут α' , а на виході із призми немає променів з кутами заломлення більше, ніж a'' . При розгляданні грані під кутом $a > a''$ вона темна, а при $a < a''$ світла. Підбираючи положення окуляра, при якому частину грані AC видно під кутом $a > a''$, а другу - під кутом $a < a''$, одержуємо границю світла і тіні в центрі поля зору. Для цього треба повертати трубу на певний кут по секторній шкалі, на якій нанесені значення показника заломлення. Для зручності відліку за цією шкалою над нею розміщений окуляр-лупа.

Промені, що пройшли в трубу через об'єктив за допомогою дзеркальця, спрямовуються вздовж осі зорової труби в око спостерігача. Для променів із різною довжиною хвилі показники заломлення різні, тому границя світла і тіні різнокольорові. Для одержання різкої границі світла і тіні в нижній частині зорової труби встановлена призма прямого зору /компенсатор/, з'єднана з накотним кільцем і гвинтом.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з будовою приладу.
2. Звільніть затискач, що кріпить призми, спустіть нижню призму, протріть її поверхню фільтрувальним папером, змоченим дистильованою водою. Підійміть нижню частину камери з призмою, закріпіть затискач і, користуючись дзеркалом, спрямуйте пучок світла через віконце на грань нижньої призми.
3. Спостерігаючи за полем зору в трубу, переміщенням дзеркальця добийтесь різкого зображення перетину ниток. Усуньте різнокольоровість границі світла і тіні, повертаючи гвинт компенсатора (праворуч від об'єктиву).
4. Опустіть нижню призму, нанесіть на неї піпеткою 2-3 краплі дистильованої води і підійміть призму. Змініть контрольний відлік показника заломлення води ($n=1,33299$).

5. Опустіть нижню призму, протерши її досуха, нанесіть піпеткою кілька крапель одного з досліджуваних розчинів цукру на грань призми, щільно зачиніть камеру і, повертаючи лівою рукою гвинт на секторній шкалі, змінюйте кут повороту доти, доки границя світла і тіні не стане на перетині ниток у полі зору. Після цього змініть відлік показань приладу, користуючись окуляром на секторній шкалі.

6. Знайдіть показники заломлення для інших розчинів. Для цього виконайте три вимірювання, кожний раз промиваючи призми дистильованою водою і витираючи їх досуха.

7. Результати вимірювань запишіть у табл.1, визначіть середнє значення показника заломлення і за ним знайдіть в табл. 2 відповідну концентрацію розчину.

Таблиця 1

Розчин	n_1	n_2	n_3	$n_{cp.}$	c
1					
2					

Таблиця 2

Перевід показників заломлення в концентрацію цукру

n	c, %	n	c, %	n	c, %
1,33299	0,00	1,33599	2,07	1,33894	4,10
1,33349	0,34	1,33649	2,42	1,33944	4,43
1,33399	0,90	1,33968	2,76	1,33993	4,76
1,33449	1,04	1, 33747	3,09	1,34042	5,10
1,33499	1,39	1,33796	3,42	1,34091	5,43
1,33549	1,73	1,33845	3,76	1,34140	5,76
.....
1,34190	6,09	1,34726	9,63	1,35254	13,03
1,34239	6,42	1,34774	9,94	1,35302	13,33
1,34288	6,75	1,34822	10,25	1,35350	13,65
1, 34337	7,07	1,34870	10,57	1,35398	13,94
1,34385	7,39	1,34918	10,88	1,35446	14,24
1,34434	7,71	1,34966	11,19	1,35494	14,55
1, 34483	8,04	1,35014	11,50	1,35541	14,84
1,34532	8,36	1,35062	11,80	1,35589	15,14
1,34581	8,68	1,35111	12, 11	1,35636	15,43
1,34 630	9,01	1,35158	12,41	1,35683	15,72
1,34678	7,32	1,35206	12,72	1,35730	16,01

Дайте відповіді на запитання:

1. Що таке показник заломлення речовини?
2. Для яких розчинів можна застосовувати метод, що вивчається?
3. Що може внести значні похибки при застосуванні даного методу?

Лабораторна робота № 40.

Дослідження світла за допомогою дифракційної ґратки.

Прилади та приладдя: дифракційна ґратка, гоніометр з колімаційною та зоровою трубою, джерело світла.

Мета роботи: засвоїти метод визначення довжини світлових хвиль.

Коротка теорія та методика вимірювань

Дифракцією світла називається відхилення світлових хвиль від прямолінійного поширення, не викликане відбиванням або заломленням променів світла. Дифракція світла присутня завжди там і тоді, коли відбувається обмеження світлового фронту хвилі. Проте спостерігати її найлегше при проходженні світла через малі отвори або біля малих непрозорих перепон. Для одержання дифракційних спектрів виготовляють так звані дифракційні решітки (ґратки), що являють собою сукупність паралельних, близько розмішених одна до одної щілин або відбиваючих смужок. Існує кілька способів виготовлення дифракційних ґраток. В одному з них скляну пластинку покривають тонким непрозорим шаром м'якого металу (Al, Ag) і надтонким кістяним різцем за допомогою ділильної машини подряпують в шарі вузькі шпарини (до 50 –1200 на 1 мм довжини). В іншому способі подряпини наносять на поверхню прозорої тонкої плівки, а проміжки між подряпинами служать щілинами. Існують відбивальні ґратки у вигляді металевих дзеркал з нанесеними на них штрихами.

Розрахунок дифракційної картини робиться згідно з принципом Гюйгенса, доповненого Френелем принципом Юнга інтерференції світлових променів – так званим принципом Гюйгенса-Френеля. Згідно з принципом Гюйгенса, кожную точку хвильового фронту можна розглядати як точкове джерело вторинних сферичних хвиль. Визначаючи результат інтерференції хвиль від усіх точок фронту, вдається пояснити всі закономірності дифракції світла.

При падінні паралельного пучка променів (рис.1) на дифракційну ґратку плоский фронт світлової хвилі АВ проходить через всі щілини в одній фазі. В деяку точку екрана під кутом φ йдуть два промені 1 і 2 і інтерферують.

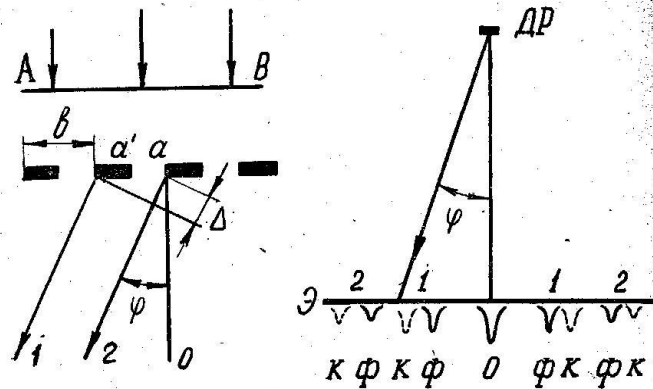


Рис. 1

Між сусідніми щілинами в напрямку під кутом φ виникає різниця ходу променів

$$\Delta = b \sin \varphi, \quad (1)$$

де $b = a + a'$ – називається сталою ґратки і визначається числом щілин на 1 м довжини

$$b = 1/n. \quad (2)$$

Промені від сусідніх щілин (отже, і від усіх щілин) дають максимум інтерференції при різниці ходу у ціле число довжин хвиль -

$$\Delta = k \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Умову мінімуму інтерференції одержуємо при різниці ходу у напівціле число довжин хвиль -

$$\Delta = (k + 1/2) \lambda. \quad (4)$$

При падінні на ґратку монохроматичного (однокольорового) світла на екрані виникають однокольорові смуги. Біле світло утворює на екрані різнокольорові смуги (див. рис 1, праворуч), тому що умови максимуму для різних довжин хвиль задовольняються при різних кутах φ : на екрані біле світло розкладається на спектр першого ($k=1$), другого ($k=2$), третього і т.д. порядків. Цією властивістю дифракційних ґраток користуються при спектральних дослідженнях.

Дифракційні спектри одержують не гірші за дисперсійні, а прилади з добрими дифракційними ґратками мають переваги перед призматичними.

В данній роботі дифракційна ґратка застосовується для визначення довжин хвиль червоного, зеленого і фіолетового променів при використанні співвідношення (1) для максимуму (3). Для визначення довжини хвилі використовуються чітко видимі спектри першого та другого порядків. При цьому вимірюються кути φ і за (1), при відомому b обчислюється довжина хвилі λ . При вимірюванні світло від джерела пропускається через коліматор – обладнання для одержання вузького пучка паралельних променів. Пучок променів падає на дифракційну ґратку і зазнає дифракції. Повертаючи зорову трубу праворуч – ліворуч, відшуковують напрямок, по якому досліджувані промені утворюють інтерференційні максимуми. Для точного відліку кутів застосовується градусна шкала з ноніусом, що дає можливість вимірювати кути з точністю до кутової мінути.

Порядок виконання роботи:

1. Перевірте установки щілин коліматорної труби проти лампи (джерело світла). Включіть світло і, повертаючи зорову трубу лімбом гоніометра, впевніться в наявності спектрів першого, другого і третього порядків.

2. Виконайте вимірювання для червоних променів. Для цього лімбом гоніометра встановіть нитку зорової труби на максимум червоного світла в правому спектрі першого порядку і зніміть відлік кута φ' за лімбом і ноніусом. Знайдіть кут φ'' відповідаючий максимуму червоного світла в лівому спектрі першого порядку. Усереднене значення кута φ знайдіть за різницею відліків: $\varphi = (\varphi' - \varphi'')/2$.

3. За формулами (1) і (3) при $k=1$ і $b = 1 \cdot 10^{-5}$ м (сто щілин на 1 мм) визначіть довжину хвилі червоного світла.

4. Повторіть дії пунктів 2 і 3 для червоного світла спектрів другого порядку, приймаючи $k = 2$.

5. Виконайте дії пунктів 2, 3, 4 для зеленого і фіолетового світла.

6. Дані вимірювань і розрахунків подайте в таблиці. У звіті подайте також повний розрахунок величин.

k	Ділянка спектру	ϕ'	ϕ''	ϕ	λ , нм	λ_{cp} , нм	$\Delta\lambda_{cp}$, нм
1	Червоний						
	Зелений						
	Фіолетовий						
2	Червоний						
	Зелений						
	Фіолетовий						

Дайте відповіді на запитання:

1. Що називається дифракційною ґраткою ?
2. Для чого застосовується дифракційна ґратка ?
3. Чому дифракційна ґратка дає дисперсію світла ?

Лабораторна робота № 41.

Вивчення спектрів пропускання за допомогою універсального фотометра

Прилади та приладдя: кювети з досліджуваними рідинами, універсальний фотометр ФМ.

Мета роботи: засвоїти метод реєстрації спектрів пропускання.

Коротка теорія та методика вимірювань

Світловий потік, що падає на тіло, частково відбивається, частково поглинається і частково пропускається. Відбивання характеризується коефіцієнтом відбивання r , що дорівнює відношенню відбитого Φ_r світлового потоку до падаючого

$$r = \Phi_r / \Phi. \quad (1)$$

Поглинання характеризується коефіцієнтом поглинання k , що дорівнює відношенню світлового потоку Φ_k , який поглинається тілом, до падаючого

$$k = \Phi_k / \Phi. \quad (2)$$

Пропускання світла тілами характеризується коефіцієнтом пропускання t , що дорівнює відношенню світлового потоку Φ_t , пропущеного тілом, до падаючого Φ

$$t = \Phi_t / \Phi. \quad (3)$$

Часто замість коефіцієнта пропускання вводять оптичну густину

$$D = - \lg t. \quad (4)$$

Так, оптична густина $D = 1$ відповідає 10% пропускання світла, а при $D = 2$ пропускається 1% світла.

За законом збереження енергії

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_k + \Phi_t.$$

(5)

Кожний із вказаних коефіцієнтів залежить від довжини хвилі падаючого світла. В залежності від фізичної природи речовина поглинає світло однієї довжини хвилі сильніше, іншої – слабше. Так, наприклад, зелене скло сильно поглинає

випромінення зі всіма довжинами хвиль, що відповідають видимій області спектра, за винятком зелених променів, довжина хвилі яких близько 550 нм. Зелений лист рослини пропускає і розсіює зелені промені і сильно поглинає промені в червоній і синій областях спектра.

Якщо на будь-який зразок спрямувати світловий потік від джерела світла неперервного спектра, то внаслідок неоднакового поглинання зразком різних довжин хвиль, спектр пропущеного світла зміниться. За характером спектрів пропускання роблять якісний і кількісний аналізи різних речовин. В даній роботі визначається зміна коефіцієнта пропускання (або оптичної густини) водних розчинів різних фарбників в залежності від довжини хвилі падаючого світла. Вимірювання коефіцієнта пропускання проводиться за допомогою універсального фотометра ФМ (рис.1).

В основу будови приладу покладено принцип зрівняння двох світлових потоків шляхом зміни одного з них за допомогою діафрагми змінного перерізу. Два паралельних світлових пучки від освітлювача, відбившись від дзеркала, попадають в прилад через дві діафрагми, ступінь відкритості яких регулюється поворотом двох барабанів. Потім світлові пучки об'єднуються за допомогою об'єктива та ромбічних призм, попадають на біпризму, яка зводить обидва пучки до осі окуляра. Із біпризми промені проходять через фільтр, попадають в окуляр і в око спостерігача.

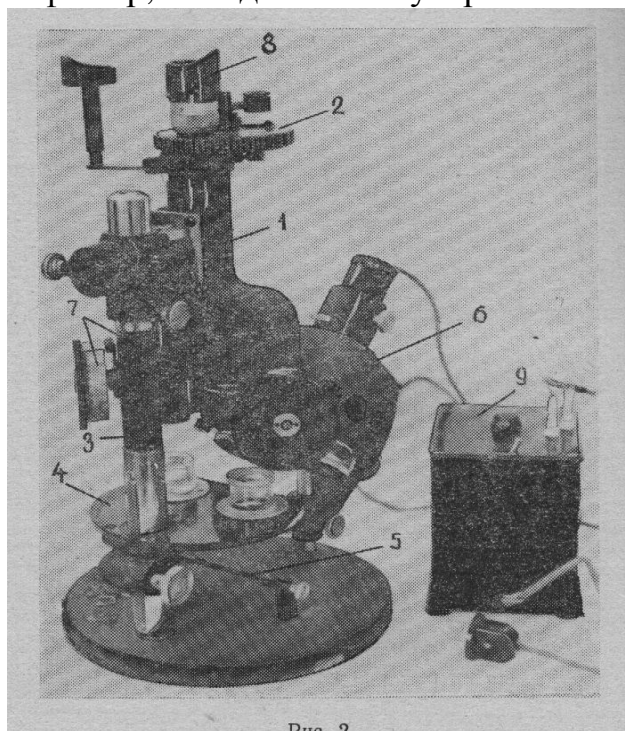


Рис. 2

Рис.1

Порядок виконання роботи:

1. Кінці шнура від освітлювача ввімкніть в гнізда трансформатора “0” і “8”, що відповідає вихідній напрузі 8 В. При цьому важіль на трансформаторі “більше – менше” має стояти в середньому положенні.

УВАГА! НЕ ВМИКАЙТЕ НА БІЛЬШУ НАПРУГУ ЛАМПОЧКУ, РАЗРАХОВАНУ НА НАПРУГУ 8 В !

2. Увімкніть вилку трансформатора в мережу з напругу 220В. Увімкніть лампу освітлювача тумблером, що розміщений на трансформаторі.

3. Встановіть обидва барабани (по чорній шкалі) на поділку 100 і перевірте, чи однаково освітлені обидві половини поля зору в окулярі.

4. Встановіть кювету з розчинником на предметний столик під правою діафрагмою, а кювету з досліджуваним розчином під лівою діафрагмою, - обидві половини поля будуть освітлені неоднаково.

5. Для одержання спектральної характеристики досліджуваних речовин диском із світлофільтрами включають в хід променів світлофільтр № 1, обертають правий барабан доти, доки не зрівняються освітленості обох половин поля зору. Вимірюють коефіцієнт пропускання по чорній шкалі правого барабану. Кожне вимірювання з тим же світлофільтром роблять тричі і середнє значення заносять до таблиці.

6. Вимірювання за пунктом 5 проведіть зі світлофільтрами № 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

7. Отримайте значення коефіцієнтів пропускання t для восьми довжин хвиль, відповідних ефективним довжинам хвиль λ світлофільтрів 1 - 11. Одержані результати занесіть до таблиці.

8. Знаючи коефіцієнт пропускання t для різних світлофільтрів і відповідну їм довжину хвилі (див. табл), побудуйте графік залежності коефіцієнта пропускання t від довжини хвилі λ . По осі абсцис відкладайте λ , а по осі ординат – значення t .

№ фільтра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Тип фільтра	M72	M66	M61	M57	M53	M50	M47	M43	K2	K4	K6
λ , нм	726	665	619	574	538	496	465	432	633	650	478
t , %											

Дайте відповіді на запитання :

1. Який принцип покладено в основу методу вимірювань ?
2. Чи можна на графіком $t = f(\lambda)$ для будь-якої речовини визначити її колір?
3. Чи можна за кольором розчину побудувати графік залежності $t = f(\lambda)$?

Лабораторна робота № 42.

Дослідження плоскоопуклої лінзи за допомогою кілець Ньютона.

Прилади та приладдя: вимірювальна установка з джерелом світла і червоним світлофільтром, системою лінза – пластинка та відліковим мікроскопом.

Мета роботи: засвоїти метод дослідження лінз із застосуванням явища інтерференції світла.

Коротка теорія та методика вимірювань

В роботі використовується інтерференція світлових хвиль у вигляді так званих кілець Ньютона. Необхідною умовою спостереження стійкої інтерференційної

картини є когерентність пучків світлових хвиль. Такі пучки можуть випромінювати когерентні джерела світла – джерела, що випромінюють хвилі однакової довжини і з різницею фаз, котра не змінюється з плином часу. В сучасних умовах когерентне випромінювання одержують з допомогою оптичних квантових генераторів – лазерів. Всі інші (природні) джерела світла дають некогерентне випромінювання. З метою спостереження інтерференції світла від таких джерел удаються до штучних прийомів – замість когерентних джерел світла застосовують когерентні промені, одержані від одного джерела світла. Якщо такі пучки приходять в одну точку різними шляхами з різницею ходу у ціле число k довжин хвилі λ , то амплітуди коливань при складанні таких хвиль дадуть результуюче коливання зі збільшеною амплітудою. В зв'язку з цим рівність

$$\Delta = k\lambda, \tag{1}$$

де Δ - різниця ходу, є умовою спостереження максимуму інтерференційної картини. При різниці ходу

$$\Delta = (2k + 1)\lambda/2 \tag{2}$$

хвилі зустрічаються в протилежних фазах і при рівних амплітудах взаємно гасяться. Тому рівність (2) є умовою мінімуму інтерференції. Оптичної різниці ходу досягають різними способами, в тому числі і пропусканням світла через прозорі пластини змінної товщини.

Розглянемо інтерференцію світла в системі лінза – пластинка при нормальному падінні світлових променів на пластинку (рис.1). Для лінзи з великим порівняно з розмірами світлового пучка радіусом кривизни R можна знехтувати відхиленням променів від перпендикулярного напрямку і тим самим спростити розрахунок інтерференційної картини.

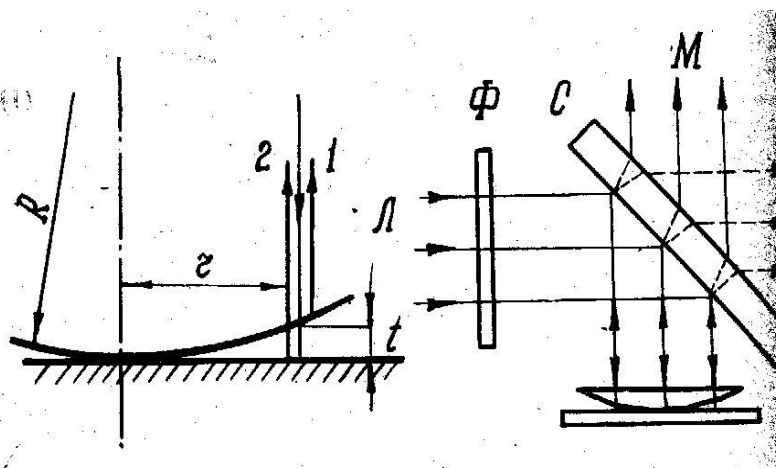


Рис.1

Рис.2

Промені 1 і 2, відбиті відповідно від поверхні лінзи і від поверхні пластинки. Промінь 1 відбивається від границі розділу скло-повітря і проходить до ока спостерігача деякий шлях l_1 . Промінь 2 до відбивання проходить додатковий шлях, що дорівнює товщині повітряного проміжку. При відбиванні від оптично більш густого середовища (скла) промінь 2 зазнає втрати півхвилі $\lambda/2$ і потім ще раз проходить шлях t до зустрічі з променем 1. Оптичний шлях променя 2 до ока спостерігача $l_2 = l_1 + 2t + \lambda/2$. Отже, в системі лінза - пластинка кожний падаючий промінь утворює два когерентні промені з оптичною різницею ходу

$$\Delta = l_2 - l_1 = t + \lambda / 2. \tag{3}$$

Величина t змінюється з віддаленням від точки контакту, тому на різних відстанях r від неї можна задовольнятися або умова максимуму інтерференції (1), або умова (2) мінімуму інтерференції. Спостерігач бачить у відбитому світлі картину інтерференції у вигляді концентричних кілець. При падінні на систему монохроматичного світла спостерігаються світлі кільця, розділені темними проміжками. При падінні білого світла кільця стають різнокольоровими, тому що для різних довжин хвиль умова максимуму інтерференції (1) задовольняється на різних відстанях від точки контакту.

Грунтуючись на умовах (2) та (3), обчислимо радіуси кілець, застосовуючи теорему про перпендикуляр, опущений з довільної точки кола на його діаметр. Оскільки довжина перпендикуляра є середнє геометричне між відрізками, на які ділиться діаметр, то маємо:

$$r^2 = (2R - t) t. \quad (4)$$

В дослідах з кільцями Ньютона $2R \gg t$, тому, нехтуючи величиною t порівняно з $2R$, одержуємо

$$r^2 = 2Rt. \quad (5)$$

Із (5) визначаємо товщину зазору

$$t = r^2 / 2R. \quad (6)$$

Для темних кілець з номерами k і m з умов (2), (3) і (6) одержуємо

$$\begin{aligned} (2k + 1) \lambda / 2 &= r_k^2 / 2R + \lambda / 2, \\ (2m + 1) \lambda / 2 &= r_m^2 / 2R + \lambda / 2. \end{aligned}$$

Із останніх співвідношень одержуємо формулу для обчислення радіуса кривизни лінзи за даними вимірювань радіусів темних кілець Ньютона

$$R = (r_k^2 - r_m^2) / ((k - m) \lambda). \quad (7)$$

За відомим радіусом кривизни R лінзи і показником заломлення скла n можна тепер обчислити оптичну силу лінзи D за співвідношенням

$$D = (n - 1) (1 / R_1 - 1 / R_2) \quad (8)$$

Для задіяної в роботі плоско-опуклої лінзи $R_1 = R$, $1 / R_2 = 0$, і з (8) одержуємо

$$D = (n - 1) / R. \quad (9)$$

Головна фокусна відстань лінзи знаходиться як величина, обернена до оптичної сили: $F = 1/D$. Якщо фокусна відстань лінзи вимірюється в метрах, то оптична сила буде виражена в діоптріях.

В даній роботі для вимірювань застосовується червоне монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм. Пучок світла від лампи розжарення L (рис.2) проходить через світлофільтр Φ , падає на скляну пластину C , частково відбивається, падає на систему лінза-пластинка, зазнавши розщеплення на когерентні промені, повертається на пластинку C і, частково проникаючи в неї, потрапляє в мікроскоп. В об'єктиві відлікового мікроскопа вмонтована шкала для вимірювань. Ціна поділки шкали залежить від положення тубуса мікроскопа і підбирається згідно з табл.1.

Таблиця 1

Довжина тубуса, мм	130	140	150	160	170	180
Ціна поділки шкали, мм	0,058	0,053	0,049	0,045	0,041	0,038

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтесь з установкою. увімкніть в мережу джерело світла. Підіймаючи і опускаючи тубус мікроскопа, добийтесь чіткого зображення кілець. Повертаючи тубус навколо осі, встановіть шкалу мікроскопа вздовж діаметра кілець.

2. За допомогою окулярної шкали виміряйте діаметр другого, третього, четвертого та п'ятого кілець з точністю до 0,5 поділки шкали. Визначте діаметр кілець d , а потім і радіуси їх.

3. Обчисліть за (7) радіус кривизни лінзи R в метрах, комбінуючи попарно радіуси кілець. Знайдіть середнє значення $R_{\text{ср}}$ і оцініть похибки вимірювань.

4. За (9) обчисліть оптичну силу лінзи D ($n = 1,62$), а потім головну фокусну відстань лінзи F . Результати вимірювань і розрахунків подайте в табл. 2.

Таблиця 2

k	r		Комбінація кілець k-m	R	$(\Delta R)^2$	D	F
	поділок	мм					
2			2-4				
3			2-5				
4			3-4				
5			3-5				

Дайте відповіді на запитання:

1. Які джерела світла називаються когерентними?
2. Що означає різке викривлення кілець Ньютона?
3. Чому в роботі використовуються темні кільця, а не світлі?

Лабораторна робота № 43.

Дослідження лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки.

Прилади і приладдя: оптичний квантовий генератор (лазер), дифракційна ґратка, шкала з фоторезистором, що переміщується, мікроамперметром з сухим елементом.

Мета роботи: засвоїти принцип дії лазерів і визначення довжини хвилі лазера за допомогою дифракційної ґратки.

Коротка теорія і методика вимірювань

В основі роботи квантових генераторів лежить явище індукованого випромінювання, суть якого полягає ось у чому. Нехай електрон в атомі знаходиться у двох станах 1 і 2 (рис. 1), що характеризується енергіями W_1 і W_2 .

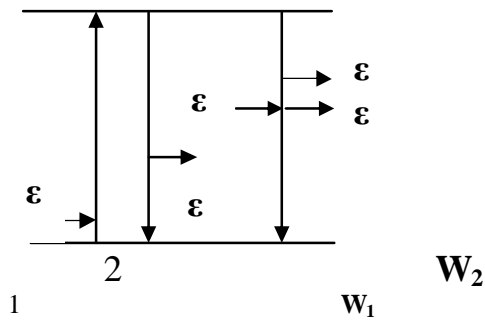


Рис.1

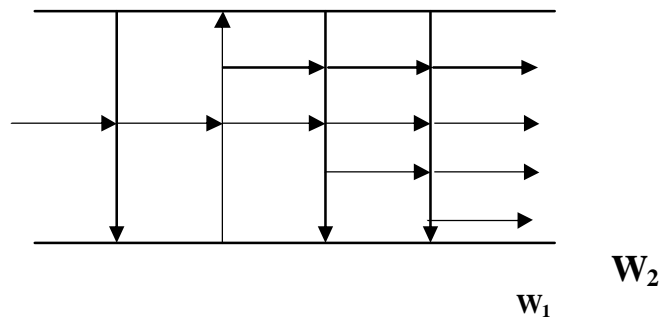


Рис.2

Щоб перевести електрон з рівня 1 на більш високий енергетичний рівень 2, йому треба надати енергії $\epsilon = h \nu$, де h - стала Планка, що дорівнює $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; ν - частота випромінювання, що поглинається. Енергія фотона, що поглинається, має бути не менша за різницю $W_2 - W_1$.

Із стану 2 в стан 1 електрон може повернутися двома способами. Перший – самодовільний - спонтанний перехід з випроміненням фотона з енергією ϵ , що дорівнює поглинутій енергії.

Оскільки різні атоми випромінюють незалежно один від одного, то спонтанне випромінення є некогерентним.

Другий спосіб повернення електрона в стан W_1 - індукований перехід під дією випромінювання з енергією фотонів ϵ , рівною різниці енергій $W_2 - W_1$. Супроводжуюче індуковані переходи випромінювання має ту ж частоту, спрямованість поширення, поляризацію і фазу, що і вимушуюче випромінювання. Однаковість фаз вимушуючого і індукованого випромінювань зумовлює когерентність індукованого випромінювання.

Звичайно під дією випромінювання з енергією ϵ відбуваються одночасно як переходи електронів у збуджений стан, так і індуковані переходи в стан нормальний. В системах, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги, найбільше число електронів знаходиться в стані 1, тому під дією зовнішнього випромінювання переважно йдуть процеси поглинання випромінювання з переходом в стан 2. Якщо ж створити таку систему, в якій число електронів у збудженому стані більше, ніж в основному стані (на нижньому рівні), то випромінювання з енергією ϵ викличе переважно індуковане випромінювання. Схема цього процесу подана на рис.2.

Системи, у яких число електронів у збудженому стані більше, ніж в основному, називають системами з інверсною заселеністю рівнів. Такі системи використовуються на практиці для створення квантових генераторів. Квантовий генератор, що випромінює в діапазоні довжин хвиль видимого світла, носить назву лазера. Цей термін утворений початковими буквами слів англійської фрази, що означає “ підсилення світла за допомогою індукованого випромінювання”. В нинішній час випускаються різні марки лазерів, інверсна заселеність в яких робиться оптичною накачкою, в результаті пропускання електричного струму або за допомогою газового розряду.

В даній роботі вивчається гелій-неоновий лазер, в якому інверсна заселеність створюється газовим розрядом. Робоча речовина в даному типі лазерів – гелій-неонова суміш газів під тиском близько 1 мм. рт. ст. – міститься у кварцевій трубці, на кінцях якої розміщені два дзеркала: одне – з високою відбиваючою здатністю,

друге – напівпрозоре. Газовий розряд в трубці підтримується високочастотним генератором. Напівпрозоре дзеркало поглинає до кількох відсотків падаючого на нього світла, а решта випромінювання відбиває у випромінююче середовище. В результаті кожний фотон, перш ніж вийти через напівпрозоре дзеркало, багаторазово пронизує активну речовину лазера, викликаючи індуковане випромінювання багатьох збуджених атомів. Цим досягається велика густина випромінювання. Багаторазово можуть відбитися від дзеркала тільки ті промені, що падають на дзеркало під малими кутами, тому випромінювання зосереджено в межах вузького тілесного кута. Цим визначається можливість одержання в лазерах променів великої яскравості і малої розбіжності.

Характерні особливості лазерного випромінювання:

1. Спрямованість випромінювання. Світловий потік зосереджений в межах малого тілесного кута з отвором не більше ніж $30''$ (у прожекторів цей кут в сотні разів більший).
2. Когерентність. Інші джерела когерентного світла невідомі.
3. Поляризованість. Повністю поляризовані малоінтенсивні промені від інших джерел можна одержати тільки за допомогою додаткових приладів.
4. Монохроматичність. Інші джерела дають випромінювання в широкому інтервалі довжин хвиль.

Визначення довжини хвилі випромінювання лазера в даній лабораторній роботі проводиться за допомогою установки, схема якої подана на рис.3. Світло від лазера падає на дифракційну ґратку ДР, при цьому на екрані Е спостерігається дифракційна картина. Умова спостереження максимумів освітленості на екрані визначається рівнянням:

$$b \sin \varphi = k\lambda, \tag{1}$$

де λ - довжина хвилі випромінювання лазера; $k = 0, 1, 2, \dots$ - порядок дифракційного максимуму; b - стала дифракційної ґратки, яка дорівнює відстані між сусідніми щілинами; φ - дифракційний кут, що знаходиться між первинним пучком і напрямком на максимум k -го порядку. Згідно з рис.3 кут φ може бути визначений за співвідношенням

$$\sin \varphi = l / \sqrt{L^2 + l^2}. \tag{2}$$

Визначення довжини хвилі випромінювання лазера в даній роботі проводиться за допомогою установки, схема якої приведена на рис. 3.

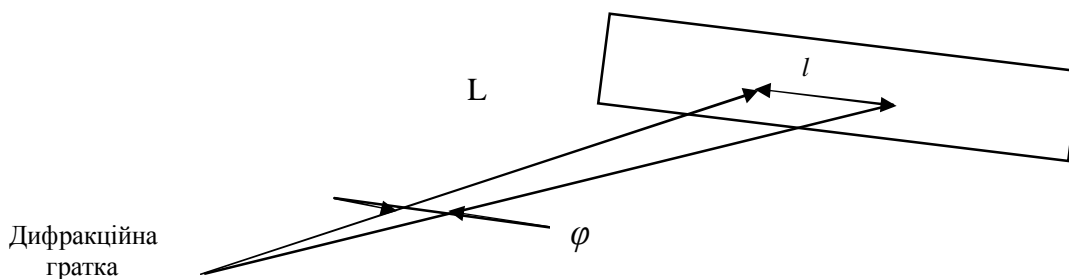


Рис. 3.

Відстань L від дифракційної ґратки до екрана змінюється переміщенням екрана вздовж підставки і визначається масштабною лінійкою. Відстань l визначається по шкалі на екрані. Оскільки дифракційні максимуми на екрані розмиті, то візуальне визначення положення максимуму до деякої міри утруднене. В зв'язку з цим реєстрація освітленості на екрані доповнюється фотоелектричною приставкою. Фотоелектрична приставка складається із фоторезистора, закріпленого на повзунку, який переміщується вздовж екрану. Виводи від фоторезистора підводяться до мідних шин, з'єднаних з мікроамперметром, всередині якого вмонтовано сухий елемент. Положення максимуму визначається положенням щілини фотоелемента, що відповідає найбільшому струмові.

Порядок виконання роботи:

1. Підімкніть виводи контактів, розміщених на екрані, до мікроамперметра і зафіксуйте величину темного струму.
2. З дозволу викладача увімкніть лазер в мережу і вивчіть дифракційну картину.
3. Установіть екран на вказаній викладачем відстані L від дифракційної ґратки перпендикулярно до напрямку первинного пучка лазера.
4. Перемішуючи фоторезистор вздовж екрана, знайдіть положення трьох максимумів I_1', I_2', I_3' праворуч від нульового максимуму та I_1'', I_2'', I_3'' ліворуч від нульового максимуму, відповідаючих максимумам фотоструму.
5. Знайдіть положення максимумів як середнє між вимірами праворуч і ліворуч: $I_1 = (I_1' + I_1'') / 2$, $I_2 = (I_2' + I_2'') / 2$ і т.д.
6. Користуючись формулою (2), за даними I_1, I_2, I_3 визначіть величину $\sin \varphi$.
7. Визначіть довжину хвилі лазера за (1). За трьома одержаними λ значеннями визначіть $\lambda_{ср}$ і оцініть похибки вимірювань.

Дані вимірювань і розрахунків подайте в таблиці:

k	I'	I''	I	$\sin \varphi$	λ , нм	$(\Delta\lambda)^2$
Середні значення						

Дайте відповіді на запитання:

1. Що становить принципову основу дії лазера ?
2. Які речовини можуть бути робочими в лазерах ?
3. Де можна використати характерні властивості лазерів ?
4. Чим визначаються похибки вимірювань в умовах методу, що вивчається ?

Дослідження температури нитки розжарення за допомогою оптичного пірометра.

Прилади та приладдя: пірометр з джерелом живлення на 6В, амперметром 0,5А, вольтметр на 150В, реостат на 3200Ом, досліджувана лампа розжарення в корпусі освітлювача.

Мета роботи: засвоїти застосування оптичного пірометра.

Коротка теорія та методика вимірювань

Методи оптичної пірометрії використовуються для вимірювань високих температур від 800°C і вище. При вимірюваннях вони не потребують безпосереднього контакту з вимірюваним середовищем і дозволяють вимірювати температури розжарених тіл на великих відстанях від них. В основу оптичної пірометрії покладено закони теплового випромінювання.

Тепловим називають електромагнітне випромінювання тіл, нагрітих вище 0 К, що здійснюється за рахунок енергії теплового руху атомів. Для різних тіл спектральний склад випромінювання різний і змінюється зі зміною температури тіл, але у всіх тіл з підвищенням температури збільшується частка випромінювання, що припадає на короткі довжини хвиль. При низьких температурах випромінюється в основному інфрачервоні промені. Розжарені тіла, поряд з інфрачервоними, випромінюють видимі і ультрафіолетові промені. Для характеристики теплового випромінювання користуються поняттям повної променевипромінювальної та спектральної променевипромінювальної здатності $r(\lambda)$.

Повною променевипромінювальною здатністю R_e , або енергетичною світимістю тіл, називають фізичну величину, що чисельно дорівнює потужності випромінювання з одиниці площі поверхні тіла. Розподіл енергії за довжиною хвиль визначається спектральною променевипромінювальною здатністю, що дорівнює потужності, яка випромінюється з одиниці площі поверхні тіла в одиничному інтервалі довжин хвиль.

$$r_{\lambda} = \Delta R_{\lambda} / \Delta \lambda. \quad (1)$$

Тут ΔR_{λ} – потужність випромінювання з одиниці площі поверхні в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + \Delta \lambda$.

Одночасно з випромінюванням тіло поглинає випромінювання, що падає на нього. Для характеристики поглинальної здатності тіл користуються спектральною променепоглиною здатністю a_{λ}). Спектральною променепоглиною здатністю тіл називають відношення променевої енергії $\Delta W'_{\lambda}$ поглинутої тілом в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + \Delta \lambda$, до падаючої на нього енергії ΔW_{λ} в тому ж діапазоні довжин хвиль:

$$a_{\lambda} = \Delta W'_{\lambda} / \Delta W_{\lambda}. \quad (2)$$

В нерівноважному стані температура тіла може підвищуватись або знижуватись в залежності від того, переважає поглинання чи випромінювання енергії тілом. В стані рівноваги енергія, що поглинається, дорівнює тій, що випромінюється, і температура тіла залишається сталою. Для тіл в стані термодинамічної рівноваги справедливий закон Кірхгофа: відношення променевипромінювальної здатності тіла до його променепоглиною здатності не

залежить від природи тіла, є універсальною функцією довжини хвилі випромінювання та температури і являє собою променевипромінювальну здатність абсолютно чорного тіла (АЧТ) при тій же температурі.

$$r_{\lambda} / a_{\lambda} = f(\lambda, T). \quad (3)$$

Абсолютно чорним тілом називається таке тіло, променепоглиналина здатність якого дорівнює одиниці в усьому діапазоні довжин хвиль. Моделлю АЧТ може бути зачорнена порожнина циліндра з обох торців, в одному з яких є малий отвір. Для АЧТ експериментально встановлені такі закони.

1. Закон Стефана-Больцмана: енергетична світимість АЧТ пропорційна червертій степені абсолютної температури тіла

$$R_e = \sigma T^4, \quad (4)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – стала закону Стефана-Больцмана.

2. Закон Віна: довжина хвилі, на яку припадає максимум променевипромінювальної здатності АЧТ, обернено пропорційна абсолютній температурі тіла:

$$\lambda_{\text{max}} = C / T, \quad (5)$$

де $C = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м К}$ - стала закону Віна.

Закон випромінювання АЧТ достатньо точно виконується для газової оболонки Сонця, для отворів в печах, для пористих зачорнених поверхонь інших тіл.

Загальний вигляд універсальної функції $f(\lambda, T)$ теоретично обгрунтував М. Планк в 1900 р. Вигляд цієї функції такий:

$$f(\lambda, T) = \frac{A\lambda^5}{\exp(B/\lambda T) - 1}, \quad (6)$$

де A і B - сталі коефіцієнти.

Як видно з наведених формул (4) і (5), за вимірними R_e та λ_{max} можна робити висновки про температуру АЧТ. На цьому основані методи оптичної пірометрії, а саме в одному з методів використовується закон Віна, в якому за знайденою λ_{max} визначають температуру тіла

$$T = C / \lambda_{\text{max}}. \quad (7)$$

В даній лабораторній роботі вивчається метод визначення температури за допомогою оптичного пірометра зі зникаючою ниткою (рис. 1) В цьому методі порівнюють яскравість досліджуваного тіла з яскравістю нитки еталонної лампи пірометра. При однаковій яскравості досліджуваного тіла і нитки еталонної лампи пірометра температура тіла вважається однаковою з температури нитки, якщо досліджуване тіло можна вважати АЧТ. В пірометрі різке зображення еталонної нитки розжарення одержують через переміщення окуляра. Різке зображення досліджуваного тіла одержують переміщенням об'єктива і самого пірометра. Зображення еталонної нитки має бути суміщене з зображенням досліджуваного тіла. Для виділення інтервалу довжин хвиль близько $\lambda=660 \text{ нм}$ застосовують червоний світлофільтр, що вводиться в поле зору окуляра. При вимірюваннях, поступово повертаючи кільце реостата пірометра, змінюють опір в колі розжарення еталонної нитки і підбирають такий електрострум, щоб яскравість еталонної нитки співпадала з яскравістю досліджуваного тіла.

Стрілка гальванометра на пірометрі показує при цьому температуру еталонної нитки (шкала пірометра має градування за температурою АЧТ) .

Для реальних тіл при вимірюваннях вводиться поправка, яка враховує їх відміну від АЧТ. При однаковій яскравості в області довжин хвиль істинна температура T і визначена за шкалою пірометра T' , пов'язані співвідношенням

$$1/T - 1/T' = \ln a_\lambda / b, \quad (8)$$

де a_λ - спектральна поглинальна здатність досліджуваного тіла; $b = V/\lambda$ (V - з формули Планка).

Для тіл, випромінювання яких близьке до випромінювання АЧТ, $\ln a_\lambda$ близький до 0, тому для них $T = T'$.

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть схему згідно з рис.2 і за допомогою реостата доведіть розжарення нитки досліджуваної лампи до мінімального свічення.

2. Сумістіть поділку 0 поворотного кільця реостата і корпуса пірометра і під'єднайте до джерела струму, суворо дотримуючись полярності.

3. Спостерігаючи в окуляр, доможіться слабого розжарення еталонної нитки поворотом кільця пірометра за годинниковою стрілкою.

4. Переміщуючи окуляр, одержить чітке зображення еталонної нитки. Наведіть пірометр на нитку досліджуваної лампи і переміщенням об'єктиву доможіться її різкого зображення.

5. Введіть в поле зору червоний світлофільтр.

6. Поворотом кільця реостата добийтеся однакової яскравості еталонної і досліджуваної ниток в місці їх перетину. Запишіть показання пірометра T' . На чільному боці пірометр має три шкали для вимірювань температур від 800°C до 5000°C . В даній роботі використовується перша шкала. При використанні інших шкал в поле зору вводяться димчасті світлофільтри.

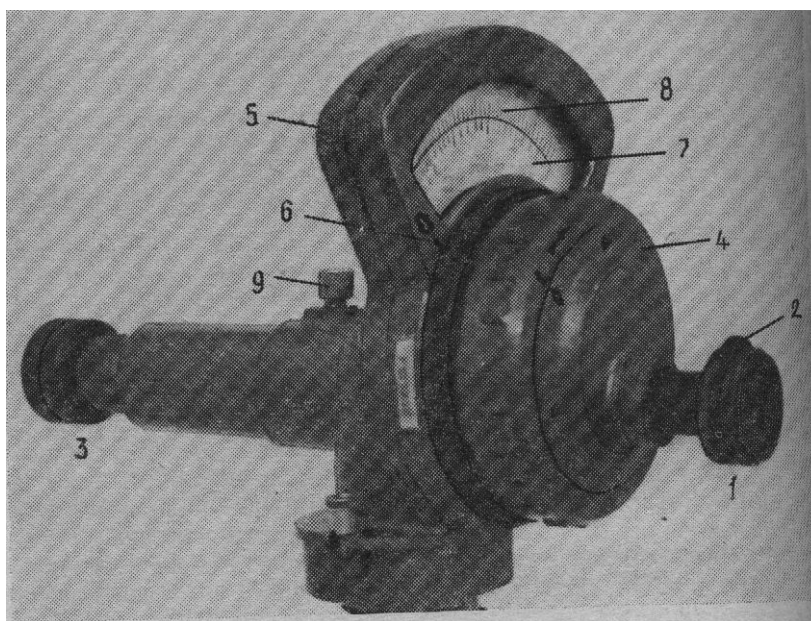


Рис. 1

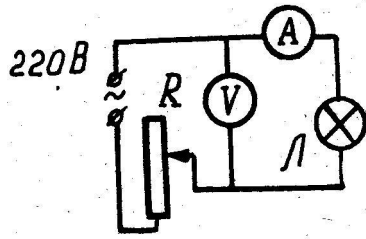


Рис.2

7. Запишіть показання амперметра I і вольтметра U в колі досліджуваної лампи.

8. Змінюючи з допомогою реостата R (рис. 1) розжарення лампи $Л$ і кожен раз виконуючи дії пунктів 6 –7, зробіть вимірювання температури для п'яти значень потужності, споживаної лампою $Л$, починаючи з мінімальної і закінчуючи тією, котра не виходить за межі температур $1000-1100^{\circ}\text{C}$.

9. Вимкніть струм в пірометрі і вимкніть лампу $Л$.

10. За формулою (8) визначіть істинну температуру, приймаючи для вольфрамої нитки $a_{\lambda} = 0,8$ і $b = 95600$ ($\ln a_{\lambda} = -0,22$).

11. Обчисліть потужність, споживану лампою $Л$, за співвідношенням $P=IU$. Дані вимірювань та розрахунків подайте в таблиці:

№	I	U	P	T'	T

12. Побудуйте графік залежності температури нитки лампи розжарення від споживаної потужності.

Дайте відповіді на запитання:

1. Які тіла можна вважати абсолютно чорними?
2. Які методи вимірювання температури Вам відомі?
3. При яких температурах методи оптичної пірометрії є єдино можливими методами вимірювання температури?

Лабораторна робота №45.

Вивчення вольт-амперної характеристики вакуумного фотоелемента.

Прилади та приладдя: фотоелемент, мікроамперметр, вольтметр на 300В, джерело постійної напруги на 300 В, джерело світла, оптичний ослін.

Мета роботи: ознайомитись з властивостями вакуумного фотоелемента.

Коротка теорія та методика вимірювань

В основу роботи вакуумних фотоелементів покладено явище фотоелектричного ефекту (фотоелектру).

Під фотоелементом мають на увазі явище виривання електронів різними видами випромінювань. Якщо електрони, відірвані світлом від атомів, залишаються в межах

тіла, то фотоефект називається внутрішнім, якщо ж електрони виходять за межі тіла, то – зовнішнім.

Явище зовнішнього фотоефекту вперше виявлено Герцем, а потім детально досліджене Столетовим та іншими вченими. В закономірностях фотоефекту чітко виявляються квантові властивості світла. Теорія зовнішнього фотоефекту розроблена Ейнштейном, який припустив, що світло не тільки випромінюється квантами, як це встановив М. Планк, але й поглинається також квантами. Ейнштейн ввів поняття про частку - фотон, енергія якого пов'язана з частотою світла співвідношенням

$$\varepsilon = h \nu, \quad (1)$$

де h - стала Планка; ν - частота випромінювання.

При дії на речовину світла з довжиною хвилі $\lambda > 200 \text{ нм}$ поглинання світла відбувається в поверхневому шарі речовини. Виявляється справедливим співвідношення Ейнштейна:

$$h \nu = A + m\nu^2 / 2, \quad (2)$$

де A - робота виходу електрона з поверхневого шару речовини; $m\nu^2 / 2$ - кінетична енергія вирваного електрона.

На основі теорії Ейнштейна успішно пояснюються закономірності зовнішнього фотоефекту, а саме той факт, що фотоефект спостерігається не при довільних частотах. Якщо зменшувати частоту падаючого випромінювання, то, згідно з (2), зменшується кінетична енергія вилітаючих електронів, а при деякій частоті ν_k кінетична енергія електронів дорівнює нулю. При ще менших частотах фотоефект не виникає. Ця мінімальна частота, при якій ще спостерігається фотоефект, має назву червоної межі фотоефекту. При частотах, що перевершують граничну частоту, число вирваних фотоелектронів пропорційне падаючому світловому потокові.

В даній роботі досліджується вакуумний сурм'яно-цезієвий фотоелемент з центральним анодом. Цей фотоелемент являє собою скляний балон, на одну половину внутрішньої поверхні якого нанесені один на одній тонкі шари сурьми і цезію шляхом конденсації пари цих металів у вакуумі. Утворене при цьому з'єднання грає роль катода, який має малу роботу виходу для електронів. Червона границя фотоефекту знаходиться у видимій області спектру, тому фотоефект спостерігається при освітленні видимими променями.

Електрони, що вириваються світлом з освітленого катода, захоплюються на анод електричним полем. Фотострум, що йде в колі фотоелемента і увімкненій батареї, вимірюється мікроамперметром.

В роботі вивчається одна із основних характеристик фотоелементу - залежність сили фотоструму I від прикладеної до фотоелементу напруги U . За даними вимірювань будується графік залежності $I = f(U)$ - вольт-амперна характеристика фотоелемента.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтеся з приладами і установкою, зберіть електричне коло за схемою (рис .1,2), застосовуючи джерелом струму випрямляч на 220 В.

2. Установіть джерело світла на відстані 35см від фотоелементу. Установіть найменшу напругу на потенціометрі R , включіть джерело світла в мережу, відкрийте ковпачок фотоелементу і запишіть значення струмів, підвищуючи потенціометром

напругу від 0 через 5-10В до максимальної, допустимої діапазоном струмів, вимірюваних мікроамперметром.

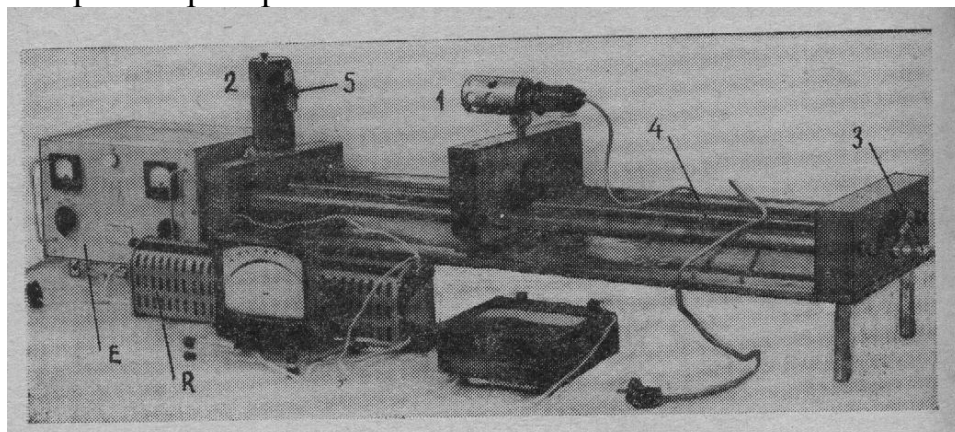


Рис .1

3. Виконайте вимірювання за пунктом 2 для відстаней 25 та 15см між лампою та фотоелементом.

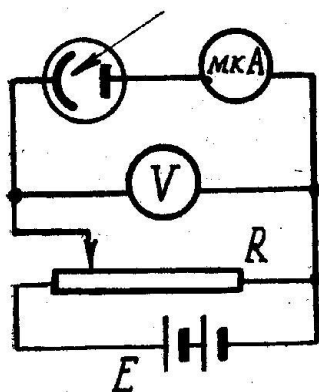


Рис.2

4. Результати вимірювань занесіть до таблиці. В одній координатній системі $I=f(U)$ побудуйте на міліметровому папері три вольт-амперні характеристики фотоелемента.

№	U	I для 15 см	I для 25 см	I для 35 см
1				
2				
...				
30				

Дайте відповіді на запитання:

1. Які характерні особливості вольт-амперної характеристики вакуумного фотоелемента?
2. Які причини виникнення струму насичення?
3. Як залежить сила струму насичення від величини падаючого на фотоелемент світлового потоку?

Лабораторна робота № 46.

Визначення чутливості напівпровідникового фотоелементу.

Прилади та приладдя: установка з селеновим фотоелементом, мікроамперметр, джерело світла, трансформатор.

Мета роботи: вивчення принципу роботи напівпровідникових фотоелементів і визначення їх чутливості.

Коротка теорія та методика вимірювань

Напівпровідниковий фотоелемент можна схематично представити таким, що складається з приведених до контакту напівпровідників р – і n - типів і двох електродів (рис.1). Електрони (чорні крапки) із n- напівпровідника і дірки (кружки) із р-напівпровідника дифундують через контактний шар і закріплюються на атомах домішки (+ і -) до тих пір, доки виникаюча і зростаюча різниця потенціалів не перешкодить їх подальшому переходові. В результаті цього контактний шар у n - напівпровідника заряджається позитивно, а у р-напівпровідникові - негативно. На грані цих напівпровідників (у р–n-переході) утворюється так званий подвійний електричний шар товщиною l (рис.1,а), що створює поле напруженістю E , спрямоване від n-напівпровідника до р-напівпровідника.

Товщина шару має порядок 10^{-5} см, контактна різниця потенціалів у шарі порядку 0,1 – 0,5В. Таку різницю потенціалів (потенціальний бар'єр) можуть подолати тільки електрони, що мають велику кінетичну енергію, відповідну кільком тисячам градусів. При нормальній температурі шар l є непроникним (має надвеликий опір) для переходу електронів у напрямку від n до р, а дірок - від р до n. В зв'язку з цим пограничний шар називають запираючим, а фотоелементи, дія котрих основана на його використанні, носять назву фотоелементів з запираючим шаром. Важливою характерною особливістю електричного поля в області контакту є те, що воно виштовхує в область контакту електрони в n-напівпровідник, а дірки - в р-напівпровідник.

При опроміненні приконтактного шару світлом, енергія фотонів якого достатня для відриву електрона від атому, в напівпровідникові утворюються вільні електрони і дірки. Явище відриву електронів від атомів внаслідок поглинання ними світла називається фотоелементом . Якщо процес завершується виходом електронів за межі речовини, фотоелемент називається зовнішнім, якщо ж електрони залишаються всередині речовини - внутрішнім.

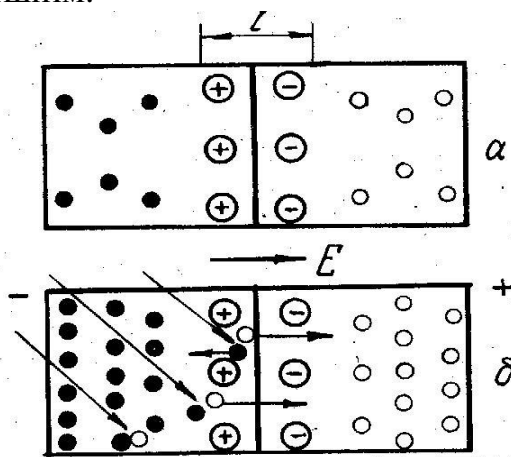


Рис. 1

На рис.1,б показано утворення електронів і дірок при освітленні n -напівпровідника. Фотони зображені стрілками. В даному випадку при освітленні n -напівпровідника внутрішній фотоефект призводить до виникнення вільних електронів і дірок незалежно від того, який напівпровідник освітлюється. Електрони і дірки, що вивільнилися в результаті дифузії, досягають області контакту. Електричне поле виштовхує електрони назад в n -напівпровідник, а дірки перекидаються в p -напівпровідник. В результаті в n -напівпровіднику концентруються електрони, і він заряджається негативно, а на p -напівпровідникові концентруються дірки, і він заряджається позитивно. Між шарами напівпровідників утворюється різниця потенціалів, яка є ЕРС фотоелемента. При замиканні електродів фотоелемента на зовнішнє коло у ньому піде електричний струм (фотострум), величина якого пропорційна кількості дірок, що утворюються в одиницю часу і дифундують через контактний шар. Фотострум приблизно пропорційний падаючому на фотоелемент світловому потокові.

Напівпровідникові фотоелементи є безпосередніми перетворювачами світлової енергії в електричну. Для одержання великих ЕРС і струмів ці фотоелементи збирають у батареї на загальному каркасі, з'єднуючи їх в групи послідовно та паралельно. Батареї, зібрані з напівпровідникових фотоелементів та призначені для використання випромінювання Сонця, дістали назву сонячних. Сонячні батареї мають широке застосування.

В даній роботі вивчається селеновий фотоелемент. Він складається (рис .2) із сталевий пластинки 1, що є одним з електродів, покритої тонким шаром селену 2 з дірковою провідністю. Зверху селену шляхом розпилення нанесений тонкий напівпрозорий шар срібла 3, що слугує другим електродом. В процесі напилення атоми срібла проникають в прилягаючий шар селену і надають йому електронної провідності; між верхнім та нижнім шарами селену утворюється запираючий шар. Фотоелемент міститься в пластмасовому відкритому зверху корпусі 4, на якому закріплені затискачі, з'єднані з електродами.

Важливою характеристикою фотоелемента є його чутливість. Чутливістю фотоелемента називають відношення величини струму - i , що дає фотоелемент, до величини падаючого на нього світлового потоку Φ

$$\gamma = i / \Phi. \quad (1)$$

Чутливість звичайно виражають в мікроамперах на люмен. Світловий потік визначають як добуток освітленості на площу світлочутливого шару фотоелемента: $\Phi = ES$. Освітленість поверхні фотоелемента пропорційна силі світла I , обернено пропорційна квадрату відстані r від джерела світла до фотоелемента і залежить від кута падіння променів α на освітлювану поверхню

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

При нормальному падіння променів на фотоелемент косинус дорівнює 1, і чутливість фотоелемента може бути подана як

$$\gamma = i / \Phi = i r^2 / IS.$$

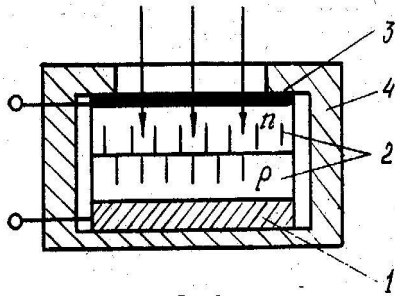


Рис. 2

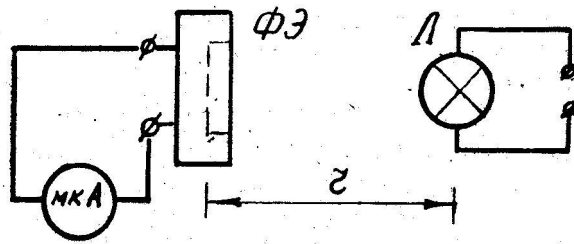


Рис. 3

Якщо D - діаметр діафрагми, відкриваючої світлочутливий шар на поверхні фотоелемента, то $S = \pi D^2 / 4$, і чутливість фотоелемента подається співвідношенням

$$\gamma = \frac{4ir^2}{I\pi D^2} \quad (3)$$

Порядок виконання роботи:

- Зберіть схему згідно з рис. 3. Відведіть лампу розжарення на велику відстань r від фотоелемента.
- Увімкніть лампу і, поступово наближаючи її до фотоелемента, добивайтеся відхилення стрілки мікроамперметра на 2-3 поділки.
- Наближаючи лампу через кожні 3 – 5 см, запишіть відстані і відповідні фотоструми.
- Для кожної відстані обчисліть чутливість фотоелемента за формулою (3). Результати вимірювань і розрахунків подайте в таблиці. Оцініть похибки вимірювань:

№№	r	i	I	D	γ	$(\Delta\gamma)^2$
1						
2						
3						
...						
Середні значення						

Дайте відповіді на запитання:

- Чому із зменшенням відстані від фотоелемента до джерела світла сила фотоструму збільшується?
- Який принцип роботи напівпровідникового фотоелемента?
- Як залежить чутливість фотоелемента від відстані до джерела світла?

Дослідження розчинів оптично активних речовин поляризованим світлом.

Прилади та приладдя: поляриметр, набір циліндричних кювет з розчинами цукру різних концентрацій.

Мета роботи: засвоїти метод визначення концентрацій водних розчинів цукру за кутом повороту площини поляризації світлового променя.

Коротка теорія та методика вимірювань

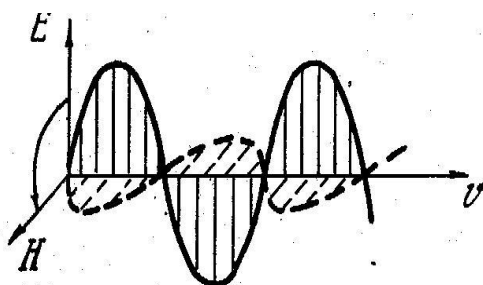


Рис. 1

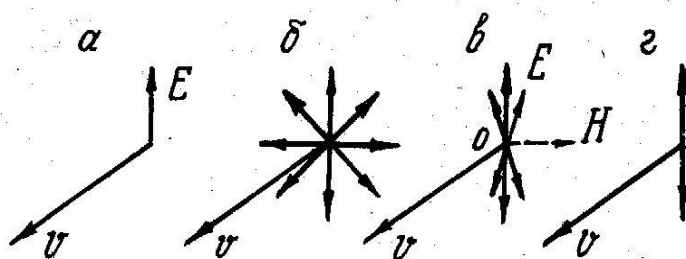


Рис. 2

Світло являє собою сукупність електромагнітних хвиль. Електромагнітна хвиля, як процес поширення в просторі зв'язаних між собою змінного електричного і магнітного полів, носить поперечний характер, тобто напруженості електричного E та магнітного H полів в хвилі направлені перпендикулярно до швидкості її поширення v . Крім того вектори E і H взаємно перпендикулярні і їх зміна в хвильовому процесі відбувається синфазно (Рис.1). Хімічна та біологічна дія світла в основному пов'язана з електричною складовою поля електромагнітної хвилі. Тому вектор напруженості електричного поля E називають світловим вектором.

Природне світло випромінюється сукупністю багатьох окремих атомів джерела світла. Цей процес відбувається неузгоджено, як кажуть, некогерентно, тому коливання світлових векторів окремих хвиль для будь-якого променя світла здійснюються в різних, довільно орієнтованих площинах. Таким чином, для природного світла характерний рівномірний розподіл напрямків векторів E відносно осі променя. Якщо один із напрямків такого розподілу стає переважаючим, то говорять про частково поляризований світловий промінь. Зокрема, коли коливання вектора відбувається тільки в одній площині, то такий промінь називають плоскополяризованим. На рис. 2. схематично зображені б/ - природний промінь світла: в/ - частково і а,г/ - плоскополяризований світлові промені (напрям

поширення променя v перпендикулярний до площини рисунка, (вектори на рисунку відповідають амплітудним значенням).

Існують різні способи одержання плоскополяризованого світла, але основними є способи, засновані на подвійному заломленні променів, коли в деяких кристалах з'являються два заломлених промені, котрі обидва є плоскополяризовані.

Існують кристали, в яких один з поляризованих променів повністю поглинається, і на виході з кристалу одержують повністю плоскополяризоване світло. Якщо на шляху поширення поляризованого світла поставити подібний кристал, то в залежності від орієнтації кристалу щодо площини поляризації променя, із кристалу може вийти промінь, але може і поглинутися в кристалі. Обладнання, що створює поляризоване світло, називають поляризатором, а те, з допомогою якого можна провести аналіз поляризованого світла, - аналізатором. Якщо після аналізатора при довільних його орієнтаціях по відношенню до падаючого променя виходить світло незмінної інтенсивності, то таке світло або природне, або поляризоване за колом. В даній роботі поляриметр (цукрометр) складається з поляризатора і аналізатора. Поляризатором П на рис.3 є плівка поляроїду, вставлена у віконце разом зі світлофільтром. Аналізатор А складається із двох поляроїдів з різними площинами пропускання. Світло від одного з поляроїдів потрапляє на одну частину світлового поля, а від другого – на іншу. Інколи цими частинами поля зору є дві половинки кругового поля зору, іноді ж ці дві частини поля зору являють картину, подану на рисунку 3,а. Така конструкція аналізатора забезпечує найбільш точну установку аналізатора, внаслідок чого підвищується точність вимірювань, тому що око найбільше розрізняє контраст освітленостей двох сусідніх ділянок.

Метод вимірювань ґрунтується на використанні явища повороту площини поляризації. Ряд речовин (кварц, розчини цукру і деяких білків) має властивість повертати площину поляризації світла, що пройшло крізь них. Кут повороту площини поляризації пропорційний товщині шару речовини l і концентрації розчину c :

$$\Delta\psi = \alpha c l. \quad (1)$$

Величина α називається питомим обертанням або сталою обертання, вона залежить від довжини хвилі світла і характерна для кожної речовини. При малих концентраціях розчинів c залежністю α від c можна знехтувати, що полегшує виміри.

В даній роботі вимірювання проводять так. Дивляться в окуляр поляриметра і повертають аналізатор доти, поки щезне різниця освітленостей різних ділянок світлового поля. При отриманні рівномірної освітленості поля зору треба зафіксувати положення аналізатора по градусній шкалі. Тепер в світловий промінь можна помістити кювету з досліджуванним розчином. Поле зору при наявності кювети з розчином стає неоднорідним, і для досягнення його рівномірної освітленості доводиться повернути аналізатор на кут $\Delta\psi$, що дорівнює куту повороту площини поляризації променя в розчині. Різниця кутів відліку положень аналізатора з кюветою і без неї визначає кут повороту площини поляризації. Якщо відомо питоме обертання $\Delta\psi$ для досліджуваної речовини, то при відомому куті повороту аналізатора і довжини кювети l за формулою (1) можна визначити концентрацію розчину c .

Речовини, що повертають площину поляризації, називають оптично активними. В залежності від напрямку повороту за годинниковою стрілкою чи проти неї - їх поділяють на право- (+) і лівообертаючі (-).

В довідниках для найбільш розповсюджених оптично активних речовин наводяться значення питомого обертання α для жовтого світла натрію при $t = 20^\circ\text{C}$.

Порядок виконання роботи:

1. Увімкніть освітлювач поляриметра в мережу.

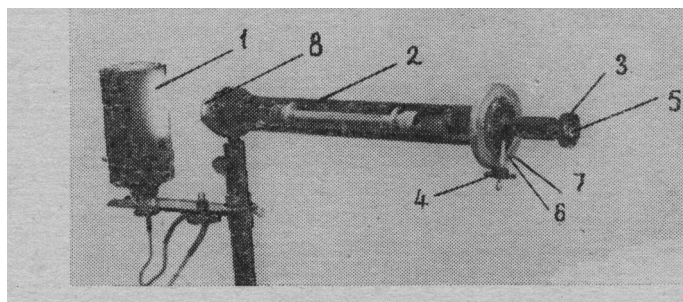


Рис.3

2. Закрийте кришку труби поляриметра. Спостерігаючи в окуляр маховика аналізатора знайдіть положення, що відповідає рівномірній освітленості поля зору.

3. Користуючись окуляром шкали, зробіть початковий відлік ψ_1 на лімбі градусної шкали .

4. Відкрийте кришку труби поляриметра, помістіть еталонну кювету з відомою концентрацією розчину c_1 і довжиною l_1 , закрийте кришку і обертанням маховика аналізатора знову добийтеся рівномірної освітленості поля зору. Зніміть відлік на градусній шкалі ψ_2 . За різницею показань визначить $\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2$ - кут повороту площини поляризації.

5. За формулою (1) визначте питоме обертання α для малої концентрації водного розчину цукру, користуючись значенням c_1 , l_1 і $\Delta\psi$.

6. Помістіть в поляриметр одну з кювет з розчином невідомої концентрації, повторіть дії пунктів 2 – 5 і визначте за (1) концентрацію розчину, користуючись знайденим значенням α .

7. Визначте концентрацію розчину в інших кюветах запропонованих викладачем. Результати вимірювань та розрахунків подайте в таблиці:

№ кювети	l	ψ_0	ψ	$\Delta\psi$	α	$c, \%$

Дайте відповіді на запитання:

1. Яка різниця між природним та плоскополяризованим світлом?
2. Якою оптично активною речовиною є цукор - праворуч чи ліворуч обертаючою?
3. Чи можна виконати вимірювання, змінивши місцями поляризатор і аналізатор?

РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Самостійна робота над навчальним матеріалом є головним видом роботи не тільки студента-заочника, але й кожного, хто бажає поглибити свої знання в будь-якій області людських знань. В умовах бурхливого нагромадження інформації цей вид надбання знань завжди буде основним.

При вивченні курсу фізики пропонується вести конспект, який би вмещував фізичні закони, основні формули, коротке викладення матеріалу, визначення фізичних величин, одиниць їх вимірювання, рисунки і короткі виводи формул. Конспект використовують при повторній та наступній проробці матеріалу. Матеріал вважається засвоєним, якщо студент може дати відповідь на поставлене питання в межах конспекту, який допоможе при швидкому повторенні матеріалу, тоді як підручник потребує більш тривалого часу.

Ньютон говорив, що при вивченні наук приклади часто бувають більш повчальні, аніж правила. Тому розв'язання задач є однією з найнеобхідніших умов засвоєння курсу фізики. Розв'язання задач ставить за мету кількісний аналіз фізичних явищ, закріплення матеріалу, практичне знайомство з основними співвідношеннями між фізичними величинами.

В курсі фізики велика різноманітність типів задач і, як наслідок, методів їх розв'язання. Пошук раціонального методу розв'язання конкретної задачі є творчим процесом, часто на рівні наукового дослідження. Всю роботу при розв'язанні задач можна систематизувати і тим оптимізувати творчий процес.

Беручись за розв'язання задачі, перш за все вивчають за підручником або конспектом лекцій відповідний розділ, знайомляться з одиницями вимірювання фізичних величин в Міжнародній системі одиниць.

Традиційно вважається найбільш зручною формою запису умови задачі і даних величин, якщо вони записуються стовпцем і зведені до однієї системи одиниць вимірювань (SI).

Для визначення шуканих величин рекомендується застосовувати будь-який із методів або їх сполучення: алгебраїчний, геометричний або графічний.

Зауважимо, що правильно складена схема або рисунок задачі часто мають вирішальне значення, тому що вони набагато полегшують обмірковування умови задачі. **Запам'ятайте:** ошадження часу на виконання рисунку цілком компенсується при розв'язанні задачі.

При обмірковуванні задачі рекомендується записувати співвідношення, що зв'язують шукані і задані величини. Якщо Ви не потребуєте записів деяких формул, то це означає, що ці співвідношення Вами засвоєні.

Система записаних і засвоєних Вами формул, за допомогою яких можна знайти всі невідомі величини, утворює схему розв'язку даної задачі.

Обчислення шуканої величини рекомендується робити за кінцевою формулою, в яку підставляють відомі величини, виміряні в одиницях SI.

Обчислення фізичних величин потрібно супроводжувати обов'язковим розрахунком їх розмірностей. Збіжність обчисленої розмірності з відомою заздалегідь не є гарантією правильного розв'язку задачі, але незбіжність розрахованої розмірності з відомою заздалегідь може бути критерієм неправильного розв'язку задачі.

Сучасні засоби обчислювальної техніки дозволяють оперувати багатозначними числами, що може спричинити ілюзії, що шукану величину можна визначити як завгодно точно. Проте це не так. При обчисленнях потрібно обмежувати кількість значущих цифр, що входять до одержаної розрахункової формули. В умові задаються вихідні дані, що є наближеними. Наближеність фізичної величини виражається завданням скінченного числа значущих цифр у числі, яке характеризує дану величину з кількісного боку. Наприклад, завдання прискорення вільного падіння числом $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ свідчить про наближення цього числа у другому знаку після десяткової коми. Справді величина може бути у проміжку від 9,806 до 9,814 м/с^2 . Остання цифра в числі завжди округлюється, якщо число не ціле. У зв'язку з цим будь-які арифметичні операції з сукупністю наближених чисел завжди призводять до числа, кількість точних значущих цифр у якого не більше, ніж у вихідного числа з найменшою кількістю значущих цифр.

Правила виконання контрольних робіт та самостійних завдань

Виконання робіт студент має розпочинати тільки після вивчення відповідного матеріалу і уважного розгляду прикладів розв'язання задач, які подаються в даному матеріалі.

Роботу виконують в учнівському зошиті, на обкладинці якого вказують прізвище, ініціали, факультет, номер завдання (роботи), група, факультет.

Задачам дають ті номери, під якими вони подані в даному збірнику. Умови задач потрібно переписати повністю, а потім подати скорочений запис. Для зауважень рецензента залишають береги у 3–4 см. Потрібні табличні величини використовують з додатку в цьому збірнику.

Розв'язок задач обов'язково супроводжують поясненнями, які виявляють значення вживаних формул, та рисунками.

Обов'язковий розрахунок розмірностей фізичних величин.

Якщо робота не зарахована, її переробляють з урахуванням зауважень. Повторно роботу подають разом з незарахованою. Якщо в зошиті досить місця, то повторна робота має бути подана в тому ж зошиті, що і незалікована, достатньо виправити тільки невірно розв'язані задачі.

Студенти різних факультетів вибирають задачі в залежності від того, скільки робіт виконується на даному факультеті.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

Механіка

Задача 1. Літак летить горизонтально на висоті 1500 м зі швидкістю 200 м/с. Із гармати роблять постріл по літаку у ту саму мить, коли він знаходиться над гарматою. Нехтуючи опором повітря, знайти, під яким кутом до горизонту має бути зроблений постріл, щоб влучити в літак. Початкова швидкість снаряду 100 м/с.

Розв'язок

$$\begin{array}{l} h = 1500 \text{ м} \\ v_0 = 100 \text{ м/с} \\ v = 200 \text{ м/с} \\ g = 9,8 \text{ м/с}^2 \\ \alpha, t - ? \end{array}$$

Вважатимемо, що гармата знаходиться на початку координат. Рух снаряду можна розкласти на горизонтальний – рівномірний і вертикальний – рівнозмінний – рух, які описуються рівняннями:

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t \quad (1)$$

$$y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{g t^2}{2} \quad (2)$$

а рух літака – відповідно рівняннями:

$$x = vt \quad (3)$$

$$y = h \quad (4)$$

У мить влучання снаряду в літак координати цих тіл співпадають:

$$x_1 = x_2 \quad \text{і} \quad y_1 = y_2$$

Прирівнюючи частини, що праворуч рівнянь (1) і (3), а також (2) і (4), одержимо

$$v_0 \cos \alpha = vt \quad (5)$$

$$v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{g t^2}{2} = h \quad (6)$$

Із рівняння (5) знаходимо:

$$\cos \alpha = \frac{v}{v_0}, \quad \text{або} \quad \cos \alpha = \frac{200}{100}$$

Кут, під яким треба зробити постріл, дорівнює 77° .

Для визначення часу польоту снаряду до влучання в ціль перепишемо рівняння (6)

$$t \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g t}{2} \right) = \frac{2h}{g}$$

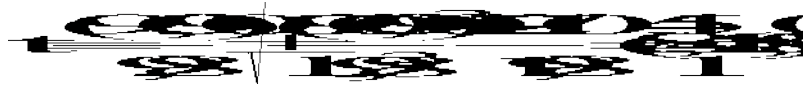
Розв'язання цього (квадратного) рівняння

$$t = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \pm \sqrt{\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 - \frac{2h}{g}}$$

Визначимо розмірність шуканого часу за знайденим співвідношенням:

$$t = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \pm \sqrt{\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 - \frac{2h}{g}}$$

Розмірність є відповідною. Знайдемо числове значення t :



Отже, маємо два значення: $t_1 = 177$ с і $t_2 = 1,6$ с.

Два значення t зумовлено можливістю влучання в літак під час руху снаряду при підйманні (t_2) і при його опусканні (t_1) після проходження через найвищу точку траєкторії.

Задача 2. Колесо радіусом $0,1$ м обертається так, що залежність кута повороту радіусу від часу описується рівнянням $\varphi = A + B \cdot t + C \cdot t^3$, де $A = 4$ рад; $B = 1,4$ рад/с і $C = 5$ рад/с². Знайти тангенціальне, нормальне і повне прискорення точок на ободі колеса в момент $t = 0,2$ с.

Розв'язок

$R = 0,1$ м
$\varphi = A + B \cdot t + C \cdot t^3$
$A = 4$ рад
$B = 1,4$ рад/с
$C = 5$ рад/с ²
$t = 0,2$ с
$a_T, a_n, a - ?$

Знайдемо залежність від часу кутової швидкості:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 3C \cdot t^2 \quad (1)$$

Для кутового прискорення одержуємо

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = 6C \cdot t \quad (2)$$

Згідно з формулами (1), (2) і умовою задачі шукані розмірності дорівнюють:

$$[\omega] = \text{рад/с} + (\text{рад} \cdot \text{с}^2) / \text{с}^3 = \text{рад/с} + \text{рад/с} = \text{рад/с},$$

$$[\beta] = (\text{рад} \cdot \text{с}) / \text{с}^3 = \text{рад/с}^2.$$

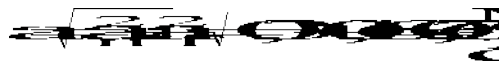
Числові значення ω і β , згідно (1) і (2), дорівнюють

$$\omega = 1,4 + 1,5 \cdot 0,04 = 2,0 \text{ рад/с}, \quad \beta = 6,5 \cdot 0,2 = 6,0 \text{ рад/с}^2.$$

Визначаємо тангенціальне a_T , нормальне a_n і повне a прискорення:

$$a_n = \omega^2 \cdot R = (2,0)^2 \cdot 0,1 = 0,4 \text{ м/с}^2;$$

$$a_T = \beta \cdot R = 6,0 \cdot 0,1 = 0,6 \text{ м/с}^2;$$



Задача 3. До нитки причеплений вантаж масою 1 кг. Знайти натяг нитки, якщо її підіймати з прискоренням 5 м/с² або опускати з тим же прискоренням.

Розв'язок

$m = 1$ кг
$g = 9,81$ м/с ²
$a = 5$ м/с ²
$F_1, F_2 - ?$

1. На вантаж діють сили: вниз – сила тяжіння $m \cdot g$, вгору – сила натягу нитки F_1 . Рівнодіюча цих сил, $F_1 - m \cdot g$, надає вантажу прискорення, яке спрямоване в бік F_1 .

Застосовуючи другий закон Ньютона, запишемо:

$$m \cdot a = F_1 - m \cdot g,$$

звідки знаходимо силу натягу нитки: $F_1 = m (g + a)$.

Розмірність – $[F] = \text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с}^2 + \text{м}/\text{с}^2) = \text{Н}$.

Чисельно – $F_1 = 1 \cdot (9,81 + 5) = 14,81 \text{ Н}$.

2. На вантаж, що опускається, діє вниз сила тяжіння $m \cdot g$ і вгору – сила натягу нитки F_2 . Тіло має прискорення, спрямоване в бік $m \cdot g$, тому за другим законом Ньютона рівнодіюча двох протилежно спрямованих сил має дорівнювати $m \cdot a$:

$$m \cdot a = m \cdot g - F_2,$$

$$F_2 = m (g - a).$$

Розмірність – $[F_2] = \text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с}^2 - \text{м}/\text{с}^2) = \text{Н}$.

Чисельно – $F_2 = 1 \cdot (9,81 - 5) = 4,81 \text{ Н}$.

Задача 4. Дві гири 2 кг і 1 кг з'єднані ниткою, перекинutoю через невагомий блок. Знайти прискорення, з яким рухаються гири, і натяг нитки. Тертям знехтувати.

Розв'язок

$g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$
$m_1 = 1 \text{ кг}$
$m_2 = 2 \text{ кг}$
$a, F - ?$

Сила натягу нитки перешкоджує її розтягненню, тому на кожний вантаж сила натягу діє вертикально вгору.

Отже, на перше тіло діють: сила натягу нитки F_1

– вгору і сила тяжіння $m_1 \cdot g$ – вниз; на друге тіло діють:

сила натягу нитки F_2 – вгору і сила $m_2 \cdot g$ – вниз.

Оскільки блок “невагомий”, то – $F_1 = F_2 = F$.

Нехай тягар m_1 опускається з деяким прискоренням (а це, звичайно, неприродно), тоді тягар m_2 підіймається з таким же прискоренням.

Згідно з другим законом Ньютона

$$m_1 \cdot a = m_1 \cdot g - F_1, \quad m_2 \cdot a = F_2 - m_2 \cdot g,$$

або, враховуючи $F_1 = F_2 = F$, перепишемо останню систему у вигляді

$$m_1 \cdot a = m_1 \cdot g - F, \quad m_2 \cdot a = F - m_2 \cdot g.$$

Розв'язуючи систему рівнянь, знаходимо:

$$a = (m_1 - m_2) / (m_1 + m_2) \cdot g, \quad F = (2 \cdot m_1 \cdot m_2) / (m_1 + m_2) \cdot g.$$

Аналізуючи розв'язок, робимо висновок: оскільки $m_1 < m_2$, то $a < 0$ і спрямоване протилежно g , тобто попереднє припущення про те, що тягар m_1 опускається з прискоренням, спрямованим вниз, неправильне і треба вважати, що m_1 підіймається вгору з прискоренням a .

Розмірності: $[a] = (\text{кг}/\text{кг}) \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{м}/\text{с}^2$; $[F] = (\text{кг}^2/\text{кг}) \cdot \text{м}/\text{с}^2 = \text{Н}$.

Чисельно: $a = -9,81/3 = -3,27 \text{ м}/\text{с}^2$, $F = (4/3) \cdot 9,81 = 13,08 \text{ Н}$.

Зауважимо, що на вісь блока діє сила, що дорівнює сумі сил:

$$F_1 + F_2 = 2 \cdot F = 26,16 \text{ Н}.$$

Задача 5. Який переріз матиме сталевий трос при п'ятиразовому запасі міцності, щоб ним можна було підіймати вантаж масою 10^3 кг з прискоренням $1,2 \text{ м/с}^2$, якщо межа міцності сталі $7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$?

Розв'язок

$a = 1,2 \text{ м/с}^2$ $\sigma_m = 7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ $n = 5$ $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $S = ?$	Згідно з другим законом Ньютона, вантаж прискорюється різницею між силою натягу троса і силою тяжіння вантажу : $m \cdot a = F - m \cdot g$, де F – необхідна сила натягу троса. З урахуванням коефіцієнту запасу міцності розрахункова сила натягу має бути в 5 разів більшою: $F^* = 5 \cdot F$.
--	---

Пружне напруження у тросі $\sigma = F^*/S$,

Із записаних співвідношень одержуємо

$$S = n \cdot m \cdot (g - a) / \sigma.$$

За останньою розрахунковою формулою розмірність шуканої площі S :

$$[S] = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 / (\text{с}^2 \text{ Н}) = \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Н} = \text{м}^2.$$

Числове значення площі перерізу троса

$$S = 5 \cdot 10^3 \cdot (1,2 + 9,8) / (7 \cdot 10^8) = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Задача 6. З якою швидкістю рухався вагон масою 20 т, якщо при ударі об стіну кожен з буферів стиснувся на 10 см? Відомо, що пружина кожного з буферів стискується на 1 см під дією сили $9,8 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Розв'язок

$m = 20 \text{ т} = 2 \cdot 10^4 \text{ кг}$ $x = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$ $x_1 = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$ $F_1 = 9,8 \cdot 10^3 \text{ Н}$ $v = ?$	На підставі закону збереження енергії можна дійти висновку, що кінетична енергія вагону перетворюється в потенціальну енергію двох стиснених пружин: $W_k = 2 \cdot W_p$. (1)
---	--

Відомо, що $W_k = m \cdot v^2 / 2$, $W_p = k \cdot x^2 / 2$, де m і v – маса і швидкість вагона; k – жорсткість пружини буфера; x – величина стиснення пружини. Жорсткість пружини k можна визначити із співвідношення $F_1 = k \cdot x_1$, де F_1 – сила, яка викликає пружну деформацію x_1 . Підставляючи в рівняння (1) значення W_k , W_p і k , маємо

$$m \cdot v^2 / 2 = (F_1 / x_1) \cdot x^2,$$

звідки одержуємо розрахункову формулу $v = x \sqrt{\frac{2F_1}{m x}}$.

Розрахуємо розмірність $[v] = \text{м} \sqrt{\frac{\text{Н}}{\text{кг} \cdot \text{м}}} = \text{м} \sqrt{\text{с}^{-2}} = \text{м/с}$.

Числове значення – $v = 0,1 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^4 \cdot 0,1}} = 0,99 \text{ м/с}$.

Задача 7. З якою швидкістю падають на землю метеори з дуже віддалених областей Всесвіту, якщо їх початкові швидкості відносно Землі дорівнюють нулю. Опором повітря знехтувати.

Розв'язок

$r_1 = \infty$ $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $r_2 = R = 6,67 \cdot 10^7 \text{ м}$ $v = ?$	Виходячи з закону збереження енергії, можна дійти висновку, що енергія метеору на безмежності має дорівнювати його енергії на поверхні Землі, на безмежності потенціальна енергія взаємодії метеору з Землею
--	--

$$W_p = -G \cdot M_3 \cdot m / r_1$$

дорівнює нулю, кінетична енергія також дорівнює нулю, тому що швидкість його відносно Землі дорівнює нулю. Отже, згідно з законом збереження енергії, на поверхні Землі повна енергія метеору також дорівнює нулю – $m \cdot v^2 / 2 - G \cdot M_3 \cdot m / r_2 = 0$.

Таким чином, швидкість метеору біля поверхні Землі

$$v = \sqrt{\frac{2GM_3}{R}}$$

де R – радіус земної кулі; $g = G \cdot M_3 / R^2$ – прискорення вільного падіння тіл біля поверхні Землі. Знайдемо розмірність швидкості за розрахунковою

формулою $[v] = \sqrt{\frac{M \cdot M}{c^2}} = \text{м/с}$.

Числове значення $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6,67 \cdot 10^{24}}{6,67 \cdot 10^7}} = 11,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Задача 8. Маховик у вигляді диска масою 50 кг і радіусом 20 см розкручено до 480 об/хв і залишено. Під впливом сил тертя маховик зупинився. Знайти момент сил тертя, вважаючи його сталим, якщо до повної зупинки маховик зробив 200 обертів.

Розв'язок

$m = 50 \text{ кг}$ $r = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ $v = 480 \text{ об/хв} = 8 \text{ об/с}$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot v = 16 \cdot \pi$ $N = 200$ $M = ?$	Робота подолання сил тертя виконується за рахунок кінетичної енергії маховика:
---	--

$$A = (I \cdot \omega^2) / 2, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість маховика; I – момент інерції маховика. Робота при

обертальному русі (коли $M = \text{const}$)

$$A = M \cdot \phi, \quad (2)$$

де ϕ – кут повороту (у радіанах – $\phi = 2 \cdot \pi \cdot N$); M – момент діючих сил тертя. Підставляючи виписані співвідношення в формулу (1), одержимо

$$(I \cdot \omega^2) / 2 = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot N. \quad (3)$$

Підставимо в рівняння (3) момент інерції диску відносно осі обертання I , тоді одержимо розрахункову формулу

$$M = m \cdot r^2 \omega^2 / (8 \cdot \pi \cdot N). \quad (4)$$

Розрахуємо розмірність моменту сил за формулою (4):

$$[M] = (\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рад}^2) / (\text{рад} \cdot \text{с}^2) = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Зауважимо, що момент сили має розмірність Дж, але для того, щоб було очевидно, що йдеться про момент сили, а не енергетичну величину, пишуть $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Числове значення –

$$M = (50 \cdot 0,2^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 480^2) / (8 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 60 \cdot 60) = 1,00 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задача 9. Знайти рівняння гармонічного коливального руху, якщо максимальне прискорення точки дорівнює $49,3 \text{ см/с}^2$, період коливань 2 с і зміщення точки з положення рівноваги в початковий момент $2,5 \text{ см}$.

Розв'язок

$a_{\max} = 0,493 \text{ м/с}^2$ $T = 2 \text{ с}$ $x_0 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $x = f(t) - ?$	Рівняння гармонічного коливання має вигляд $x = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t / T + \varphi_0)$, де x – зміщення точки з положення рівноваги; A – амплітуда; T – період; t – час; φ_0 – початкова фаза коливання.
--	---

Прискорення точки –

$$a = d(dx/dt)/dt = -(4 \cdot A \cdot \pi^2) / (T^2) \cos(2 \cdot \pi \cdot t / T + \varphi_0).$$

Максимальним значення прискорення буде тоді, коли значення косинуса дорівнюватиме -1 , тому

$$a_{\max} = 4 \cdot A \cdot \pi^2 / T^2,$$

звідки числове значення $a_{\max} = 0,05 \text{ м}$. Тоді рівняння руху (1) матиме вигляд $x = 0,05 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$, де $\omega = 2\pi / T = \pi \text{ (рад/с)}$.

Початкове значення фази знайдемо за відомим значенням x для $t = 0$:
 $x(0) = x_0$.

Одержуємо $\cos(\varphi_0) = 0,5$, тобто $\varphi_0 = \pi/3$.

Остаточне рівняння гармонічного коливання буде мати вигляд

$$x = 0,05 \cos(\pi t + \pi/3) \text{ (м)}.$$

Молекулярна фізика і термодинаміка

Задача 1. По газопроводу тече вуглекислий газ під тиском $4,9 \cdot 10^5$ Па і температурі 270 К. Яка швидкість течії газу по трубі, якщо за 5 хв через поперечний переріз площею 6 см^2 протікає 2,5 кг CO_2 ?

Розв'язок

$$p = 4,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T = 290 \text{ К}$$

$$t = 300 \text{ с}$$

$$S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$m = 2,5 \text{ кг}$$

$$\mu(\text{CO}_2) = 0,044 \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

$$V - ?$$

Якщо газ тече зі швидкістю v , то за час t через площу S протікає об'єм газу

$$V = v \cdot S \cdot t. \quad (1)$$

Якщо густина газу ρ , то маса газу, що протекла,

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot v \cdot S \cdot t. \quad (2)$$

Густину газу знайдемо за рівнянням

Менделєєва-Клапейрона:

$$p \cdot V = (m / \mu) R \cdot T \quad \Rightarrow \quad \rho = m / V = (p \cdot \mu) / (R \cdot T)$$

і підставимо її в формулу (2):

$$m = p \cdot \mu / (R \cdot T) \cdot v \cdot S \cdot t,$$

звідки $v = (m \cdot R \cdot T) / (p \cdot \mu \cdot S \cdot t)$.

Знайдемо розмірність v за останньою формулою:

$$[v] = (\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}) / (\text{моль} \cdot \text{К} \cdot \text{Па} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}) =$$

$$\text{Дж} / (\text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}) = \text{м/с}.$$

Числове значення –

$$v = (2,5 \cdot 8,314 \cdot 290) / (4,9 \cdot 10^5 \cdot 0,044 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 300) = 1,55 \text{ м/с}.$$

Задача 2. Скільки молекул кисню в посудині об'ємом 100 см^3 , якщо при середній квадратичній швидкості 400 м/с газ створює на стінки тиск $9,81 \cdot 10^3$ Па.

Розв'язок

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

$$1/\text{моль}$$

$$V = 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$p = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$$

$$v = 400 \text{ м/с}$$

$$N - ?$$

Перетворимо рівняння Менделєєва-Клапейрона до вигляду

$$p \cdot V = \gamma \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

де γ - кількість молей газу, що міститься в об'ємі V .

Універсальну газову сталу представимо у вигляді добутку сталої Больцмана k на число Авогадро N_A –

$$R = k \cdot N_A.$$

Загальне число молекул в об'ємі V

$$N = \gamma \cdot N_A.$$

Тоді рівняння (1) приймає вигляд $P \cdot V = N \cdot k \cdot T$, звідки

$$N = (P \cdot V) / (k \cdot T). \quad (2)$$

Знайдемо температуру газу за відомою середньою квадратичною швидкістю молекул:

$$v^2 = (3 \cdot R \cdot T) / \mu \quad \Rightarrow \quad T = (\mu \cdot v^2) / (3 \cdot R)$$

і підставимо в формулу (2): $N = (3 \cdot P \cdot V \cdot R) / (k \cdot \mu \cdot v^2)$,

де зроблена зворотня заміна $R / k = N_A$.

Знайдемо розмірність N за розрахунковою формулою

$$[N] = (\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль} \cdot \text{с}^4) / (\text{моль} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2) = (\text{Дж} \cdot \text{с}^4) / (\text{кг} \cdot \text{м}^2) = [1]$$

– безрозмірне.

Числове значення N –

$$N = (9,81 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}) / (0,032 \cdot 16 \cdot 10^4) = 1,15 \cdot 10^{20}.$$

Задача 3. Яка кількість теплоти втрачається щогодини за рахунок теплопровідності повітря між рамами вікна при площі 4 м^2 , відстані між рамами 30 см і нормальному атмосферному тиску? Температура повітря в приміщенні 291 К , зовні – 253 К . При розрахунках вважати, що діаметр молекул повітря $0,3 \text{ нм}$.

Розв'язок

$$\Delta t = 3600 \text{ с}$$

$$S = 4 \text{ м}^2$$

$$x = 0,3 \text{ м}$$

$$T_1 = 291 \text{ К}$$

$$T_2 = 253 \text{ К}$$

$$d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$p = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$$

$$i = 5$$

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

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

$$1/\text{моль}$$

$$R = 8,314$$

$$\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$$

$$\Delta Q = ?$$

Кількість тепла, перенесеного внаслідок теплопровідності, визначається за законом Фур'є:

$$\Delta Q = -\alpha \cdot (dT / dx) \cdot S \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Коефіцієнт теплопровідності газу

$$\alpha = (1/3) \lambda \langle v \rangle \cdot \rho, \quad (2)$$

де λ – середня довжина вільного пробігу молекул;

$$\lambda = \left(\frac{2}{\sqrt{2} \cdot n} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Число молекул в одиниці об'єму визначається рівнянням стану ідеального газу:

$$p = n \cdot k \cdot T. \quad (4)$$

Величина $\langle v \rangle$ в формулі (2) – середня швидкість молекул газу:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (5)$$

Питома теплоємність газу c визначається числом ступенів вільностей (і) руху молекул газу:

$$c = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}, \quad (6)$$

де μ – молярна маса газу.

Густина повітря визначимо за законом Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho = (p \cdot \mu) / (R \cdot T). \quad (7)$$

Підставимо величини (2) – (7) в рівняння (1) і одержимо, що

$$\Delta Q = \frac{1}{\Gamma} \sqrt{\frac{R \cdot T}{\pi \cdot \mu}} \frac{i \cdot k \cdot \Delta T}{\pi \cdot d \cdot \Delta x} S \Delta. \quad (8)$$

Для температури повітря візьмемо значення

$$T = (T_1 + T_2) / 2 = 272 \text{ К.}$$

Визначимо розмірність ΔQ за формулою (8):

$$[\Delta Q] = \sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{кг}}} \cdot (\text{Дж} / (\text{К} \cdot \text{м}^2)) \cdot (\text{К} / \text{м}) \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} = (\text{м} / \text{с}) \cdot \text{Дж} \cdot (\text{с} / \text{м}) = \text{Дж}.$$

Числове значення –

$$\Delta Q = \frac{1}{\Gamma} \sqrt{\frac{8314 \cdot 272}{0029 \cdot \pi \cdot 016^2}} \cdot \frac{5 \cdot 38436 \cdot \text{с}}{03} = 2,37 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 23,7 \text{ кДж}.$$

Задача 4. Яку кількість теплоти поглинає 2000 г водню, нагріваючись від 273 К до 373 К при сталому тиску? Який приріст внутрішньої енергії газу? Яку роботу здійснює газ?

Розв'язок

$$m = 0,2 \text{ кг}$$

$$\Delta T = 100 \text{ К}$$

$$p = \text{const}$$

$$\mu = 0,002 \text{ кг / моль}$$

$$i = 5$$

$$R = 8,314 \text{ Дж / (моль} \cdot \text{К)}$$

$$Q, \Delta W, A - ?$$

Кількість теплоти, яка поглинається газом, визначається за формулою:

$$Q = \frac{m}{\mu} \cdot C_p \cdot \Delta T = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i+2}{2} \cdot R \cdot \Delta T, \quad (1)$$

де μ – молярна маса; i – число ступенів вільності;

C_p – молярна теплоємність газу при сталому тиску.

Приріст внутрішньої

енергії визначається співвідношенням

$$\Delta W = \frac{m}{\mu} \cdot C_v \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де C_v – молярна теплоємність газу при сталому об'ємі. Роботу, здійснювану газом, визначимо, користуючись першим началом термодинаміки:

$$Q = \Delta W + A, \quad (3)$$

де A – робота газу.

Підставляючи значення величин в формули (1) – (3), знаходимо:

$$[Q] = (\text{кг} \cdot \text{моль}) / \text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К} = \text{Дж};$$

$$[\Delta W] = (\text{кг} \cdot \text{моль}) / \text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К} = \text{Дж};$$

$$[A] = [Q - \Delta W] = \text{Дж}.$$

$$\text{Чисельно} - Q = 0,2 / 0,002 \cdot 7 / 2 \cdot 8,314 \cdot 100 = 290 \text{ кДж};$$

$$\Delta W = 207 \text{ кДж};$$

$$A = 83 \text{ кДж}.$$

Задача 5. Газ, який займав об'єм 20 л під тиском $1,013 \cdot 10^6$ Па, ізобарично нагріто від 323 К до 473 К. Знайти роботу розширення газу .

Розв'язок

$$\begin{array}{l} p = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ T_1 = 323 \text{ К} \\ T_2 = 473 \text{ К} \\ V_1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \\ \hline A = ? \end{array}$$

Робота газу A в ізобаричному процесі виражається співвідношенням

$$A = p \cdot \Delta V, \quad (1)$$

де p – тиск газу; ΔV – зміна об'єму газу. Запишемо рівняння Менделєєва–Клапейрона для двох станів газу при T_1 і T_2 і при $p = \text{const}$:

$$p \cdot V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_1, \quad (2)$$

$$p \cdot V_2 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_2. \quad (3)$$

Розділимо рівняння (3) на рівняння (2): $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$,

віднімемо по одиниці ліворуч і праворуч:

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

та визначимо зміну об'єму $\Delta V = V_2 - V_1$:

$$\Delta V = [(T_2 - T_1) / T_1] \cdot V_1.$$

Після підстановки ΔV у вираз (1) одержуємо

$$A = p \Delta V = p V_1 (T_2 - T_1) / T_1.$$

Знаходимо розмірність за останньою формулою:

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К} / \text{К} = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж},$$

і числове значення –

$$A = 1,013 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot (473 - 323) / 323 = 9400 \text{ Дж}.$$

Задача 6. Яка кількість теплоти поглинається при ізотермічному розширенні 0,5 л повітря, якщо тиск зменшується від $58,86 \cdot 10^4$ до $9,81 \cdot 10^4$ Па?

Розв'язок

$$\begin{array}{l} V = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \\ p_1 = 58,86 \cdot 10^4 \text{ Па} \\ p_2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} \\ T = \text{const} \\ \hline Q = ? \end{array}$$

В ізотермічному процесі все підведене тепло витрачається на виконання роботи

$$Q = \frac{m}{\mu} R T \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (1)$$

де m – маса газу; μ – молярна маса; T – температура газу.

Оскільки в цьому процесі об'єм газу зростає (тиск падає), то робота додатня, і для підтримання сталої температури тепло Q має підводитися.

За законом Менделєєва-Клапейрона визначимо невідому величину температури:

$$\frac{m}{\mu} R T = p_1 V_1. \quad \Rightarrow \frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Тоді
$$Q = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2)$$

Використовуючи формулу (2), знаходимо розмірність –
 $[Q] = \text{Па м}^3 = \text{Дж},$

Числове значення – $Q = 523 \text{ Дж}.$

Задача 7. До якого тиску має бути стиснута суміш повітря з парою бензину в циліндрі двигуна, щоб суміш спалахнула, якщо початковий тиск $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ і температура 273 К , а температура спалаху 833 К . Стиснення вважати адіабатним, газ – двоатомним.

Розв'язок

$i = 5$
$p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$
$T = 273 \text{ К}$
$T = 833 \text{ К}$
$p = ?$

Скористаємось рівнянням адіабати у вигляді

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (1)$$

де γ – показник адіабати, який дорівнює відношенню теплоємностей газу при сталому тиску і при сталому об'ємі:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}, \quad (2)$$

i – число ступенів вільності молекули газу. Логарифмування формули (1) і підстановка значення γ призводять до

$$\ln(p) = \ln(p_0) + \frac{i+2}{i} \frac{T}{T_0}. \quad (3)$$

Підстановка числових значень в формулу (3) і наступне потенціювання призводять до $p = 4,50 \cdot 10^6 \text{ (Па)}$.

Задача 8. Теплова машина працює за циклом Карно. Температура нагрівача 500 К . Визначити температуру холодильника і термічний ККД циклу, якщо за рахунок кожного кілоджоуля тепла, одержаного від нагрівача, виконується робота 350 Дж .

Розв'язок

$T_1 = 500 \text{ K}$ $A = 350 \text{ Дж}$ $Q = 1 \text{ кДж}$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $T_2, \eta - ?$	Термічний ККД визначає частку одержаної теплоти, яка йде на виконання роботи: $\eta = A / Q, \quad (1)$ де Q – теплота, одержана від нагрівача.
---	--

З другого боку, ККД циклу Карно виражається через температуру нагрівача T_1 і температуру холодильника T_2 :

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} . \quad (2)$$

Порівнюючи формулу (2) з формулою (1), одержуємо
 $T_2 = T_1 (1 - A / Q)$.

Згідно з рівнянням (1), термічний ККД виявляється рівним 0,35 і, згідно з останнім співвідношенням, одержуємо $T_2 = 325 \text{ K}$.

Електрика і магнетизм

Задача 1. У скільки разів сила електричного відштовхування між двома протонами більша за силу гравітаційного притягання між ними?

Розв'язок

$m = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $F_e / F_g - ?$	Сила відштовхування між двома протонами у вакуумі може бути знайдена за законом Кулона: $F_e = \frac{e \cdot e}{4\pi\epsilon_0 \cdot r^2}, \quad (1)$
---	--

де e – заряд протона і r – відстань між протонами.

Сила притягання між протонами визначається за законом всесвітнього тяжіння:

$$F_g = G \frac{m \cdot m}{r^2}, \quad (2)$$

де m – маса протона; G – гравітаційна стала. Поділивши вираз (1) на формулу (2), одержуємо розрахункову формулу

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G m^2}$$

Розмірність одержаного результату –

$$\left[\frac{F_e}{F_g} \right] = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{кДж}^2 \cdot \text{м}}{\text{Ф} \cdot \text{кг}^2 \cdot \text{м}^3} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Ф} \cdot \text{В}}{\text{Ф} \cdot \text{Дж}} = [1].$$

Числове значення результату –

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G m^2} = 1,25 \cdot 10^{-36} .$$

Задача 2. Знайти напруженість електричного поля в точці, яка лежить посередині між точковими зарядами $8 \cdot 10^{-9}$ Кл і $-6 \cdot 10^{-9}$ Кл. Відстань між зарядами 20 см.

Розв'язок

$$\begin{aligned} q_1 &= 8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ q_2 &= -6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ d &= 0,2 \text{ м} \\ \varepsilon &= 1 \\ \varepsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\ E &= ? \end{aligned}$$

Оскільки заряди мають протилежні знаки, то напруженості їх полів в точці, яка лежить між зарядами, спрямовані в бік негативного заряду. Результуюча напруженість поля за модулем буде дорівнювати сумі модулів напруженостей цих полів.

Модулі напруженості E_1 і E_2 визначаються за формулами

$$E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r_1^2}, \quad E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r_2^2},$$

де $r_1 = r_2 = d/2$ – відстань від заряду до розглядуваної точки.

Сумарна напруженість поля в точці:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{|q_1| + |q_2|}{\pi\varepsilon_0 \cdot d^2}.$$

Розмірність – $[E] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{Ф} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

Числове значення – $E = \frac{14 \cdot 10^{-9}}{\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,2^2} = 5,04 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

Задача 3. Безмежна вертикальна площина у вакуумі заряджена рівномірно з поверхневою густиною зарядів $5 \cdot 10^{-4}$ Кл/м². До нитки причеплена заряджена кулька масою 1 г. Заряди площини і кульки однойменні. Визначити заряд кульки, якщо нитка утворює з площиною кут 30° .

Розв'язок

$$\begin{aligned} m &= 10^{-3} \text{ кг} \\ \sigma &= 5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2 \\ \alpha &= 30^\circ \\ \varepsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\ g &= 9,81 \text{ м/с}^2 \\ q &= ? \end{aligned}$$

На почеплену кульку діє вага і сила електричного відштовхування F_e . Результуюча сила F зрівноважується силою натягу нитки N .

Як видно з рисунка

$$F_e = m \cdot g \cdot \text{tg} \cdot \alpha. \quad (1)$$

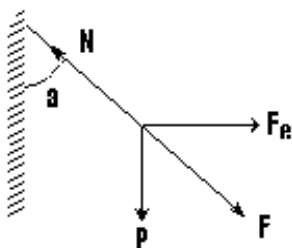
Цю ж силу представимо через напруженість електричного поля і заряд кульки q :

$$F_e = q \cdot E. \quad (2)$$

Напруженість поля площини

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (3)$$

де σ – поверхнева густина зарядів. Підставляючи



вираз (3) в формулу (2), а потім в рівняння (1), одержимо:

$$m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma \cdot q}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon}; \quad q = \frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\sigma}$$

Розмірність q за останньою розрахунковою формулою:

$$[q] = \frac{\Phi \text{М}^2 \cdot \text{КГМ}}{\text{КЛМ} \text{С}^2} = \frac{\Phi \cdot \text{Дж}}{\text{Кл}} = \Phi \cdot \text{В} = \text{Кл.}$$

Числове значення –

$$q = \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01 \cdot 9,81 \cdot 0,5}{1,093 \cdot 10^{-9}} = 1,093 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Задача 4. Заряджена порошок масою 10^{-10} г зважена в однорідному електричному полі між двома різнойменно зарядженими пластинами, відстань між якими дорівнює 0,5 см. При освітленні ультрафіолетовими променями порошок втрачає заряд і виходить з рівноваги. Який заряд втратила порошок, якщо спочатку до пластин була прикладена різниця потенціалів 154 В, а потім, щоб повернути в рівновагу порошок, додали ще 8 В?

Розв'язок

$m = 10^{-13} \text{ кг}$ $d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $U_1 = 154 \text{ В}$ $U = 8 \text{ В}$ $g = 9,81 \text{ м / с}^2$ $\Delta q - ?$	До опромінення порошок була в рівновазі, тобто вага її P зрівноважувалась електричною силою F . Вихідне рівняння: $P = F.$ Виражаючи вагу порошок через її масу m , а силу F – через напруженість електричного поля, одержимо
--	--

$$m \cdot g = q \cdot E. \quad (1)$$

Виражаючи модуль напруженості поля через різницю потенціалів $E_1 = U_1 / d$, з рівняння (1) одержуємо

$$q_1 = (m \cdot g \cdot d) / U_1. \quad (2)$$

Так само можна визначити, що після опромінення порошок заряд її дорівнюватиме

$$q_2 = (m \cdot g \cdot d) / U_2. \quad (3)$$

За умовою задачі $U_2 = U_1 + \Delta U$, тому втрачений порошком заряд

$$\Delta q = q_1 - q_2 = m \cdot g \cdot d \cdot (1 / U_1 - 1 / U_2)$$

або

$$\Delta q = \frac{m \cdot g \cdot d \cdot (U_2 - U_1)}{U_1 \cdot U_2} = \frac{m \cdot g \cdot d \cdot \Delta U}{U_1 \cdot (U_1 + \Delta U)}$$

Розмірність – $[\Delta q] = \frac{\text{ВМКГМ}}{\text{ВВос}} = \frac{\text{Дж}}{\text{В}} = \text{Кл.}$

Числове значення – $\Delta q = \frac{1 \cdot 10^{-13} \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 8}{154 \cdot 154 + 8} = 1,57 \cdot 10^{-18} \text{ Кл.}$

Задача 5. Вилітаюча при радіоактивному розпаді ядра атому радію α -частинка зі швидкістю $1,6 \cdot 10^7$ м/с зустрічає ядро натрію. На яку найменшу відстань вона наблизиться до ядра натрію?

Розв'язок

$$\begin{aligned} v &= 1,6 \cdot 10^7 \text{ м/с} \\ m &= 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_1 &= 11 \cdot e = 1,76 \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \\ q_2 &= 2 \cdot e = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ \epsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\ r &= ? \end{aligned}$$

Найменша відстань, на яку може підійти частинка до ядра натрію, визначається за умовою

$$W_k = W_p, \quad (1)$$

коли кінетична енергія W_k – частинки

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2},$$

перетвориться в потенціальну енергію її відштовхування від позитивно зарядженого ядра Na:

$$W_p = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r},$$

де q_1 і q_2 – заряди частинки і ядра Na; r – відстань, на якій зупиниться частинка біля ядра Na. Підставимо значення енергій в рівняння (1) і розв'яжемо рівняння відносно r :

$$r = \frac{q_1 \cdot q_2}{2\pi\epsilon_0 \cdot m \cdot v^2}$$

Розмірність –

$$[r] = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{Ф} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м}}{\text{Ф} \cdot \text{Дж}} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}^2 \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{Дж}} = \text{м}.$$

Числове значення –

$$r = \frac{1,76 \cdot 10^{-18} \cdot 3,2 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (1,6 \cdot 10^7)^2} = 6 \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Задача 6. В середині плоского конденсатора з площею пластин 200 см^2 і відстанню між ними в 1мм, який заряджено до напруги 300 В, знаходиться скляна пластинка, цілком заповнюючи простір між пластинами конденсатора. Знайти зміну енергії конденсатора після вилучення скляної пластинки за таких умов: а) на електродах підтримується стала напруга за допомогою джерела струму б) до вилучення скляної пластинки конденсатор відімкнено від джерела напруги.

Розв'язок

$$S = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$d = 10^{-3} \text{ м}$$

$$U = 300 \text{ В}$$

$$\varepsilon = 7$$

$$\varepsilon = 1$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$$

$$\Delta W = ?$$

а) Енергія зарядженого конденсатора зі скляною пластинкою: $W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}$, або після підстановки

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d};$$

$$W_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d}.$$

Якщо на обкладках підтримується стала напруга, то після вилучення скла енергія буде дорівнювати

$$W_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d}.$$

Зміна енергії у випадку "а":

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \varepsilon_0 S U^2}{2d}.$$

Розмірність – $[\Delta W] = \frac{\text{Ф м}^2 \cdot \text{В}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \text{Ф} \cdot \text{В}^2 = \text{Кл} \cdot \text{В} = \text{Дж}.$

Числове значення –

$$\Delta W = \frac{8,125 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 300^2}{2 \cdot 10^{-3}} = -4,78 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

б) Якщо конденсатор відімкнуто від джерела струму до вилучення скляної пластини, то різниця потенціалів між обкладками після вилучення діелектрика зміниться, проте збережеться заряд на обкладках (оскільки йому нікуди подітися). Енергію конденсатора в цьому випадку доцільно подати співвідношенням

$$W_1 = \frac{q^2}{2C_1}; \quad W_2 = \frac{q^2}{2C_2}.$$

Тоді $\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{q^2}{2} \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right),$

або, оскільки $q = C_1 U$, то

$$\Delta W = \frac{C_1^3 U^3}{2} \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \varepsilon_0 S U^3}{2d}.$$

Числове значення –

$$\Delta W = \frac{8,125 \cdot 10^{-12} \cdot 300^3}{2 \cdot 10^{-3}} = 3,35 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

У випадку "а" енергія конденсатора зменшилась, а у випадку "б" – збільшилась.

Задача 7. Визначити ККД акумулятора, ЕРС у якого дорівнює 2,15 В, якщо він подає у зовнішнє коло струм силою 5 А. Внутрішній опір акумулятора 0,18 Ом.

Розв'язок

$E = 2,15 \text{ В}$ $I = 5 \text{ А}$ $r = 0,18 \text{ Ом}$ $\eta = ?$	ККД джерела струму дорівнює відношенню енергії, що витрачає джерело струму у зовнішньому колі, до всієї витраченої енергії:
	$\eta = \frac{I^2 \cdot R \cdot t}{I^2 \cdot (R+r) \cdot t} \quad (1)$

Визначимо зовнішній опір кола за допомогою закону Ома для контура:

$$I = \frac{E}{R+r} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{E}{I} - r.$$

Підставляючи значення R в рівняння (1), одержуємо

$$\eta = \frac{E/I - r}{E/I} = \frac{E - I \cdot r}{E}.$$

Числове значення ККД дорівнює

$$\eta = 1 - 0,90 / 2,15 = 0,58.$$

Задача 8. На кінцях залізного проводу довжиною 1,5 м і радіусом перерізу 0,3 мм підтримується напруга 1,0 В. Визначити: 1) потужність, яка споживається у проводі; 2) кількість тепла, яке виділяється у проводі за 1 год; 3) густину струму; 4) число електронів, що проходить через поперечний переріз проводу за 1 с.

Розв'язок

$l = 1,5 \text{ м}$ $U = 1,0 \text{ В}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $\rho = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $r = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ $t_1 = 3600 \text{ с}$ $t_2 = 1 \text{ с}$ $P, Q, j, N = ?$	1. Потужність, яка споживається у провіднику, визначається силою струму і напругою:
	$P = I \cdot U. \quad (1)$
	Силу струму знайдемо за законом Ома для ділянки кола:
	$I = U / R. \quad (2)$
	Опір провідника за його геометричними розмірами визначається так:
	$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot r^2}, \quad (3)$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника; l – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу провідника. Підставляючи формулу (3) в формулу (2), маємо

$$I = \frac{U \cdot \pi \cdot r^2}{\rho \cdot l}. \quad (4)$$

Числове значення сили струму

$$I = \frac{1,0 \cdot \pi \cdot (3 \cdot 10^{-4})^2}{8,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,5} = 1,44 \text{ А.}$$

Згідно з формулою (1), потужність дорівнює

$$P = I \cdot U = 1,44 \text{ А} \cdot 1,0 \text{ В} = 1,44 \text{ Вт.}$$

2. Кількість теплоти, що виділяється в провіднику за 1 годину, визначимо за формулою

$$Q = I \cdot U \cdot t = 1,44 \text{ А} \cdot 1,0 \text{ В} \cdot 3600 \text{ с} = 5,18 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

3. Густина струму визначимо за співвідношенням
 $j = I / S = I / (\pi \cdot r^2) = 1,44 \text{ А} / (\pi \cdot 9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2) = 5,09 \cdot 10^6 \text{ А} / \text{м}^2 = 5,1 \text{ А} / \text{мм}^2.$

4. Число електронів N, що проходять через поперечний переріз провідника за 1 с, знайдемо за співвідношенням

$$N = \frac{q}{e} = \frac{I \cdot t_2}{e},$$

де q – заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t_2 ; e – заряд електрона.

$$\text{Числове значення } - N = \frac{144 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}}{1,61 \cdot 10^{-19} \text{ К}} = 9 \cdot 10^{18}.$$

Задача 9. Від джерела, різниця потенціалів на клеммах якого 10^5 В , треба передати потужність 50 кВт на відстань 5 км . Допускаються втрати напруги в проводах 1% . Розрахувати найменший переріз мідного проводу, придатного для цієї мети.

Розв'язок

$$U = 10^5 \text{ В}$$

$$P = 5 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

$$n = 0,01$$

$$\ell = 5 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$S = ?$$

Падіння напруги в проводах

$$U = I \cdot R, \quad (1)$$

пропорціональне опору проводів:

$$R = \frac{\rho \cdot 2 \cdot \ell}{S}, \quad (2)$$

де ρ – питомий опір проводу; $2 \cdot \ell$ – довжина проводів (два проводи!); S – переріз проводу.

Струм I можна знайти за потужністю і напругою на клеммах джерела струму:

$$I = \frac{P}{U}. \quad (3)$$

Враховуючи, що падіння напруги в проводах має становити не більше ніж частку n від прикладеної напруги

$$U_1 = n \cdot U, \quad (4)$$

прирівняємо вирази (1) і (4) і підставимо значення I і R із формул (2) і (3):

$$\frac{P}{U} \frac{\rho \cdot 2 \cdot \ell}{S} = n \cdot U \quad \text{або} \quad S = \frac{2 \cdot \rho \cdot P \cdot \ell}{n \cdot U^2}.$$

$$\text{Розмірність } - [S] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{В} \cdot \text{м}}{\text{В}} = \text{м}^2$$

Числове значення –

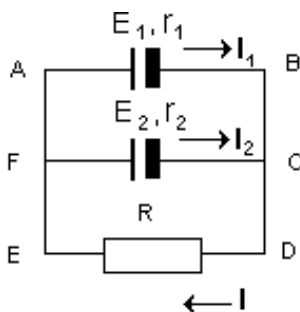
$$S = \frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^4}{0,01 \cdot (10^5)^2} = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2.$$

Задача 10. До двох батарей, з'єднаних паралельно, підімкнули електричну лампу. Який опір має бути у лампи, аби вона споживала максимальну потужність? Визначити максимальну потужність при ЕРС батарей 12 В і 10 В і однакових внутрішніх опорах батарей по 1 Ом.

Розв'язок

$$\begin{aligned} E_1 &= 12 \text{ В} \\ E_2 &= 10 \text{ В} \\ r_1 &= r_2 = 1 \text{ Ом} \end{aligned}$$

R, P – ?



Для розв'язку задачі застосуємо закони Кірхгофа для розгалужених кіл. Для цього позначимо на схемі напрямки струмів і виберемо напрямки обходу контурів. На схемі маємо два вузли – F і C. За першим законом Кірхгофа можна скласти тільки одне рівняння. Сума струмів, що знаходяться,

наприклад, у вузлі C:

$$I_1 + I_2 - I = 0 \quad (1)$$

Застосуємо другий закон Кірхгофа, запишемо для контура ABDE (обхід за годинниковою стрілкою!):

$$I_1 \cdot r_1 + I \cdot R = E_1 \quad (2)$$

Для контура FCDE;

$$I_2 \cdot r_2 + I \cdot R = E_2. \quad (3)$$

Рівняння (1) – (3) утворюють систему, за допомогою якої можна визначити три елементи електричного кола. Визначаючи I_1 та I_2 із виразів (2) та (3) і підставляючи їх значення в формулу (1), знаходимо значення струму в лампі, виражене через її опір:

$$I = \frac{E_1 + E_2}{r + 2R}. \quad (4)$$

Потужність, що споживається електролампю, подамо так:

$$P = I^2 \cdot R = (E_1 + E_2)^2 \frac{R}{(r + 2R)^2} = 0. \quad (5)$$

Для визначення опору $R = R_0$, за яким лампа споживає максимальну потужність, продиференціюємо рівняння (5) за R і прирівняємо похідну до нуля:

$$(E_1 + E_2)^2 \frac{r - 2R_0}{(r + 2R_0)^3} = 0,$$

звідки одержуємо $R_0 = r/2$. Оскільки величина P позитивна, то це значення R відповідає максимуму, в чому легко впевнитися, застосувавши метод зміни знаку першої похідної при переході через значення R . З урахуванням того, що $R_0 = r/2$, за формулою (5) обчислюємо максимальну потужність лампи:

$$P_{\max} = (E_1 + E_2)^2 \frac{R_0}{(r + 2R_0)^2} = \frac{2^2 \cdot 3 \cdot 050}{4 \cdot 0^2 \text{ м}} = 60,5 \text{ Вт.}$$

Задача 11. По двох довгих прямолінійних проводах, які розміщені на відстані 5 см один від одного, течуть струми по 10 А. Визначити

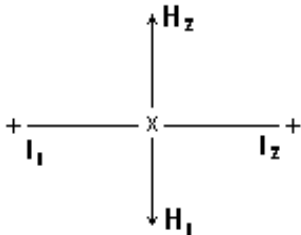
напруженість магнітного поля, що створюється в точці, яка лежить посередині між проводами у випадках, коли струми течуть: 1) в одному напрямку; 2) в протилежних напрямках.

Розв'язок

$$I_1 = \pm I_2 = 10 \text{ А}$$

$$R = R / 2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$H - ?$$



Результуюча напруженість магнітного поля дорівнює векторній сумі полів, створюваних струмами I_1 і I_2 . Напрямок полів струмів у точці між проводами знаходимо за

правилом буравчика, абсолютну величину – за формулою

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (1)$$

де r – відстань від прямолінійного довгого провідника.

В даній задачі абсолютні значення напруженостей від обох провідників однакові:

$$H_1 = H_2 = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{10 \text{ А}}{2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 63,6 \text{ А/м.}$$

У випадку однаково спрямованих струмів у точці між проводами вектори H_1 і H_2 протилежні. Результуюча напруженість дорівнює за модулем різниці модулів H_1 і H_2 :

$$H = H_1 - H_2 = 0.$$

У випадку, коли струми течуть у протилежних напрямках, модуль результуючої напруженості дорівнює сумі модулів:

$$H = H_1 + H_2 = 127,3 \text{ А/м.}$$

Якщо змінити напрямок H_2 на протилежний, то H спрямований вниз.

Задача 12. Знайти кінетичну енергію протона, який рухається по дузі кола радіусом 60 см в магнітному полі, індукція якого дорівнює 1 Тл і перпендикулярна до напрямку швидкості протона.

Розв'язок

$$r = 0,6 \text{ м}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$m = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$W_k - ?$$

Кінетична енергія визначається за формулою

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2}. \quad (1)$$

При русі в магнітному полі на заряджену частку з боку магнітного поля перпендикулярно до швидкості діє сила Лоренца, яка відіграє роль

доцентрової сили:

$$F_{\text{Лор}} = \frac{mv^2 \cdot \sin \alpha}{r}. \quad (2)$$

Із рівняння (2) визначаємо швидкість частинки:

$$v = \frac{r \cdot e \cdot B}{m \cdot \sin \alpha}$$

Підставивши v в формулу (1), одержимо

$$W_k = \left(\frac{r \cdot e \cdot B}{m \cdot \sin \alpha} \right)^2 \cdot \frac{1}{2n}$$

Розмірність –

$$[W_k] = \frac{1^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{В}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кМ}^4} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{Дж}} = \text{Дж}$$

Числове значення –

$$W_k = \frac{0,5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^8}{2 \cdot 10^7} = 27,68 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Задача 13. Дротяна рамка розміщена перпендикулярно до магнітного поля, індукція якого змінюється за законом $B = B_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]$, де $B_0 = 0,5 \text{ Тл}$; $k = 0,1 \text{ с}^{-1}$. Визначити величину ЕРС, яка індукується в контурі в момент $t = 2,3 \text{ с}$. Площа рамки $S = 0,04 \text{ м}^2$.

Розв'язок

$B_0 = 0,5 \text{ Тл}$ $k = 0,1 \text{ с}^{-1}$ $S = 0,04 \text{ м}^2$ $t = 2,3 \text{ с}$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $E = ?$	Величина ЕРС, що індукується в контурі, визначається за законом Фарадея: $E = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$ де Φ – магнітний потік через контур.
--	--

В даному випадку

$$\Phi = B \cdot S = B_0 \cdot S \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]. \quad (2)$$

Підставляючи формулу (2) в формулу (1), одержуємо

$$E = -k \cdot B_0 \cdot S \cdot \exp(-k \cdot t).$$

Розмірність E не залежить від показника експоненти, оскільки він безрозмірний. Розрахуємо розмірність E :

$$[E] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \text{В}$$

Числове значення –

$$E = 0,5 \cdot 0,04 \cdot \exp(-0,1 \cdot 2,3) = 2,06 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Задача 14. У коливальному контурі з індуктивністю $0,01 \text{ Гн}$ відбуваються затухаючі коливання, причому заряд конденсатора зменшується у 10 разів за час одного періоду 10^{-5} с . Визначити опір контура.

Розв'язок

$L = 0,01 \text{ Гн}$ $q_0/q = 10$ $T = 10^{-5} \text{ с}$ $R - ?$	При затухаючих коливаннях заряд на обкладках конденсатора змінюється за законом
---	---

$$q = q_0 \cdot e^{-R \cdot t / 2L} \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (1)$$

При $t = 0$ заряд на конденсаторі дорівнює q_0 , а через період –

$$q = q_0 \cdot e^{-R \cdot T / 2L} \cdot \cos(2 \cdot \pi) = q_0 \cdot e^{-R \cdot T / 2L}. \quad (2)$$

Звідси одержуємо $R = \frac{2 \cdot L}{T} \cdot \ln \frac{q_0}{q}$.

Розмірність – $[R] = \frac{\text{Гн}}{\text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{Ом}$.

Числове значення – $R = \frac{2 \cdot 0,01}{10^{-5}} \cdot \ln 10 = 4605 \text{ Ом}$.

Задача 15. Одношарова обмотка котушки довжиною 50 см і діаметром 5 см складається з 500 витків проводу перерізом 1 мм². При якій частоті змінного струму її імпеданс вдвічі більший від опору ?

Розв'язок

$l = 0,5 \text{ м}$ $S_1 = 10^{-6} \text{ м}^2$ $N = 500$ $d = 0,05 \text{ м}$ $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ $\nu - ?$	За умовою задачі імпеданс вдвічі більший опору: $Z = 2R$. (1) Імпеданс котушки – $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. (2) З рівнянь (2) і (1) одержуємо значення ω
--	--

циклічної частоти: $\omega = \sqrt{3} \frac{R}{L}$.

Визначимо R і L через параметри котушки:

$$R = \frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot \rho}{S_1}, \quad L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi d^2}{4l}$$

де $(N \cdot \pi \cdot d)$ – довжина проводу. Підставляючи R і L у вираз для ω ,

одержуємо $\nu = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{2 \sqrt{3} \rho l}{\pi S_1 \cdot \mu_0 N d}$.

Розмірність – $[\nu] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гн}} = \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{А}}{\text{В} \cdot \text{с}} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}$.

Числове значення – $\nu = \frac{2 \sqrt{3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5}{\pi \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,05} = 300 \text{ Гц}$.

Оптика, фізика атома, ядра, твердого тіла

Задача 1. Від двох когерентних джерел ($\lambda = 0,8$ мкм) промені попадають на екран, на якому спостерігають інтерференційну картину. Коли на шляху одного з променів, перпендикулярно йому, розташували мильну плівку ($n = 1,33$), інтерференційна картина змінилася на протилежну. При якій найменшій товщині плівки це можливо?

Розв'язок

$\lambda = 0,8$ мкм $n = 1,33$ $d_{\text{мін}} - ?$	Зміна інтерференційної картини на протилежну означає, що на тих місцях екрану, де спостерігалися максимуми освітленості, почали спостерігати мінімуми і навпаки. Таке можливо при зміні оптичної різниці ходу променів на непарне число напівдовжин хвилі.
---	--

У разі мінімальної товщини плівки це $\lambda/2$.

Якщо товщина плівки $d_{\text{мін}}$, то

$$d_{\text{мін}} \cdot (n - 1) = \frac{\lambda}{2},$$

звідки

$$d_{\text{мін}} = \frac{\lambda}{2 \cdot (n - 1)} = \frac{0,8 \cdot \text{мкм}}{2 \cdot 0,33} = 1,21 \text{ мкм.}$$

Задача 2. Визначити концентрацію цукрового розчину, якщо при проходженні світла через трубку з цим розчином довжиною 20 см площина поляризації світла повертається на кут 10° . Питоме повертання цукру у розчині $0,6$ град/(дм·%).

Розв'язок

$l = 20$ см = 0,2 м $\theta = 10^\circ$ $[\alpha] = 0,6$ град/(дм·%) $c - ?$	Концентрацію цукру в розчині визначимо за формулою $\theta = [\alpha] \cdot c \cdot l$, (1) де θ – кут повороту площини поляризації, $[\alpha]$ – питоме повертання цукру, c – кон- центрація цукру у розчині, l – довжина шляху світла у розчині.
---	---

З формули (1) одержуємо $c = \frac{\theta}{[\alpha] \cdot l} = \frac{10}{0,6 \cdot 0,2} = 8,22 \%$.

Задача 3. Визначити імпульс і кінетичну енергію електрону, який ухачється зі швидкістю $0,9 \cdot c$, де c – швидкість світла у вакуумі.

Розв'язок

$v = 0,9 \cdot c$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $K, W_k - ?$	Імпульс релятивістської частки визначається співвідношенням $K = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$
--	--

де m_0 – маса спокою частки.

Числове значення імпульсу електрона

$$K = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 0,9 \cdot \sqrt{1 - 0,81} = 5,5 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Кінетична енергія визначається як різниця між енергією рухомої частки і енергією спокою частки:

$$W_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2 \quad (2)$$

Числове значення –

$$W_k = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \cdot 0,9 \cdot (1 / \sqrt{1 - 0,81} - 1) = 1,06 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Задача 4. Довжина хвилі у вакуумі на яку припадає максимум енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла, дорівнює 0,58 мкм. Визначити енергетичну світність тіла.

Розв'язок

$\lambda = 0,58 \text{ мкм}$ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ $c = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ $R_e - ?$	Енергетична світність абсолютно чорного тіла визначається за законом Стефана-Больцмана: $R_e = \sigma \cdot T^4, \quad (1)$ де σ – стала Стефана-Больцмана,
--	---

T – абсолютна температура тіла. Температуру тіла в формулі (1) можна знайти, якщо скористатись законом зміщення Віна :

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{c}{T}, \quad (2)$$

де c – стала закону Віна. Підставляючи T із виразу (2) в формулу (1), одержуємо

$$R_e = \sigma \cdot (c/\lambda_{\text{max}})^4.$$

Розмірність – $[R_e] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{К}^4}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

Числове значення –

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (2,90 \cdot 10^{-3} / 0,58 \cdot 10^{-7})^4 = 3,54 \cdot 10^7 \cdot (\text{Вт}/\text{м}^2).$$

Задача 5. Визначити кінетичну енергію і швидкість фотоелектронів при опроміненні натрію променями з довжиною хвилі 400 нм, якщо червона межа фотоефекту для натрію відповідає довжині хвилі 600 нм.

Розв'язок

$$\begin{aligned} \lambda &= 400 \text{ нм} \\ \lambda_{\text{ч}} &= 600 \text{ нм} \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \end{aligned}$$

$$W_k, v - ?$$

Кінетичну енергію і швидкість фото-електронів при опроміненні натрію визначимо за формулою Ейнштейна для фотоелекту:

$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

де h – стала Планка; ν – частота світла; A – робота виходу електронів; m – маса електрона; v – його швидкість.

Якщо на метал падає світло граничної частоти, то кінетична енергія електронів, що вириваються, дорівнює нулю, і, виражаючи енергію фотона як $E = h \cdot \nu$, замість виразу (1) для червоної межі фотоелекту одержуємо

$$\frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{ч}}} = A. \quad (2)$$

Підставляючи вираз (2) в формулу (1), одержуємо

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{ч}}} + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (3)$$

звідки визначаємо як кінетичну енергію електронів, так і їх швидкість:

$$W_k = h \cdot c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{ч}}} \right); \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot W_k}{m}}$$

Розмірність – $W_k = \frac{\text{Дж}\cdot\text{с}\cdot\text{м}}{\text{м}\cdot\text{с}} = \text{Дж}$.

Числові значення –

$$W_k = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \left(\frac{1}{400 \cdot 10^{-9}} - \frac{1}{600 \cdot 10^{-9}} \right) = 1,67 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,05 \text{ еВ},$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 6,05 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Задача 6. Визначити енергію фотона, випромінюваного атомом водню при переході електрону з третього енергетичного рівня на перший, і довжину електромагнітної хвилі, яка відповідає цьому фотону.

Розв'язок

$$\begin{aligned} n &= 3 \\ m &= 1 \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \\ R &= 1,1 \cdot 10^7 \text{ 1/м} \end{aligned}$$

$$E, \lambda - ?$$

При переході електрону в стан з меншим квантовим числом випромінюється фотон з енергією:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (1)$$

де h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі;

λ – довжина хвилі, яка пов'язана з квантовими числами n і m співвідношенням

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2)$$

де R – стала Рідберга; m – квантове число стану, в який переходить електрон із стану n .

Згідно з формулою (2) $\frac{1}{\lambda} = 1,1 \cdot 10^7 \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) = 9,77 \cdot 10^6 \text{ 1/м,}$
 або $\lambda = 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 102 \text{ нм.}$

За формулою (1)

$$E = \frac{6,3 \cdot 10^{-18}}{1,02} = 1,95 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 12,2 \text{ еВ.}$$

Задача 7. Визначити дефект маси і енергію зв'язку ядра атома бору ${}_{5}^{10}\text{B}$.

Розв'язок

$m_{\text{H}} = 1,00783 \text{ а.о.м}$ $m_{\text{n}} = 1,00867 \text{ а.о.м}$ $m_{\text{a}} = 10,01294 \text{ а.о.м.}$	Дефект маси ядра є різниця між масою нуклонів, складаючих ядро, і масою ядра: $\Delta m = Z \cdot m_{\text{p}} + (A - Z) \cdot m_{\text{n}} - m_{\text{я}}. \quad (1)$ У формулі (1) Z і A – зарядове і масове числа атома. Для розглянутого атома бору $Z = 5, A = 10.$
$\Delta m, \Delta W - ?$	

Масу ядра знайдемо як різницю маси атома і суми мас електронів

$$m_{\text{я}} = m_{\text{a}} - Z \cdot m_{\text{e}}, \quad (2)$$

де m_{e} – маса електрону. З урахуванням останнього виразу формулу (1) перепишемо у вигляді

$$\Delta m = Z \cdot m_{\text{H}} + (A - Z) \cdot m_{\text{n}} - m_{\text{a}}, \quad (3)$$

де m_{H} – маса нейтрального атома водню. Підстановка числових значень в останнє співвідношення дає

$$\Delta m = 5 \cdot 1,00783 + 5 \cdot 1,00867 - 10,01294 = 0,06956 \text{ а.о.м.}$$

Енергія зв'язку ядра – це енергія, яка виділяється у вигляді випромінення при утворенні ядра.

Енергія зв'язку визначається рівнянням

$$\Delta W = m \cdot c^2, \quad (4)$$

де c – швидкість світла у вакуумі. Якщо виразити ΔW у електрон-вольтах, то $\Delta W = 931 \cdot \Delta m$, де коефіцієнт 931 МеВ/а.о.м показує, яка енергія в МеВ відповідає масі в 1 а.о.м.

Для розглядуваного ядра одержуємо числове значення –

$$W = 931 \cdot 0,06856 = 64,8 \text{ МеВ.}$$

ЗАДАЧІ

Фізичні основи механіки

Кінематика

Поступальний рух	Обертальний рух
$v = \frac{ds}{dt}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
$a = \frac{dv}{dt}$	$\beta = \frac{d\omega}{dt}$
$a = 0; v = \text{const}; s = v \cdot t$	$\beta = 0; \omega = \text{const}; \varphi = \omega \cdot t$
$a = \text{const}; v = v_0 + a \cdot t$	$\beta = \text{const}; \omega = \omega_0 + \beta \cdot t$
$s = v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$	$\varphi = \omega_0 \cdot t + \frac{\beta \cdot t^2}{2}$

де s – шлях; φ – кут повороту; v – лінійна швидкість; ω – кутова швидкість; t – час; v_0 – початкова швидкість; a – дотичне прискорення; β – кутове прискорення.

При криволінійному русі дотичне прискорення

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

характеризує зміну швидкості за величиною, а нормальне (доцентрове) прискорення

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

характеризує зміну швидкості за напрямком. Повне прискорення дорівнює

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (3)$$

Тут v – швидкість тіла; R – радіус кривизни траєкторії в даній точці.

При рівномірному обертальному русі кутова швидкість –

$$\omega = \varphi/t = 2\pi/T = 2\pi \cdot \nu, \quad (4)$$

де T – період обертання; ν – частота обертання (число обертів за 1с).

Зв'язок модулів лінійних і кутових швидкостей та прискорень –

$$v = \omega R; \quad a_\tau = \beta \cdot R; \quad a_n = \omega^2 \cdot R. \quad (5)$$

Динаміка

Другий закон Ньютона –

$$F \cdot dt = d(m \cdot v), \quad (6)$$

де $F \cdot dt$ – елементарний імпульс сили; $d(m \cdot v)$ – елементарна зміна імпульсу (кількості руху) тіла.

Елементарна робота змінної сили –

$$dA = F \cdot ds, \quad (7)$$

де F – проекція сили на переміщення; ds – елементарне переміщення.

При постійній силі –

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (8)$$

Потужність $N = dA/dt$ ($N = A/t$ – при постійній потужності), де A – робота, що виконується за час t .

Потенціальна енергія пружно деформованого тіла –

$$W_p = \frac{k \cdot x^2}{2}, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт пружності; x – величина деформації.

Потенціальна енергія тяжіючих тіл

$$W_g = - \frac{Gm_1m_2}{r}, \quad (10)$$

де r – відстань між точковими порівняно з r тілами масами m_1 і m_2 ; G – гравітаційна стала.

Обертальний рух твердого тіла

Модуль моменту сили відносно осі обертання

$$M = F \cdot l, \quad (11)$$

де l – плече сили (відстань від осі обертання до напрямку дії сили).

Момент інерції матеріальної точки відносно осі обертання

$$J = m \cdot r^2, \quad (12)$$

де m – маса матеріальної точки; r – відстань від осі обертання до матеріальної точки.

Момент інерції твердого тіла відносно осі обертання

$$J = \int r^2 \cdot dm, \quad (13)$$

де r – відстань від елементарної маси dm до осі обертання (інтегрування ведеться по всьому об'єму тіла).

Момент інерції суцільного однорідного циліндра (диска) відносно осі циліндра

$$J = \frac{m \cdot R^2}{2}, \quad (14)$$

де m і R – маса і радіус циліндра (диска).

Момент інерції кулі відносно осі, яка проходить через її центр –

$$J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2. \quad (15)$$

Основний закон обертального руху

$$M \cdot dt = d(J \cdot \omega), \quad (16)$$

де $M \cdot dt$ – елементарний імпульс моменту сил, $d(J \cdot \omega)$ – елементарна зміна моменту імпульсу тіла. При постійному моменті інерції тіла J –

$$M = J \cdot \beta, \quad (17)$$

де β – кутове прискорення.

Кінетична енергія тіла, що обертається,

$$W_k = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (18)$$

Робота і потужність при обертальному русі –

$$A = M \cdot \varphi; N = M \cdot \omega, \quad (19)$$

де M – момент сили; φ – кут повороту; ω – кутова швидкість.

Гідродинаміка

Закон Пуазейля –

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l}, \quad (20)$$

де Q – об'ємний розхід рідини, η – коефіцієнт в'язкості рідини, r – радіус труби, l – довжина труби, Δp – різниця тисків на вході і виході труби.

Коливання і хвилі

Рівняння гармонічного коливання –

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (21)$$

де x – зміщення точки від положення рівноваги; A – амплітуда; T – період; φ – початкова фаза; $\nu = 1/T$ – частота; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$ – циклічна частота коливань.

Швидкість і прискорення точки, що здійснює гармонічні коливання, –

$$v = dx/dt = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi), \quad a = dv/dt = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (22)$$

Сила, під дією якої точка масою m здійснює гармонічні коливання, –

$$F = m \cdot a = -k \cdot x = -m \cdot \omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = -k \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (23)$$

де k – коефіцієнт пружної або квазіпружної сили.

Період пружних коливань –

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{m/k}. \quad (24)$$

Період коливань математичного маятника

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{l/g}, \quad (25)$$

де l – довжина маятника, g – прискорення вільного падіння.

Рівняння затухаючих коливань має вигляд

$$x = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (26)$$

де β – коефіцієнт затухання. При цьому $\beta = r/2m$, де r – коефіцієнт опору. Величина $\Delta = \beta \cdot T$ називається логарифмічним декрементом затухання.

Рівняння хвилі (залежність збурення хвильового процесу ξ від часу t , та координати x) –

$$\xi = A \cdot \sin\left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + \varphi\right], \quad (27)$$

де A – амплітуда коливань; c – швидкість поширення хвилі; x – відстань від джерела коливань до даної точки середовища, у якому поширюється хвиля.

* * *

101. Ширина захвату безлафетної жатки для збирання зернових культур дорівнює 4,9 м. Яку площу може викосити жатка за 8-годинну зміну, якщо вона рухається зі швидкістю 10 км/год?

102. Залежність переміщення тіла від часу подається рівнянням

$$s = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3,$$

де $C = 0,14 \text{ м/с}^2$ і $B = 0,01 \text{ м/с}^3$. Знайти:

1) за який час після початку руху прискорення тіла буде дорівнювати 1 м/с^2 ?

2) чому дорівнює середнє значення прискорення тіла за цей проміжок часу?

103. Барабан молотарки обертається зі сталою частотою, яка дорівнює 180 об/хв. З моменту скидання привідного паса барабан обертається рівносповільнено з кутовим прискоренням 3 рад/с^2 . За який час він зупиниться? Яке число обертів барабан зробить до зупинки?

104. Під яким кутом до горизонту слід розкидати добрива, щоб висота підйому дорівнювала дальності польоту? Опором повітря знехтувати.

105. Колесо трактора починає обертатись зі сталим прискоренням $0,04 \text{ рад/с}^2$. За який час повне прискорення будь-якої точки колеса буде спрямоване під кутом 76° до напрямку швидкості у даній точці?

106. Залежність переміщення від часу подається рівнянням

$$s = A \cdot t - B \cdot t^2 + C \cdot t^3,$$

де $A = 2 \text{ м/с}$, $B = 3 \text{ м/с}^2$, $C = 4 \text{ м/с}^3$. Знайти: 1) залежність швидкості і прискорення від часу; 2) відстань, пройдену тілом і швидкість та прискорення тіла через 2 с після початку руху.

107. Колесо обертається зі сталим кутовим прискоренням 2 рад/с^2 . Через 0,5 с після початку руху повне прискорення точок на ободі колеса стало дорівнювати $13,6 \text{ см/с}^2$. Знайти радіус колеса.

108. Колесо автомобіля, що обертається з частотою 500 об/хв, при гальмуванні почало обертатися рівносповільнено і зупинилося через 30 с. Знайти кутове прискорення і число обертів від моменту гальмування до зупинки.

109. Колесо радіусом 0,1 м обертається так, що залежність кута повороту радіуса колеса від часу подається рівнянням $\varphi = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3$, де $B = 2 \text{ рад/с}$, $C = 1 \text{ рад/с}^2$, $D = 1/6 \text{ рад/с}^3$. Знайти кутові швидкість та прискорення колеса через 2 с після початку руху, а також для точок, що лежать на ободі колеса, знайти лінійну швидкість, тангенціальне і нормальне прискорення.

110. Залежність кута повороту радіуса колеса від часу подано рівнянням $\varphi = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3$, де $B = 2 \text{ рад/с}$, $C = 1 \text{ рад/с}^2$, $D = 1 \text{ рад/с}^3$. Знайти радіус колеса, якщо відомо, що на кінець 2 с руху нормальне прискорення точки на ободі колеса дорівнює $3,46 \text{ м/с}^2$.

111. Автомобіль рухається по закругленню шосе з радіусом кривизни 50 м. Закон руху автомобіля має вигляд $s(\text{м}) = 10 + 10 \cdot t - 0,5 \cdot t^2$. Знайти швидкість автомобіля, його тангенціальне, нормальне і повне прискорення через 5 с після початку руху.

112. Великий шків ремінної передачі має радіус 32 см і обертається з частотою 120 об/хв. Малий шків передачі має радіус 24 см. Знайти:

- 1) лінійну швидкість точок ременя;
- 2) кутову швидкість обертання малого шківа і його частоту (об/хв);
- 3) нормальне прискорення точок на поверхнях обох шківів.

113. З якою швидкістю рухається різець токарного верстату відносно станини (корпуса), якщо оброблювана деталь робить 600 об/хв, а ширина стружки 0,5 мм?

114. Трактор за 8 год зорює поле площею 2 га при захваті лемехів 1,2 м і опорі ґрунту 17600 Н. Визначити потужність мотору, якщо ККД дорівнює 80 %.

115. Тваринницька ферма, що має 200 голів великої і 1000 голів малої худоби, постачається водою з водопровідної башти висотою 15 м. Яку роботу виконує за добу насос, що подає воду в башту, якщо добова витрата води становить 60 л на голову великої худоби і 10 л на голову малої худоби. ККД насоса дорівнює 80 %.

116. Швидкість підйому крюка з вантажем 3 т дорівнює 30 м/хв. Визначити ККД крану, якщо потужність двигуна 16 кВт.

117. На будівництві будинку за допомогою баштового крану підіймають вантаж 2,5 т на висоту 30 м за 1,5 хв. На крані встановлено двигун потужністю 12 кВт. Визначити ККД баштового крану.

118. Обчислити потужність двигуна насосу, що подає 1 м^3 води щохвилини на висоту 10 м, якщо ККД установки 72 % .

119. Автомобіль важить $9,81 \cdot 10^3$ Н. Під час руху автомобіля на нього діють сили тертя в 0,1 його ваги. Яку кількість бензину витрачає двигун автомобіля на збільшення швидкості від 10 км/год до 40 км/год на шляху в 0,5 км? ККД двигуна автомобіля дорівнює 20 %.

120. Автомобіль рухається зі сталою швидкістю 54 км/год. Його двигун розвиває потужність 39,5 кВт. ККД двигуна дорівнює 90 %. Визначити силу тяги ведучих коліс.

121. Автомобіль буксирують горизонтально зі швидкістю 5 м/с. Натяг троса дорівнює 600 Н. Яка робота виконується при переміщенні автомобіля на відстань 1,5 км? Визначити потужність, що розвивається при буксировці.

122. Вантажний автомобіль масою 5 т, рухаючись рівноприскорено зі стану спокою, пройшов за 2 хв відстань 1 км. Визначити роботу двигуна на цій ділянці шляху. Коефіцієнт тертя на всьому шляху вважати сталим і рівним 0,08.

123. Воду відкачують з колодязя глибиною 20 м. Для відкачки поставлено насос з мотором потужністю 3,68 кВт. Знайти ККД мотора, якщо за 7 год. роботи насос підіймає 380 м^3 води.

124. Витрати води на гідроелектростанції становлять $100\text{ м}^3/\text{с}$ при висоті падіння 10,5 м. Знайти ККД гідротурбіни, якщо потужність на валу турбіни дорівнює 9,2 МВт.

125. Тягач тягне сани з лісодервиною зі сталою швидкістю 15 км/год. З якою швидкістю тягач тягнучиме ті ж сани влітку по лежневій дорозі, якщо потужність двигуна в обох випадках однакова. Коефіцієнт тертя по льодовій дорозі 0,01, а по лежневій – 0,15.

126. Автомобіль масою 2,8 т рухається зі швидкістю 45 км/год. Знайти гальмівний шлях, якщо сповільнююча сила становить $2/3$ ваги автомобіля.

127. Автомобіль масою 1500 кг починає рівноприскорено підійматись вгору з ухилом 0,2 (тангенс кута, утвореного поверхнею дороги і горизонтом). В кінці підйому довжиною 36 м він розвинув швидкість 21,6 км/год. Чому дорівнює сила тяги мотора, якщо коефіцієнт тертя дорівнює 0,05?

128. Нахил ділянки шосе дорівнює 0,05. Спускаючись з вимкненим двигуном з гори, автомобіль рухається зі швидкістю 60 км/год. Яка має бути потужність двигуна, щоб він міг підійматись на той же ухил з тією ж швидкістю? Маса автомобіля дорівнює 1,5 т.

129. Визначити найменший кут нахилу площини до горизонту для спуску зерна самопливом, якщо коефіцієнт тертя ковзання дорівнює 0,6.

130. Знайти силу тяги, яку розвиває мотор автомобіля, що рухається вгору з прискоренням $1\text{ м}/\text{с}^2$. Нахил гори дорівнює 1 м на кожні 25 м шляху. Маса автомобіля 1900 кг, коефіцієнт тертя дорівнює 0,1.

131. Автомобіль рухається по невеликому підйому з швидкістю 3 м/с. Якщо він рухається в зворотньому напрямку, то при тій же потужності двигуна встановлюється швидкість 7 м/с. Яка швидкість встановиться при тій

же потужності мотору при русі по горизонтальному шляху? Вважати, що для вказаних швидкостей сила тертя не залежить від швидкості.

132. Автомобіль при потужності двигуна 20 к.с. рухається з гори зі сталою швидкістю 54 км/год. Сила тертя становить 1980,7 Н. Яку потужність має розвивати двигун цього автомобіля, щоб він рухався вгору з тим же нахилом і з тією ж швидкістю?

133. Під час руху автомобіля масою 1 т на нього діє сила тертя в 0,1 його ваги. Знайти силу тяги, яку розвиває двигун, якщо автомобіль рухається зі сталою швидкістю:

- 1) вгору по шляху з нахилом 1 м на 25 м шляху;
- 2) вниз по шляху з тим же нахилом.

134. При шліфуванні деталь притискується до шліфувального каменя радіусом 25 см з силою 39,2 Н. Визначити потрібну потужність при русі каменя з частотою 120 об/хв, якщо коефіцієнт тертя об камінь дорівнює 0,4.

135. Молот масою 10 кг б'є по невеликому куску м'якого заліза, що лежить на ковадлі. Маса ковадла 400 кг. Визначити ККД удару молота в даних умовах. Удар вважати непружним. Корисною вважати енергію, що йде на деформування заліза.

136. Дерев'яна куля масою 10 кг почеплена на нитці довжиною 2 м. У кулю влучає горизонтально куля масою 5 г і застряє в ній. Визначити швидкість кулі, якщо нитка з нею відхилилась від вертикалі на кут 3° . Розміром кулі знехтувати. Удар вважати центральним.

137. Тіло масою 3 кг рухається зі швидкістю 4 м/с і ударяється в нерухоме тіло такої ж маси. Вважаючи удар центральним і непружним, знайти кількість тепла, що виділиться при ударі.

138. Куля масою 2 кг рухається зі швидкістю 3 м/с і наздоганяє іншу кулю масою 3 кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с. Знайти швидкість куль після зіткнення, якщо удар був:

- 1) непружний;
- 2) пружний.

Удар вважати центральним.

139. Дві кулі почеплені на паралельних нитках так, що вони дотикаються. Маса першої – 0,2 кг, другої – 0,1 кг. Першу кулю відхиляють так, що її центр ваги підіймається на висоту 4,5 см, і відпускають. На які висоти підіймуться кулі після співудару, якщо удар був:

- 1) пружний;
- 2) непружний ?

140. Обчислити додаткову силу опору між колесами автомобіля і дорогою, що виникає під час його руху під вертикальним дощем зі швидкістю 12 м/с. Маса дощової краплі 0,1 г. Щосекунди на 1 м^2 поверхні автомобіля падає $3 \cdot 10^6$ крапель дощу. Поверхня автомобіля, що змочується дощем, 8 м^2 . Коефіцієнт тертя 0,02.

141. На колії на горизонтальній площині стоїть платформа з піском загальною масою 5 т. У платформу влучає снаряд масою 5 кг, що летить зі

швидкістю 400 м/с. Снаряд летить вздовж колії під кутом 36° до горизонту. Знайти швидкість платформи, якщо снаряд застряє в піску. Тертям знехтувати.

142. До сухожилля довжиною 12 см і діаметром 1,6 мм причеплено тягар 6,8 Н. При цьому воно видовжилось до 12,3 см. Визначити модуль Юнга сухожилля.

143. Снаряд, що летить зі швидкістю 500 м/с, розірвався на два осколки. Менший осколок, маса якого становить 20 % від загальної маси снаряда, полетів у протилежному напрямку зі швидкістю 200 м/с. Визначити швидкість більшого осколка.

144. Людина масою 70 кг стрибає з висоти 225 см на землю. Визначити середню силу, що діє на людину, якщо тривалість удару 0,2 с.

145. Вагон масою 40 т рухається зі швидкістю 0,1 м/с до упору. При повній зупинці вагону обидві буферні пружини стискаються на 10 см кожна. Визначити максимальну силу стискання буферних пружин і тривалість її дії.

146. Із ствола автоматичного пістолета вилітає куля масою 10 г зі швидкістю 200 м/с. Затвор пістолета масою 200 г притискується до стволу пружиною, жорсткість якої 25 кН/м. На яку відстань відійде затвор після пострілу? Вважати, що пістолет жорстко закріплений.

147. Дві пружини жорсткостями 1 кН/м і 3 кН/м закріплені паралельно. Визначити потенціальну енергію цієї системи при абсолютній деформації 5 см.

148. Дві пружини жорсткостями 300 кН/м і 500 кН/м закріплені послідовно. Визначити роботу розтягання обох пружин, якщо друга пружина була розтягнута на 3 см.

149. Ковзаняр масою 70 кг, стоячи на ковзанах на льоду, кидає горизонтально камінь масою 3 кг зі швидкістю 8 м/с. Знайти відстань, на яку він відкотиться при коефіцієнті тертя ковзанів об лід 0,02.

150. Із гармати, маса якої 500 кг, роблять постріл в горизонтальному напрямку. Маса снаряду 5 кг, його початкова швидкість 400 м/с. Після пострілу гармата відкочується на 40 см. Визначити середнє значення сили, яка виникає в протівідкотних пристроях.

151. Яку силу мають прикласти до пружини, щоб розтягнути її на 5 см, якщо при розтягу на 20 см її потенціальна енергія дорівнює 60 Дж.

152. Де знаходиться точка, в якій сили тяжіння до Місяця і Землі взаємно зрівноважуються?

153. Знайти чисельне значення: 1) першої космічної швидкості тіла, кинутого з поверхні Землі; 2) другої космічної швидкості тіла, кинутого з поверхні Землі.

154. Яку роботу мають виконати, щоб тіло масою 1 кг віддалити з поверхні Землі на безмежність?

155. З якою швидкістю має бути викинута з поверхні Сонця частинка, щоб вона змогла подолати силу тяжіння і віддалитись на безмежність?

156. Штучний супутник Землі має період обертання 2 години. Вважаючи траєкторію супутника коловою, знайти, на якій висоті над поверхнею Землі рухається супутник.

157. Штучний супутник обертається навколо Землі по коловій орбіті на висоті 3200 км над її поверхнею. Визначити лінійну швидкість супутника.

158. Визначити лінійну швидкість руху Землі навколо Сонця, беручи до уваги масу Сонця і відстань від Землі до Сонця. Орбіту Землі вважати коловою.

159. Мотоцикл їде по горизонтальній дорозі зі швидкістю 72 км/год, описуючи коло радіусом 100 м. На скільки мотоцикл мають нахилити, щоб не упасти на повороті?

160. На яку висоту над поверхнею Землі підіймається ракета, пущена вертикально вгору, якщо початкова швидкість ракети дорівнює першій космічній?

161. Знайти чисельне значення першої та другої космічних швидкостей для Місяця.

162. Порівняти прискорення сил тяжіння на поверхнях Місяця і Землі.

163. Штучний супутник Землі рухається по коловій орбіті з заходу на схід. На якій відстані від Землі має знаходитися супутник, щоб він був нерухомий по відношенню до спостерігача, який знаходиться на Землі?

164. Двигун трактора рівномірно обертає маховик. Після вимикання двигуна маховик робить протягом 30 с 120 обертів і зупиняється. Момент інерції маховика $0,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Приймаючи, що кутове прискорення маховика після вимикання двигуна стало, визначити потужність двигуна при рівномірному обертанні маховика.

165. Колесо, обертаючись рівносповільнено, при гальмуванні за одну хвилину зменшило швидкість обертання від 300 до 180 об/хв. Момент інерції колеса дорівнює $2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Знайти:

- 1) кутове прискорення колеса;
- 2) гальмівний момент;
- 3) роботу гальмування;
- 4) число обертів, зроблених колесом за цю хвилину.

166. Барабан молотарки, момент інерції якого дорівнює $20 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, робить 20 об/с. Визначити гальмівний момент, що діє на барабан, якщо він зупиняється через 3 хв 20 с після припинення дії обертаючого моменту.

167. Махове колесо, момент інерції якого $245 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, робить 20 об/хв. Після припинення дії обертаючого моменту воно зупиняється через 1 хв. Знайти момент сил тертя.

168. До ободу колеса у вигляді диска радіусом 0,5 м і масою 50 кг прикладена дотична сила 98 Н. Знайти:

- 1) кутове прискорення колеса;
- 2) час, за який колесо буде мати частоту обертання 100 об/с.

169. На шків маховика масою 500 кг діє стала сила 245 Н. Радіус шківів 0,1 м. За який час швидкість обертання маховика буде відповідати 1 об/с? Масу маховика вважати розподіленою по ободу на відстані 1 м від осі обертання.

170. Маховик має вигляд диска масою 49 кг і діаметром 40 см. Він був розкручений до швидкості 480 об/хв і потім залишений сам на себе. Під впливом сил тертя він зупиняється через 3 с. Знайти момент тертя, вважаючи його сталим.

171. Двигун потужністю 0,1 кВт приводить в рух токарний верстат, причому оброблюваний на верстаті дерев'яний циліндр діаметром 6 см обертається з частотою 600 об/хв. Визначити силу, з якою різець відокремлює стружку, вважаючи, що потужність на верстаті складає 80 % від потужності двигуна.

172. Маховик має вигляд диска масою 50 кг і радіусом 20 см. Він був розкручений до 480 об/хв і залишений сам на себе. Під дією сил тертя він зупиняється. Знайти момент сил тертя, вважаючи його сталим, якщо:

1) маховик зупинився через 50 с;

2) маховик до повної зупинки зробив 100 обертів.

173. Маховик радіусом 0,2 м і масою 10 кг з'єднаний з мотором за допомогою привідного ременя. Натяг ременя, що йде без проковзування, сталий і дорівнює 14,7 Н. Яке число обертів за хвилину буде робити маховик через 10 с після початку руху? Маховик вважати однорідним диском.

174. Маховик масою 5 кг, розподіленою по ободу радіусом 20 см, вільно обертається навколо горизонтальної осі, що проходить через його центр, роблячи 720 об/хв. При гальмуванні маховик повністю зупиняється через 20 с. Знайти гальмівний момент і число обертів, яке зробить маховик до повної зупинки.

175. Два маховики, виготовані у вигляді дисків радіусами 0,4 м і масою 100 кг кожний, розкрутили до швидкості 480 об/хв і залишили самих на себе. Під дією сил тертя перший маховик зупинився через 1 хв і 20 с, а другий до повної зупинки зробив 240 обертів. Визначити момент сил тертя вала об підшипники у кожного маховика.

176. Яку роботу треба виконати, щоб надати маховому колесу масою 1 кг швидкості 1 об/с. Масу колеса вважати розподіленою по ободу колеса радіусом 0,7 м.

177. Яку роботу треба виконати, щоб збільшити число обертів маховика, масу якого 500 кг можна вважати розподіленою по ободу діаметром 1,5 м, від 0 до 120 об/хв. Тертям знехтувати.

178. Обруч і суцільний циліндр мають однакові маси по 2 кг і котяться з однаковою швидкістю 5 м/с без проковзування. Знайти кінетичні енергії цих тіл.

179. Визначити кінетичну енергію обертання Землі навколо осі і порівняти її з кінетичною енергією поступального руху Землі по орбіті навколо Сонця.

180. Визначити обертальний момент мотору, якщо при потужності 15 кВт він робить 2880 об/хв.

181. Людина знаходиться на краю круглої горизонтальної платформи радіусом 4 м, яка обертається навколо вертикальної осі. До якої частоти обертання платформи людина може вдержатись на ній при коефіцієнті тертя 0,27?

182. Знайти момент інерції і момент імпульсу земної кулі відносно осі обертання.

183. Кінетична енергія вала, що обертається з частотою 5 об/с, дорівнює 60 Дж. Знайти момент імпульсу вала.

184. Махове колесо починає обертатися зі сталим кутовим прискоренням $0,5 \text{ рад/с}^2$ і через 15 с набуває моменту імпульсу $73,5 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$. Знайти кінетичну енергію колеса через 20 с після початку обертання.

185. На лаві Жуковського сидить людина і тримає у витягнутих руках гирі по 10 кг кожна. Відстань від кожної гирі до осі обертання лави 75 см. Лава обертається з частотою 1 об/с. Як зміниться обертання лави і яку роботу виконає людина, якщо вона стисне руки так, що відстань від кожної гирі до осі зменшиться до 20 см? Сумарний момент інерції людини і лави відносно осі обертання дорівнює $25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

186. Платформа у вигляді диска радіусом 1 м і масою 200 кг обертається по інерції навколо вертикальної осі з частотою 1 об/с. На краю платформи стоїть людина масою 50 кг. З якою частотою буде обертатись платформа, якщо людина перейде на півметра ближче до центра? Момент інерції людини розраховувати як момент інерції матеріальної точки.

187. Який об'єм води протече по трубі діаметром 10 мм і довжиною 15 м за 1 год, якщо різниця тисків на кінцях труби дорівнює $1\cdot 10^5 \text{ Па}$? Скільки у тих самих умовах протече гліцерину?

188. Двигун мотоциклу здійснює 2400 об/хв. При цьому поршень двигуна здійснює рух, який можна вважати гармонічним коливанням. Хід поршня 9 см. Знайти його максимальне прискорення.

189. Плоска спіральна пружина здійснює гармонічні коливання. При цьому максимальна кутова швидкість її $0,63 \text{ с}^{-1}$ і максимальне кутове прискорення $3,9 \text{ с}^{-2}$. Знайти амплітуду і період коливань.

190. Вважаючи рух поршня в двигуні внутрішнього згорання гармонічним коливанням, визначити силу, яка діє на колінчатий вал з боку поршня, коли він знаходиться у мертвій точці. Маса поршня - 1,2 кг, частота обертання - 2000 об/хв, хід поршня - 12 см. Вважати, що тиск газів в циліндрі дорівнює атмосферному.

191. До пружини підчеплено тягар масою 20 кг. Знаючи, що пружина під дією сили 9,8 Н розтягується на 1,5 см, визначити період вертикальних коливань.

192. Визначити середню (від крайнього положення до другого крайнього положення), мінімальну і максимальну швидкості руху кінця камертону, якщо амплітуда 0,2 мм і частота 500 Гц.

193. Визначити частоту власних і затухаючих коливань автомобіля, якщо його маса 2,7 т, коефіцієнт затухання коливань 1 рад/с, жорсткість підчепу $2,7 \cdot 10^5$ Н/м.

194. Знайти швидкість точки, що коливається, в моменти: 0, T, 2·T, 3·T і 4·T (T – період коливань), якщо рівняння затухаючих коливань наведено у вигляді $x = 5 \cdot \exp(-0,25 \cdot t) \cdot \sin[(\pi/2) \cdot t]$.

195. Зміщення від положення рівноваги точки, яка знаходиться на відстані 4 см від джерела коливань, в момент часу T/6 дорівнює половині амплітуди. Знайти довжину хвилі.

196. Знайти зміщення від положення рівноваги точки, яка знаходиться на відстані $x = \lambda/12$ від джерела коливань, для моменту $t = T/6$. Амплітуда коливань $A = 0,05$ м. Початкова фаза дорівнює нулю.

197. Хвиля з частотою коливань 0,5 Гц і амплітудою 1,2 см поширюється у пружному середовищі зі швидкістю 20 м/с. Знайти зміщення від положення рівноваги точки, яка віддалена на 30 м від джерела коливань.

198. Довжина хвилі коливань, що поширюються у пружному середовищі, дорівнює 5 м. Визначити різницю фаз коливань точок, які віддалені одна від одної за напрямком променя на 7 м.

199. Хвиля з періодом коливань 1,2 с і амплітудою 2 см поширюється у пружному середовищі зі швидкістю 15 м/с. Визначити:

1) довжину хвилі;

2) фазу, зміщення, швидкість і прискорення точки, яка віддалена на 45 м від джерела хвиль, в момент часу $t = 4$ с;

3) різницю фаз двох точок, що лежать на промені і віддалені від джерела коливань на 20 і 30 м.

Молекулярна фізика і термодинаміка

Закон Бойля-Маріотта -

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2, \quad (1)$$

де P_1 і V_1 – початкові значення тиску і об'єму газу; P_2 і V_2 – кінцеві значення тиску і об'єму газу; температура газу залишається сталою.

Закон Гей-Люссака -

$$V_1/T_1 = V_2/T_2, \quad (2)$$

де T_1 і T_2 – початкова і кінцева температури; V_1 та V_2 – відповідні об'єми газу; тиск газу сталий.

Закон Шарля -

$$P_1/T_1 = P_2/T_2, \quad (3)$$

де P_1 і P_2 – відповідні температурам T_1 і T_2 значення тисків газу; об'єм газу сталий.

Об'єднаний газовий закон (рівняння Клапейрона -

$$P_1 \cdot V_1/T_1 = P_2 \cdot V_2/T_2, \quad (4)$$

Рівняння Менделєєва-Клапейрона -

$$P \cdot V = (m/\mu) \cdot R \cdot T, \quad (5)$$

де m – маса газу; μ – молярна маса; R – універсальна газова стала.

Число молекул в системі -

$$N = (m/\mu) \cdot N_A, \quad (6)$$

де N_A – число Авогадро.

Середня кінетична енергія руху молекули -

$$\langle w \rangle = (i/2) \cdot k \cdot T, \quad (7)$$

де i – число ступенів вільності молекули; k – стала Больцмана; T – температура газу.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії -

$$P = (2/3) \cdot n \cdot \langle w \rangle, \quad (8)$$

де n – число молекул в одиниці об'єму; $\langle w \rangle$ – середнє значення енергії поступального руху молекули.

Внутрішня енергія ідеального газу -

$$W = (i/2) \cdot (m/\mu) \cdot R \cdot T. \quad (9)$$

Середня квадратична швидкість молекули -

$$\langle v^2 \rangle = 3kT/\mu. \quad (10)$$

Середня арифметична швидкість молекули -

$$\langle v \rangle = \sqrt{10kT/\mu}. \quad (11)$$

Молярна теплоємність газу при сталому об'ємі -

$$C_V = (i/2) \cdot R. \quad (12)$$

Молярна теплоємність газу при сталому тиску -

$$C_P = C_V + R. \quad (13)$$

Середня довжина вільного пробігу молекули -

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma}, \quad (14)$$

де d – ефективний діаметр молекули; n – концентрація молекул.

Закон дифузії Фіка -

$$M = -D \cdot (dp/dx) \cdot S \cdot t, \quad (15)$$

де M – перенесена маса через площу S за проміжок часу t ; D – коефіцієнт дифузії; dp/dx – градієнт густини.

Коефіцієнт дифузії газу -

$$D = \langle v \rangle \cdot \lambda / 3. \quad (16)$$

Закон теплопровідності Фур'є -

$$Q = -k \cdot (dT/dx) \cdot S \cdot t, \quad (17)$$

де Q – перенесена енергія через площу S за час t ; dT/dx – градієнт температури; k – коефіцієнт теплопровідності.

Закон Стокса -

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (18)$$

де F – сила опору при русі сферичного тіла з радіусом r в суцільному середовищі з в'язкістю η .

Робота газу при ізотермічному розширенні -

$$A = (m/\mu) \cdot R \cdot T \cdot \ln(V_2/V_1). \quad (19)$$

Рівняння адиабатичного процесу (Пуасона) -

$$P_1/P_2 = (V_2/V_1)^\gamma. \quad (20)$$

Термічний ККД теплової машин -

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1. \quad (21)$$

Калоричний ККД теплової машини -

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1. \quad (22)$$

Додатковий тиск під сферичною поверхнею -

$$P = 2 \cdot \alpha / R, \quad (23)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу; R – радіус кривизни поверхні.

Висота підняття рідини в капілярній трубці (формула Жюрена) -

$$h = 2 \cdot \alpha \cdot \cos\theta / \rho \cdot g \cdot r, \quad (24)$$

де θ – крайовий кут; r – радіус капіляра; g – прискорення сили тяжіння; ρ – густина рідини.

* * *

201. Визначити число атомів у 1 г водню.
202. Знайти масу однієї молекули води.
203. Скільки молекул в 1 м³ води при 4° С?
204. Яке число молекул міститься в 10 г кисню?
205. Яка маса 30 молекул сірководню?
206. Скільки атомів у 1 г ртуті?
207. Скільки молекул азоту в 0,5 кг його?
208. Знайти масу 10⁶ молекул сірчаної кислоти.
209. Скільки молекул в 1 г кухонної солі?
210. В посудині 24,08·10²⁷ атомів гелію. Яка маса газу?
211. При нагріванні деякої маси газу на 1 К при сталому об'ємі тиск газу збільшився на 1/350 частку від початкового. Знайти початкову температуру газу.
212. Зниження температури газу на 5 К спонукає зменшення його тиску на 1/200 частку від початкового. Знайти початкову температуру газу.
213. Повітря в шинах автомобіля при температурі 243 К знаходиться під тиском 3 атм. Знайти тиск при 323 К.
214. Тиск газу в посудині змінився на 0,5 атм при зниженні температури від 393 К до 363 К. Знайти початковий тиск.
215. До якої температури мають нагріти газ, який знаходиться при деякій температурі T_0 , щоб при сталому тиску його об'єм подвоївся?

216. Газ, що знаходиться при температурі 290 К, нагріли при сталому об'ємі так, що тиск його потроївся. Визначити, на скільки зросла температура газу.

217. Кисень, що займав об'єм 10 л при нормальному атмосферному тиску, адіабатно стиснутий до об'єму 1 л. Знайти тиск газу після стиснення.

218. Об'єм пари вуглекислого газу при адіабатному стисненні зменшився у три рази. У скільки разів змінився тиск?

219. При адіабатному розширенні гелію, взятому при 273 К, його об'єм збільшився у 2 рази. Визначити температуру газу після розширення.

220. При адіабатному стисненні водню температура зросла у 3 рази. У скільки разів змінився тиск?

221. Яку температуру має азот масою 2 г, що займає об'єм 820 см³ при тиску 0,2 МПа?

222. Визначити тиск 4 кг кисню в посудині об'ємом 2 м³ при температурі 473 К.

223. Яка температура водню в балоні, якщо його маса 10 кг, а густина 0,3 кг/м³. Тиск газу в балоні 0,1 МПа.

224. Знайти густину азоту при тиску 2 атм і температурі 330 К.

225. Скільки молів повітря міститься у приміщенні об'ємом 1200 м³ при нормальних умовах?

226. Балон ємністю 20 л містить 500 г вуглекислого газу під тиском 13 атм. Визначити температуру газу.

227. При температурі 320 К і тискові 4 атм густина деякого газу дорівнює 6,1 кг/м³. Визначити молярну масу газу.

228. Визначити тиск повітря при температурі 500 К, якщо густина його дорівнює 0,9 кг/м³.

229. Визначити температуру водню, який має густину 6 кг/м³ при тиску 12,1 атм.

230. Визначити ємність балону, в якому знаходиться кисень масою 5 кг під тиском 5 атм. Температура газу 300 К.

231. Визначити енергію поступального руху атома водню при температурі 300 К.

232. Визначити енергію обертального руху молекули азоту при температурі 400 К.

233. Визначити повну енергію молекули вуглекислого газу при температурі 293 К.

234. Визначити енергію обертального руху всіх молекул водяної пари масою 20 г при температурі 400 К.

235. Обчислити середню енергію поступального руху молекул 120 г азоту при температурі 290 К.

236. В посудині міститься 2 г кисню при температурі 380 К. Визначити внутрішню енергію газу.

237. Чому дорівнює енергія теплового руху 5 г азоту при температурі 300 К?

238. Яка кількість молей водню міститься в посудині, якщо повна кінетична енергія газу дорівнює 2 МДж при температурі 300 К?

239. Визначити температуру азоту, якщо середня кінетична енергія поступального руху його молекул дорівнює $2,07 \cdot 10^{-21}$ Дж.

240. Визначити середню кінетичну енергію обертального руху молекули двоатомного газу, якщо повна кінетична енергія молекул одного моля цього газу 3,01 кДж.

241. Обчислити середню квадратичну швидкість молекул кисню при температурі 400 К.

242. Знайти відношення середньоквадратичних швидкостей молекул водню і кисню при однаковій температурі.

243. Частинки квіткового пилку жита мають діаметр 8 мкм. Застосовуючи до таких зважених у повітрі частинок формули кінетичної теорії газу, визначити їх середньоквадратичну швидкість при температурі повітря 293 К. Густина частинок вважати рівною густині води, а їх форму – сферичною.

244. Визначити температуру вуглекислого газу, якщо середньоквадратична швидкість його молекул дорівнює 200 м/с.

245. У повітрі, що видихає тварина, міститься водяна пара, при конденсації якої утворюються дрібні краплі масою 10^{-11} г. Визначити середню квадратичну швидкість водяних крапель, застосовуючи до них рівняння кінетичної теорії газів. Температуру легень тварини вважати рівною 310 К.

246. Обчислити молярну теплоємність при сталому тиску двоатомного газу.

247. Обчислити молярну теплоємність при сталому тиску одноатомного газу.

248. Різниця питомих теплоємностей деякого ідеального газу дорівнює 2,08 кДж/(кг·К). Визначити відносну молярну масу газу.

249. Обчислити питомі теплоємності при сталому тиску і сталому об'ємі гелію і вуглекислого газу, вважаючи ці гази ідеальними.

250. Обчислити молярну масу двоатомного газу, якщо питома теплоємність, виміряна при сталому тиску, дорівнює 2,08 кДж/(кг·К).

251. Знайти середнє число зіткнень молекул азоту за 1 с при температурі 300 К і тиску 10^5 Па

252. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул гелію в умовах, коли його густина дорівнює $2,1 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

253. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул азоту при 300 К і тиску 10^5 Па.

254. В колбі об'ємом 100 см³ міститься 0,5 г азоту. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул у цих умовах.

255. Визначити густину азоту, якщо середня довжина вільного пробігу його молекул дорівнює 0,1 см.

256. В балоні з вуглекислим газом тиск 50 атм. При температурі 300 К середнє число зіткнень становить $1,65 \cdot 10^{11}$ 1/с. Визначити ефективний діаметр молекул вуглекислого газу.

257. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул водню при 300 К і тиску $4 \cdot 10^{-6}$ Па.

258. У скільки разів при однакових умовах відрізняється середня довжина вільного пробігу молекул азоту і водню?

259. Визначити концентрацію молекул (число молекул в одиниці об'єму) азоту, якщо середня довжина вільного пробігу молекули дорівнює 10^{-6} м.

260. Яка середня арифметична швидкість молекул водню, якщо середня довжина вільного пробігу молекули дорівнює 10^{-4} м, а середнє число зіткнень його молекул – $5 \cdot 10^7$ 1/с?

261. Визначити кількість газу, що продифундував за 24 год через 1 м^2 ґрунту, якщо коефіцієнт дифузії газу дорівнює $0,05 \text{ см}^2/\text{с}$, а градієнт густини – $4 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^4$.

262. Визначити кількість тепла, що пройде за 10 год. через 1 м^2 поверхні піску, якщо температура поверхні 303 К, а на глибині 0,5 м температура становить 20 °С. Коефіцієнт теплопровідності піску $0,325 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

263. Яка товщина шару суглинистого ґрунту, якщо за 5 год. через поверхню ґрунту площею 10 см^2 проходить 250 Дж тепла. Різниця температур між поверхнями шару 10 °С. Коефіцієнт теплопровідності ґрунту $0,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

264. Визначити градієнт густини вуглекислого газу в ґрунті, якщо через 1 м^2 його поверхні за 1 с в атмосферу переходить $8 \cdot 10^{-2}$ мг вуглекислого газу. Коефіцієнт дифузії газу дорівнює $0,04 \text{ см}^2/\text{с}$.

265. Знайти коефіцієнт самодифузії гелію при нормальних умовах.

266. Знайти коефіцієнт самодифузії водню в умовах, коли середня довжина вільного пробігу його молекул становить $1,6 \cdot 10^{-7}$ м і температура 400 К.

267. Знайти густину еритроцитів, якщо швидкість їх осідання в крові дорівнює 10 мм/год. Вважати, що еритроцити мають форму кульок діаметром 5 мкм. Густина плазми крові $1,03 \text{ г/мл}$.

268. В молоці містяться мікроскопічні кульки масла, за рахунок підняття яких при відстоюванні утворюються вершки. Вважаючи, що до них можна застосувати закон Стокса, визначити в'язкість молока, якщо діаметр кульок 3 мкм і за 10 год. вони проходять відстань 7 мм. Густина масла 940 кг/м^3 , густина об'єму 1029 кг/м^3 .

269. Стальна кулька радіусом 2 мм падає в рідині з швидкістю 0,2 м/с. Визначити в'язкість рідини, якщо її густина дорівнює 1200 кг/м^3 .

270. Якої найбільшої швидкості може досягнути дощова крапля діаметром 3 мм? Вважати, що при русі краплі справедливий закон Стокса. В'язкість повітря дорівнює $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$.

271. Зовнішня поверхня бетонної стіни має температуру 253 К, а внутрішня – 293 К. Товщина стіни 0,5 м. Яка кількість тепла проходить через 1 м^2 поверхні стіни за 1 хв? Коефіцієнт теплопровідності бетону $2,33 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

272. Визначити масу газу, що продифундував за 12 год через поверхню ґрунту площею 12 см^2 , якщо коефіцієнт дифузії $0,05 \text{ см}^2/\text{с}$. Густина газу на глибині $0,5 \text{ м}$ дорівнює $1,2 \text{ кг/м}^3$, а біля поверхні – $0,9 \text{ кг/м}^3$.

273. Визначити час, протягом якого через поверхню 1 м^2 продифундує газ масою $0,7 \text{ г}$ з ґрунту в атмосферу, якщо коефіцієнт дифузії газу дорівнює $0,04 \text{ см}^2/\text{с}$, а градієнт густини $5 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^4$.

274. Який об'єм займають 2 г азоту, якщо його температура 280 К , а тиск газу 2 атм ?

275. 1 моль вуглекислого газу знаходиться при температурі 373 К . Знайти тиск газу, якщо його об'єм $0,05 \text{ м}^3$.

276. Гліцерин в капілярній трубці діаметром 1 мм піднявся на висоту 20 мм . Визначити коефіцієнт поверхневого натягу гліцерину, якщо змочування повне.

277. Яку кількість тепла мають затратити для нагрівання 200 г кисню від 273 К до 373 К при сталому тиску?

278. Знайти тиск 2 г азоту при температурі 280 К . Об'єм газу 820 см^3 .

279. Під яким тиском знаходиться азот масою $3,5 \text{ г}$, який займає об'єм 290 см^3 при температурі 280 К ?

280. За яких умов нагрівається водень (при сталому тиску чи при сталому об'ємі), якщо для підвищення температури одного моля водню на 10 К потрібно 208 Дж тепла?

281. 10 г кисню знаходяться під тиском 3 атм і температурі 283 К . Після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм 10 л . Знайти кількість тепла, одержаного газом.

282. Два кіломоля азоту нагріваються при сталому тиску на 50 К . Знайти зміну внутрішньої енергії газу.

283. При ізотермічному розширенні водню масою 1 г об'єм газу збільшився у 2 рази. Визначити роботу, виконану газом, якщо його температура 300 К .

284. Газ здійснює цикл Карно. Визначити ККД такого циклу, якщо температура нагрівача у $2,3$ рази вища за температуру холодильника.

285. Скільки потрібно тепла для нагрівання 2 кіломолей кисню на 100 К при сталому тиску?

286. Газ здійснює цикл Карно і віддає холодильнику $0,75$ тепла, одержаного від нагрівача з температурою 400 К . Яка температура холодильника?

287. В циклі Карно газ отримав від нагрівача $4,2 \text{ Дж}$ тепла і виконав роботу 1 Дж . Температура нагрівача 373 К . Яка температура холодильника?

288. Газ здійснює цикл Карно. Температура холодильника 290 К . У скільки разів збільшиться ККД циклу, якщо температура нагрівача збільшиться від 400 К до 600 К ?

289. Моллю водяної пари надано 2100 Дж тепла. Знайти роботу ізобарного розширення газу.

290. Здійснюючи цикл Карно, газ одержав від нагрівача тепло в 1 Дж . Скільки тепла віддано холодильнику, якщо теплова машина ідеальна, а її ККД дорівнює $0,25$?

291. На яку висоту підіймається бензол в капілярі діаметром 1 мм при повному змочуванні?

292. Капіляр радіусом 2 мм занурено в рідину. Знайти коефіцієнт поверхневого натягу рідини, якщо вага рідини, яка підіймалася в капілярі, дорівнює $8,82 \cdot 10^{-4}$ Н при повному змочуванні.

293. Визначити середній діаметр капілярів ґрунту, якщо вода підіймається в ньому на 49 мм при повному змочуванні.

294. Яка висота підняття води в стеблах рослин, що мають капіляри діаметром 0,4 мм, при повному змочуванні .

295. Вважаючи радіус капілярів ґрунту рівним 0,3 мм, знайти висоту підняття води в них під дією капілярних сил при повному змочуванні.

296. В етиловий спирт занурили на дуже малу глибину трубку з внутрішнім діаметром 0,5 мм. Яка вага спирту, що підіймається у капіляр при повному змочуванні?

297. Капілярну трубку занурили спочатку у воду, а потім у сироватку крові, причому виявилось, що висота підняття води в 1,23 рази більша за висоту підняття сироватки. Визначити за цими даними коефіцієнт поверхневого натягу сироватки, якщо її густина приблизно дорівнює густині води.

298. Тиск повітря в мильному пухирі на 133,3 Па вищий за атмосферний. Чому дорівнює діаметр пухиря ?

299. В посудину з водою занурено відкритий капіляр. Різниця рівней води в посудині і капілярі 2,8 см. Чому дорівнює радіус кривизни меніску в капілярі?

Електростатика і постійний струм

Закон Кулона взаємодії точкових зарядів

$$F = q_1 \cdot q_2 / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2), \quad (1)$$

де q_1 і q_2 – електричні заряди; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала.

Напруженість електричного поля

$$E = F / q, \quad (2)$$

де F – сила, що діє на точковий заряд q .

Напруженість електричного поля точкового заряду

$$E = q / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2). \quad (3)$$

Напруженість поля кількох дискретних зарядів знаходять за правилом геометричного складання полів окремих зарядів.

Напруженість поля безмежної однорідно зарядженої площини

$$E = \sigma / (2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0), \quad (4)$$

де σ – поверхнева густина зарядів на площині.

Напруженість поля зарядженої кулі

$$E = q / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2), \quad (5)$$

де q – заряд на кулі; r – відстань від центру кулі ($r > R$, де R – радіус кулі).

Робота при перенесенні заряду з точки 1 у точку 2 електричного поля

$$A = q \cdot (\phi_1 - \phi_2), \quad (6)$$

де ϕ_1 – потенціал початкової точки; ϕ_2 – потенціал наступної точки.

Потенціал поля точкового заряду

$$\phi = q / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r), \quad (7)$$

де r – відстань від заряду.

Зв'язок напруженості поля в точці з потенціалом

$$E = - d\phi / dr, \quad (8)$$

де похідна від потенціалу береться вздовж силової лінії.

У випадку однорідного поля із формули (8) випливає, що

$$E = U / d, \quad (9)$$

де U – різниця потенціалів; d – відстань між точками.

Потенціал відокремленого провідника і заряд на ньому пов'язані співвідношенням

$$q = C U, \quad (10)$$

де C – електрична ємність провідника.

Ємність плоского конденсатора

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S / d, \quad (11)$$

де S – площа обкладки конденсатора; d – відстань між обкладками.

Енергія зарядженого провідника

$$W = q \cdot \phi / 2 = C \cdot \phi^2 / 2 = q^2 / (2 \cdot C). \quad (12)$$

Енергія зарядженого конденсатора

$$W = q U / 2 = C \cdot U^2 / 2 = q^2 / (2 \cdot C). \quad (13)$$

Об'ємна густина енергії електричного поля

$$w = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 / 2. \quad (14)$$

Сила струму пов'язана з зарядом, що протікає через поперечний переріз провідника, співвідношенням

$$I = dq / dt . \quad (15)$$

При постійному струмі з формули (15) випливає, що

$$I = q / t. \quad (16)$$

Густина електричного струму дорівнює

$$J = I / S, \quad (17)$$

де S – площа поперечного перерізу провідника.

Сила струму, що йде на ділянці провідника,

$$I = U / R, \quad (18)$$

де U – напруга на ділянці; R – опір ділянки.

Опір провідника

$$R = \rho \cdot l / S, \quad (19)$$

де ρ – питомий опір; l – довжина; S – площа поперечного перерізу провідника.

Залежність від температури питомого опору провідника визначається співвідношенням

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (20)$$

де ρ_0 – питомий опір при 0°C ; α – температурний коефіцієнт опору.

Для розгалужених електричних тіл мають місце два закони Кірхгофа.

Перший закон: "Алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю".

$$\Sigma I_i = I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0. \quad (21)$$

Другий закон: "В довільному замкнутому контурі алгебраїчна сума падінь напруги на окремих ділянках кола дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в цьому контурі"

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + \dots = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots \quad (22)$$

Густина струму насичення J_n при термоелектронній емісії визначається за формулою Річардсона-Дешмана

$$J_n = VT^2 \exp(-A/kT), \quad (23)$$

де T – температура катоду, A – робота виходу, k – стала Больцмана, V – емісійна стала даного металу.

При невисоких густинах струму J в газі має місце закон Ома

$$J = q \cdot n \cdot (u_+ + u_-) \cdot E = \sigma \cdot E, \quad (24)$$

де E – напруженість поля; σ – питома провідність (величина, обернена до питомого опору); q – заряд іону; u_+ , u_- – рухливості позитивних та негативних іонів.

Контактна різниця потенціалів металу 2 порівняно з металом 1 виражається співвідношенням

$$\frac{kT}{e} \ln \frac{n_2 A_2}{n_1 A_1} = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (25)$$

де φ_2 – потенціал металу 2, φ_1 – потенціал металу 1, k – стала Больцмана, e – елементарний заряд, n_1 і n_2 – концентрації електронів в металах 1 та 2 відповідно, A_1 і A_2 – роботи виходу електронів з відповідних металів, T – температура контакту в кельвінах.

* * *

301. Відстань між зарядами 10^{-7} Кл і $5 \cdot 10^{-8}$ Кл дорівнює 0,1 м. Визначити силу, що діє на заряд 10^{-6} Кл, який віддалений на 12 см від першого заряду і на 10 см від другого.

302. Дві кульки масою по 0,1 г кожна підчеплені на нитках, верхні кінці яких з'єднані разом. Довжина кожної нитки 0,1 м. Які однакові заряди необхідно надати кулькам, щоб нитки розійшлися на кут 1 рад?

303. Дві однакові заряджені кульки підчеплені в одній точці на нитках однакової довжини. При цьому нитки розійшлися на деякий кут. Кульки занурюються в олію густиною 800 кг/м^3 . Яка діелектрична проникність олії, якщо кут розходження ниток після занурення кульок залишається сталим? Густина матеріалу кульок 1600 кг/м^3 .

304. Чотири однакові заряди по 10 нКл кожний закріплені у вершинах квадрату зі стороною 0,2 м. Знайти силу, що діє на один з цих зарядів з боку останніх.

305. Відстань між двома точковими зарядами $8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ і $5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ дорівнює 0,2 м. Обчислити напруженість поля в точці, що лежить посередині між зарядами.

306. Відстань між двома точковими зарядами $7 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ і $-1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ дорівнює 5 см. Знайти напруженість поля в точці, що знаходиться на відстані 3 см від позитивного і 4 см від негативного зарядів.

307. Мідну кулю, якій надали заряд $1,1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, помістили в олію густина якої 800 кг/м^3 . В однорідному електричному полі куля виявилася зваженою в олії. Визначити діаметр кулі, якщо електричне поле спрямоване вертикально вгору і його напруженість $3,6 \cdot 10^3 \text{ В/м}$.

308. На зарядженій безмежній вертикально розміщеній площині закріплено нитку, на якій звисає на деякому віддаленні від площини однойменно заряджена кулька вагою $4 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ і зарядом $6,67 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$. Натяг нитки, на якій висить кулька, дорівнює $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$. Знайти поверхневу густина зарядів на площині.

309. Відстань між точковими зарядами $2 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ і $-4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ дорівнює 0,6 м. Визначити точку, в яку має бути поміщений третій заряд, щоб система зарядів знаходилась у рівновазі. Чи стійка буде рівновага?

310. На зарядженій безмежній вертикально розміщеній площині закріплена нитка, на якій звисла на деякому віддаленні від площини однойменно заряджена кулька масою 1 г із зарядом 10 нКл. Який кут з площиною утворює нитка, на якій звисає кулька, якщо поверхнева густина зарядів на площині дорівнює $3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$?

311. Відстань між зарядами 10^{-9} Кл і -10^{-8} Кл дорівнює 0,55 м. Визначити напруженість поля в точці, потенціал якої дорівнює нулю.

312. Знайти напруженість поля на відстані 0,2 нм від одновалентного іона. Заряд іона вважати точковим.

313. З якою силою на одиницю площі відштовхуються дві однойменно заряджені безмежні площини з однаковою поверхневою густиною зарядів у $3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$?

314. Відстань між двома точковими зарядами 10^{-7} Кл і $-2,5 \cdot 10^{-8}$ Кл дорівнює 8 см. Визначити положення точки на прямій, яка проходить через заряди, напруженість поля в якій дорівнює нулю. Визначити потенціал в цій точці.

315. На яку відстань можуть зблизитись два електрони, якщо вони рухаються назустріч один одному з відносною швидкістю 10^6 м/с?

316. Електрон, пройшовши в плоскому конденсаторі від однієї пластини до другої, набуває швидкість 10^6 м/с. Відстань між пластинами 5,3 мм. Знайти:

- 1) різницю потенціалів між пластинами;
- 2) напруженість поля в середині конденсатора;
- 3) поверхневу густину зарядів на пластинах.

317. Вісім заряджених водяних крапель радіусом 1 мм і з зарядом 10^{-10} Кл кожна зливаються в одну велику водяну краплю. Знайти потенціал великої краплі.

318. Сто однакових крапель ртуті, заряджених до потенціалу 20 В, зливаються в одну велику краплю. Визначити потенціал утвореної краплі.

319. Приймаючи Землю за кулю радіусом $6 \cdot 10^6$ м, визначити заряд Землі, якщо напруженість поля біля поверхні Землі 100 В/м. Визначити потенціал Землі.

320. Відстань між нерухомим зарядом 10 нКл і вільним зарядом 10 нКл дорівнює 10 см. Яку роботу виконують сили поля при переміщенні вільного заряду на відстань 1 м від першого?

321. Різниця потенціалів між катодом і анодом електронної лампи дорівнює 90 В. Яку швидкість набуває електрон, підлітаючи до аноду? З яким прискоренням рухається електрон, якщо відстань між катодом і анодом дорівнює 1 мм?

322. При розбризуванні рідини утворюються краплі, які при цьому звичайно електризуються. Одна з таких крапель масою $4 \cdot 10^{-8}$ мг попадає в електричне поле між пластинами плоского конденсатора, розміщеними горизонтально на відстані 24 мм одна від одної. Визначити заряд краплі і число надлишкових електронів, якщо різниця потенціалів пластин дорівнює 1470 В. Крапля знаходиться у рівновазі.

323. Крапля вагою 10^{-8} Н знаходиться в електричному полі між пластинами конденсатора, розміщеними горизонтально. При терті об повітря крапля заряджається так, що її вага зрівноважується дією поля конденсатора, напруженість якого дорівнює 10^5 В/м. Знайти заряд краплі.

324. Між пластинами конденсатора, розміщеними горизонтально на відстані 50 мм одна від одної, знаходиться крапля води з присталими до неї 100 електронами. До якої різниці потенціалів мають зарядити конденсатор, щоб крапля з масою 10^{-12} кг знаходилась у зваженому стані?

325. Плоский конденсатор може бути застосований як чутливі мікротерези. В середині горизонтально розміщеного плоского конденсатора, відстань між пластинами якого дорівнює 4 мм, знаходиться частинка з зарядом $4,8 \cdot 10^{-19}$ Кл. Для того, щоб частинка знаходилась у рівновазі, між пластинами конденсатора створили різницю потенціалів 40 В. Знайти масу частинки.

326. Порошинка вагою $3 \cdot 10^{-9}$ Н знаходиться у зваженому стані між пластинами конденсатора, розміщеними горизонтально на відстані 5 мм одна від одної і зарядженими до напруги 600 В. Визначити заряд порошинки.

327. Різниця потенціалів між пластинами плоского конденсатора дорівнює 90 В. Площа пластини 60 см^2 і заряд 10 нКл. На якій відстані одна від одної знаходяться пластини?

328. Конденсатори ємністю 1 мкФ, 2 мкФ і 3 мкФ увімкнені в коло з напругою 1200 В. Визначити заряди і різницю потенціалів на обкладках конденсаторів у випадках послідовного і паралельного їх вмикання.

329. Яку роботу мають виконати, щоб збільшити відстань між пластинами плоского конденсатора від 3 см до 10 см. Площа пластин 100 см^2 . Напруга між пластинами стала і дорівнює 220 В.

330. Відокремлена металева куля діаметром 40 м заряджена до потенціалу 9 кВ. Визначити величину заряду і енергію зарядженої кулі.

331. Пластини плоского конденсатора площею $0,01 \text{ м}^2$ кожна притягуються одна до одної із силою 0,03 Н. Простір між пластинами заповнений слюдою. Знайти заряди на пластинах, напруженість поля між ними і енергію зарядженого конденсатора.

332. П'ять паралельно з'єднаних однакових конденсаторів ємністю по 0,1 мкФ кожен заряджуються до загальної різниці потенціалів 30 кВ. Визначити середню потужність розряду, якщо батарея розряджується за 1,5 мкс, а залишкова напруга дорівнює 500 В.

333. Два конденсатори ємностями 1,5 нФ і 1 нФ, з'єднані послідовно, заряджують до потенціалу 10 кВ і, не розряджуючи, з'єднують паралельно. Визначити енергію конденсаторів до і після перемикавання та роботу розряду.

334. Перший конденсатор ємністю 3 мкФ був заряджений до напруги 40 В. Після відмикання від джерела струму конденсатор був з'єднаний паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 5 мкФ. Яка енергія першого конденсатора витрачається на утворення іскри в момент приєднання?

335. Плоский повітряний конденсатор, відстань між пластинами якого 2 см, заряджений до напруги 3 кВ. Яка буде напруженість поля конденсатора, якщо, не відмикаючи джерела напруги, пластини розвести до відстані 5 см? Обчислити енергію конденсатора до і після розсування. Площа пластин 100 см^2 .

336. Плоский повітряний конденсатор з площею пластин $0,01 \text{ м}^2$ і відстанню між ними 1 мм заряджено до 100 В. Потім пластини розводять до відстані 25 мм. Знайти енергію конденсатора до і після розсування пластин, якщо джерело струму перед розсуванням:

- 1) не вимикають;
- 2) вимикають.

337. З якою силою на одиницю площі відштовхуються дві однойменно заряджені безмежні площини з однаковою поверхневою густиною зарядів, що дорівнює $2 \cdot 10^{-6}$ Кл/м²?

338. Плоский повітряний конденсатор ємністю $1,1 \cdot 10^{-10}$ Ф зарядили до напруги 300 В. Після відмикання від джерела напруги відстань між пластинами конденсатора було збільшено в 5 разів. Визначити напругу на конденсаторі після розсування пластин і виконану при цьому роботу.

339. Плоский конденсатор з площею пластин 300 см² кожна заряджено до напруги 1 кВ. Відстань між пластинами 4 см. Діелектрик – скло. Визначити енергію конденсатора і густину енергії поля.

340. Сила струму y у провіднику змінюється з часом за рівнянням $I = 4 + 2 \cdot t$. Яка кількість електрики проходить через поперечний переріз провідника за час від $t_1 = 2$ с до $t_2 = 6$ с? При якій силі постійного струму через поперечний переріз провідника за цей час проходить така ж кількість електрики?

341. Від колгоспної електростанції до електрофікованого току на відстань 5 км треба провести повітряну електролінію. Скільки за вагою потрібно мідного проводу, якщо опір лінії має бути не більшим 1,7 Ом?

342. Колгоспна електростанція живить струмом електродвигун, який приводить до дії водяний насос, розміщений на відстані 500 м і споживаючий струм 10 А. Скільки потрібно кілограмів сталевого проводу, щоб втрати напруги були 30 В?

343. Визначити заряд, який пройшов по провіднику із опором 3 Ом при рівномірному зростанні напруги на кінцях проводу від 2 В до 4 В протягом 20 с.

344. Напруга на клеммах батареї акумулятора дорівнює 12 В. Амперметр показує струм 5,1 А. В колі три паралельно з'єднані лампи з однаковими опором. Визначити опір кожної лампи.

345. Радіотрансляційна мережа має 100 репродукторів опором 4000 Ом кожний. Напруга в мережі 30 В. Визначити загальний опір всіх репродукторів, увімкнених паралельно, струм в кожному з них і загальний струм.

346. Для освітлення будівельного майданчика мають встановити ліхтар із номінальною напругою 120 В і опором 30 Ом. Який додатковий опір треба з'єднати послідовно з ліхтарем, щоб його можна було увімкнути в мережу 220 В?

347. Вольтметр має опір 6000 Ом і розрахований на вимірювання напруги 150 В. Який додатковий опір треба під'єднати послідовно до вольтметра, щоб ним можна було вимірювати напругу 250 В?

348. Мають призначений для вимірів напруги до 30 В вольтметр опором 2 кОм, шкала якого розділена на 150 поділок. Який опір треба взяти і як його увімкнути, щоб вольтметром можна було вимірювати напругу до 75 В? Як зміниться при цьому ціна поділки вольтметра?

349. Амперметр, виготовлений для вимірів сили струму до 0,1 А, має опір 0,2 Ом. Його треба використати для вимірів сили струму 1 А, 5 А, 10 А. Визначити опори шунтів до нього в кожному випадку.

350. Мають призначений для вимірювання струмів до 10 А амперметр опором 0,18 Ом, шкала якого розділена на 100 поділок. Який опір треба взяти і як його увімкнути, щоб цим амперметром можна було вимірювати силу струму до 100 А. Як зміниться при цьому ціна поділки приладу?

351. Скільки води можна скип'ятити, затративши 3 ГВт-год. електричної енергії? Початкова температура води 283 К. ККД нагрівача 0,7.

352. Приміщення втрачає за добу 10 МДж тепла. Для обігріву приміщення і підтримання сталої температури користуються електропідігрівом, увімкненою в мережу з напругою 120 В. Скільки метрів ніхромового дроту перерізом 10^{-6} м^2 треба витратити для виготовлення такої печі?

353. У мідному провіднику довжиною 2 м і площею поперечного перерізу $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ іде струм. При цьому щосекунди виділяється 0,35 Дж тепла. Скільки електронів проходить за 1с через поперечний переріз цього провідника?

354. Для нагрівання 4,5 л води від 300 К до кипіння нагрівник споживає 0,5 кВт-год електроенергії. Чому дорівнює ККД нагрівника?

355. Якої довжини треба взяти нікеліновий дріт перерізом $0,05 \text{ мм}^2$ для виготовлення кип'ятильника, яким за 15 хв. можна скип'ятити 1 л води, взятої при 10°C ? Напруга мережі 110 В, ККД нагрівача 60 %.

356. Скільки треба сплатити за використання електроенергії щомісяця, якщо щоденно по 6 год горять дві електричні лампи, що споживають при 120 В струм 0,5 А? Крім того, щоденно кип'ятиться 3 л води (початкова температура води 10°C). ККД нагрівача 80 %. Тариф – 20 коп. за 1кВт-год.

357. В майстерні встановлено 2 двигуни, які увімкнено до мережі паралельно під напругою 220 В. Сила струму у мережі 20 А. Визначити потужність, споживану кожним двигуном, і вартість електроенергії, витраченої за 6 год. роботи обома двигунами, при тарифі 20 коп. за 1 кВт-год.

358. Каменеподрібнювач повинен працювати під напругою 100 В, споживаючи струм 40 А. Напруга на електростанції 120 В, а відстань до неї 1 км. Визначити переріз мідного проводу, що з'єднує каменеподрібнювач з електростанцією.

359. Від джерела струму з ЕРС 500 В треба передати енергію на відстань 2,5 км. Споживана потужність 32 кВт. Знайти мінімальні втрати в мережі, якщо діаметр мідних провідників дорівнює 15 мм. Внутрішнім опором джерела струму знехтувати.

360. Вольтметр на колгоспній електростанції показує 260 В, а лампи на тваринницькій фермі мають незначний накал (напруга не перевищує 180 В). Як пояснити таку невідповідність? Вкажіть шляхи її усунення. Визначте найбільший опір підвідних провідників, якщо на фермі 10 електроламп потужністю 100 Вт кожна, розрахованих на напругу 220 В.

*361. Генератор живить 100 паралельно увімкнених ламп з опором 240 Ом кожна. Опір підвідних провідників 0,6 Ом. Внутрішній опір генератора 0,5 Ом. Знайти електрорушійну силу генератора і споживану лампами потужність, якщо напруга на затискачах генератора 120 В.

362. Для освітлення будинку необхідно 25 електроламп по 100 Вт і 50 ламп по 60 Вт. Лампи мають горіти під напругою 220 В. Якою має бути напруга на полюсах генератора, якщо він знаходиться на відстані 100 м від будинку? Проводи мідні, переріз – 3,0 мм².

363. Визначити силу струму в колі, що складається із двох елементів з ЕРС 1,6 В і 1,2 В і внутрішніми опорами 0,6 Ом і 0,4 Ом, з'єднаних однойменними полюсами.

364. Три джерела з ЕРС 1,8 В, 1,4 В і 1,0 В і внутрішніми опорами відповідно 0,6 Ом, 0,4 Ом і 0,8 Ом з'єднані однойменними полюсами. Визначити силу струму в елементах. Опором з'єднувальних проводів знехтувати.

365. Опір 4 Ом вимкнено до двох паралельно з'єднаних джерел струму з ЕРС 2,2 В і 1,4 В і внутрішніми опорами 0,6 Ом і 0,4 Ом. Визначити струм в опорі і напругу на затискачах другого елемента.

366. Батарея акумуляторів з'єднана паралельно з генератором постійного струму. ЕРС генератора 110 В, батареї 100 В, їх внутрішні опори по 0,5 Ом. В залежності від навантаження мережі акумулятори можуть розряджатися і допомогати генератору жити мережу або заряджатися. Визначити, який з цих випадків трапляється при опорі в мережі 100 Ом.

367. Дві батареї з ЕРС 5В і 3В і внутрішніми опорами 0,6 Ом і 0,3 Ом з'єднані однойменними полюсами і підімкнені до зовнішнього опору 1,7 Ом. Визначити струм в зовнішньому колі, першій та другій батареях.

368. Три джерела з ЕРС 1,2 В, 1,1 В і 1,3 В і внутрішніми опорами 0,1 Ом, 0,2 Ом та 0,3 Ом з'єднані однойменними полюсами і підімкнені до зовнішнього опору 3 Ом. Знайти струми, що йдуть в елементах і зовнішньому опорі.

369. Два елементи з ЕРС 5 В і 3 В і внутрішніми опорами 1 Ом і 5 Ом з'єднані однойменними полюсами і підімкнені до реостату опором 3 Ом. Визначити напругу на затискачах реостату.

370. Дві батареї з ЕРС 5 В і 7 В і внутрішніми опорами 0,8 Ом і 0,4 Ом з'єднані однаковими полюсами і живлять опір 1,5 Ом. Визначити струми у батареях і в зовнішньому опорі.

371. Визначити силу струму в колі, що складається з двох елементів з ЕРС 1,6 В і 1,2 В і внутрішніми опорами 0,6 Ом і 0,4 Ом, з'єднаних однойменними полюсами.

372. Два елементи з ЕРС 1,6 В і 1,2 В з'єднані однойменними полюсами. Визначити внутрішній опір першого елемента, якщо у другого він становить 0,4 Ом. Струм у колі 0,4 А.

373. Опір 4 Ом підімкнено до двох паралельно з'єднаних джерел струму з ЕРС 2,2 В і 1,4 В. Визначити внутрішні опори джерел струму. Зарядний струм через другий елемент дорівнює 2 А, а напруга на його затискачах дорівнює 1,6 В.

374. Три батареї з ЕРС 8 В, 3 В і 4 В і внутрішніми опорами по 2 Ом кожна з'єднані паралельно. Визначити струми, що йдуть через батареї.

375. Обмотка електрокаструлі, що містить 2 л води, складається із двох секцій опором 250 Ом кожна. Початкова температура води 288 К, напруга в мережі 120 В, ККД нагрівача 0,8. Визначити, через який час закипить вода, якщо:

- 1) відімкнена одна секція;
- 2) обидві секції відімкнені послідовно;
- 3) обидві секції відімкнені паралельно.

376. Яку потужність споживає нагрівач електричного чайника, якщо 1 л води закипає в ньому через 90 с? Який опір нагрівача, якщо напруга в мережі 220 В? Початкова температура води 13°C. Втратами тепла знехтувати.

377. Сільська електростанція при напрузі 220 В живить 100 ламп потужністю по 60 Вт і 4 двигуни, які споживають струм по 10 А кожний. Двигуни працюють в середньому по 10 год., а лампи горять по 12 год. на добу. Яку корисну потужність повинен мати генератор станції і яка витрата енергії за добу? Опором лінії знехтувати.

378. Батарейка кишенькового ліхтаря складається з трьох послідовно з'єднаних елементів з ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором по 1,7 Ом кожний. Опір лампочки 17,4 Ом. Визначити силу струму в лампочці і потужність електричної енергії, яку вона споживає.

379. Електромотор, увімкнений під напругу 380 В, тягне плуг і зорює 1 га за 0,8 год. Сила струму, споживана мотором, 115 А. Визначити потужність мотору і витрати енергії на 1 га.

380. Визначити потужність і силу струму, що споживає електромотор, який надає руху насосній установці для постачання води на тваринницьку ферму з добовою витратою 80 м³. Вода подається на висоту 20 м. ККД установки 0,8, напруга в мережі 220 В, мотор працює 6 годин на добу.

381. Невелика сільська електростанція використовує енергію води, щохвилино витрачаючи 240 м³. Висота напору при цьому 4 м. Скільки електроламп може жити така установка, якщо кожна лампа споживає струм силою 1 А при напрузі 220 В. ККД всієї гідроустановки 0,75.

382. Центрифуга для сортування насіння зернових культур потужністю 2,8 кВт увімкнена в мережу з напругою 140 В. Визначити силу струму, який проходить через обмотку двигуна центрифуги, якщо ККД дорівнює 0,98.

383. Якої сили струм тече по обмотці якоря мотору електровозу, який розвиває силу тяги 4 кН, якщо напруга на обмотці 500 В. Швидкість електровозу 36 км/год. ККД – 0,92.

384. Генератор дає енергію для 200 електроламп, ввімкнених паралельно і споживаючих струм по 0,5 А кожна при напрузі 110 В. Визначити щоденні витрати бензину у двигуні генератора, якщо він працює 6 годин на добу, а ККД установки 0,25.

385. У двигуні динамомашини витрати бензину за 1 год її роботи дорівнюють 1,82 кг. Визначити напругу, яка підводиться до споживача, і число ламп, які може живити машина, якщо опір кожної лампи дорівнює 240 Ом, сила струму в колі – 50 А. ККД установки 0,26. Опором підвідних проводів знехтувати.

386. Для влаштування електрогрілки, яка протягом 20 хв. нагрівала б 1,2 л води від 283 К до 373 К, на каркас намотаний ніхромовий дріт діаметром 0,2 мм. Знайти потрібну довжину дроту, якщо ККД грілки 0,6 і вона вмикається в мережу з напругою 120 В.

387. Робота виходу електронів у торованого вольфраму становить 2 еВ, у чистого вольфраму вона 4,5 еВ. У скільки разів катод із торованого вольфраму при його робочій температурі 1000 К дає більшу питому емісію, ніж катод із чистого вольфраму при тій же температурі? Емісійна стала для чистого і для торованого вольфраму дорівнює $60 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$.

388. Чому дорівнює відношення числа вільних електронів в одиниці об'єму для вісмуту і сурми, якщо при нагріванні одного із спаїв на 100 К виникає ЕРС 0,011 В? Який із металів має більше вільних електронів в одиниці об'єму, якщо струм через нагрітий спай іде від вісмуту до сурми?

389. Визначити температуру ґрунту, в який помістили термопару залізо-константан з питомою ЕРС 50 мкВ/К, якщо стрілка ввімкненого в коло термопару гальванометра із ціною поділки 1 мкА і опором 10 Ом відхиляється на 40 поділок. Другий спай термопару занурений у лід, що знаходиться при температурі 0°C. Опором термопару знехтувати.

390. Сила струму в колі, що складається із термопару опором 4 Ом і гальванометра опором 80 Ом, дорівнює $2,6 \cdot 10^{-5}$ А для різниці температур спаїв 50 К. Визначити питому ЕРС термопару (ЕРС при різниці температур в 1 К).

391. Термопара, опір якої 6 Ом, дозволяє визначати мінімальну зміну температури 0,006 К. Ціна поділки гальванометра, підімкнутого до термопару, – $1,5 \cdot 10^{-8}$ А. Знайти його опір. Стала термопару – 500 мкВ/К.

392. Один спай термопару залізо-константан з питомою ЕРС 50 мкВ/К поміщено у піч, другий – у танучий лід. Стрілка гальванометра, підімкнутого до термопару, відхилилась на 200 поділок. Визначити температуру в печі, якщо опір гальванометра разом з термопарою 1 кОм, а одна поділка його шкали становить 10^{-7} А.

393. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб іонізувати атом водню? Потенціал іонізації атома водню – 13,5 В.

394. У скільки разів зміниться питома термоелектронна емісія вольфраму, що знаходиться при температурі $T = 2400$ К, якщо її підвищити на 100 °С?

395. Робота виходу електронів у торованого вольфраму у двічі менша, ніж у вольфраму без покриття. У скільки разів катод із торованого вольфраму при температурі $T = 1800$ К дає більшу питому емісію, ніж катод із чистого вольфраму при тій же температурі? Емісійна стала для чистого і торованого вольфраму – 60 А/(см²·К²).

396. Визначити рухливість позитивних іонів азоту, якщо густина струму 50 пА/м², концентрація іонів 10^9 1/м³, напруженість поля 100 В/м. Рухливість негативних іонів азоту $1,9 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с).

397. До електродів трубки прикладена різниця потенціалів 5 В, відстань між ними $0,1$ м. Газ, що знаходиться в трубці, іонізований, причому число пар іонів 10^8 1/м³. Рухливості позитивних і негативних іонів відповідно дорівнюють $0,03$ м²/(В·с) і 300 м²/(В·с). Знайти густину струму в трубці і частину повного струму, що переноситься позитивними іонами.

398. Азот іонізується ренгенівськими променями. Визначити питому провідність азоту, якщо в умовах рівноваги в кожному кубометрі знаходиться 10^{13} пар іонів. Рухливість позитивних та негативних іонів в азоті $1,27 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) і $1,81 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с).

399. Площа кожного електроду іонізаційної камери дорівнює 100 см², відстань між ними – 62 мм. Знайти струм насичення в такій камері, якщо в одиниці об'єму щосекунди утворюється число однозарядних іонів кожного знаку, що дорівнює 10^8 1/(м³·с).

Електромагнетизм

Напруженість магнітного поля, створеного безмежно довгим прямолінійним струмом

$$H = I / 2 \cdot \pi \cdot a, \quad (1)$$

де I – сила постійного струму в провіднику; a – відстань від провідника до точки, де відшукують магнітне поле.

Напруженість магнітного поля в центрі колового струму

$$H = I / 2 \cdot R, \quad (2)$$

де R – радіус кругового контуру зі струмом I .

Напруженість магнітного поля в середині тороїду і безмежно довгого соленоїду

$$H = n \cdot I, \quad (3)$$

де n – число витків на одиниці довжини тороїду (соленоїду).

Зв'язок індукції з напруженістю магнітного поля

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (4)$$

де μ – відносна магнітна проникність середовища; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Об'ємна густина енергії магнітного поля

$$w = B \cdot H / 2. \quad (5)$$

Магнітний потік (потік магнітної індукції) через поверхню площею S

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

де α – кут між нормаллю до поверхні і напрямком магнітної індукції.

Магнітний потік через поперечний переріз соленоїду

$$\Phi = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot N \cdot S / l, \quad (7)$$

де l – довжина соленоїду, N – число витків у соленоїді.

Сила, що діє з боку магнітного поля B на елемент dl провідника зі струмом I ,

$$dF = B \cdot I \cdot dl \cdot \sin \alpha, \quad (8)$$

де α – кут між напрямками B і dl (те ж саме, що й струму I).

Магнітний момент контура зі струмом

$$p = I \cdot S, \quad (9)$$

де S – площа, охоплена контуром, по якому йде струм.

Обертаючий момент, що діє на контур зі струмом з боку магнітного поля

$$M = p \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (10)$$

де α – кут між напрямком поля і нормаллю до площини контура зі струмом.

Сила взаємодії двох безмежно довгих прямолінійних провідників зі струмами I_1 і I_2 , розміщених на відстані d один від одного,

$$F = \mu \cdot \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l / 2 \cdot \pi \cdot d, \quad (11)$$

де l – довжина ділянки взаємодіючих провідників.

Робота переміщення провідника зі струмом у магнітному полі

$$dA = I \cdot d\Phi, \quad (12)$$

де $d\Phi$ – магнітний потік, перетнутий провідником при переміщенні.

Сила, діюча на частку з зарядом q , що рухається зі швидкістю v в магнітному полі B ,

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (13)$$

де α – кут між напрямками v і B .

ЕРС (електрорушійна сила) індукції визначається за рівнянням

$$E_i = -d\Phi / dt. \quad (14)$$

ЕРС самоіндукції при сталій за часом індуктивності контура L

$$E_c = -L \cdot dI / dt, \quad (15)$$

де L – індуктивність контура, в якому змінюється струм.

Індуктивність соленоїду

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot l \cdot S, \quad (16)$$

де n – число витків на одиницю довжини, S – площа перерізу соленоїду, l – його довжина.

Магнітна енергія контура зі струмом

$$W = L \cdot I^2 / 2. \quad (17)$$

Період електромагнітних коливань в контурі, що містить індуктивність L , ємність C і опір R

$$T = 2 \cdot \pi / (1/L \cdot C - R^2/4 \cdot L^2)^{1/2}. \quad (18)$$

Період власних коливань у контурі Томсона

$$T = 2\pi (L \cdot C)^{1/2}. \quad (19)$$

Повний опір кола змінному струму (імпеданс)

$$Z^2 = R^2 + (\omega \cdot L - 1/\omega \cdot C)^2, \quad (20)$$

де R , L , C – опір, індуктивність і ємність, послідовно ввімкнені в коло змінного струму з циклічною частотою ω .

* * *

401. По двох паралельних прямолінійних провідниках течуть в одному напрямі струми 3 А і 5 А. Відстань між провідниками дорівнює 10 см. Знайти індукцію магнітного поля в точках, що знаходяться посередині між провідниками.

402. По двох прямолінійних паралельних провідниках течуть у одному напрямку струми 3 А і 5 А. Відстань між провідниками дорівнює 10 см. Знайти індукцію магнітного поля в точках, що лежать на відстані 4 см за другим провідником на продовженні лінії, що з'єднує провідники.

403. По двох прямолінійних паралельних провідниках течуть в одному напрямку струми 3 А і 5 А. Відстань між провідниками дорівнює 10 см. Знайти індукцію магнітного поля в точках, що лежать на відстані 5 см за першим провідником на продовженні лінії, що з'єднує провідники.

404. По двох прямолінійних паралельних провідниках течуть в протилежних напрямках струми 5 А і 8 А. Відстань між провідниками дорівнює 20 см. Знайти індукцію магнітного поля в точках, що знаходяться посередині між провідниками.

405. Розв'язати задачу № 404, якщо точки лежать на відстані 5 см від другого провідника і знаходяться на лінії, що з'єднує провідники.

406. По двох прямолінійних провідниках течуть в одному напрямку струми 20 А і 50 А. Визначити напруженість магнітного поля у точці, яка віддалена від першого провідника на 8 см і від другого – на 20 см. Відстань між провідниками 12 см.

407. Розв'язати задачу № 406 за умови, що струми течуть у протилежних напрямках.

408. До кінців дротяного кільця опором 3 Ом прикладена напруга 30 В. При цьому індукція магнітного поля у центрі кільця дорівнює $1,26 \cdot 10^{-5}$ Тл. Чому дорівнює радіус кільця?

409. З дроту довжиною 3,14 м і опором 2 Ом зроблено кільце. Чому дорівнює індукція магнітного поля в центрі кільця, якщо до його кінців прикладено напругу 1В?

410. У центрі кільця, зробленого з двох метрів дроту, індукція магнітного поля дорівнює $3,94 \cdot 10^{-7}$ Тл. Визначити силу струму у кільці.

411. На картонний циліндр впритул намотано ізольований дріт по 10 витків на кожний сантиметр довжини. Чому дорівнює напруженість і індукція магнітного поля на осі соленоїда при силі струму 2 А?

412. Соленоїд зроблено з дроту діаметром 0,2 мм і опором 100 Ом. Знайти індукцію магнітного поля на осі соленоїда, якщо напруга на кінцях обмотки 1 В.

413. З дроту діаметром 0,1 мм і опором 25 Ом намотано соленоїд на картонному циліндрі (витки впритул прилягають один до одного). Визначити індукцію магнітного поля на осі соленоїда, якщо напруга на кінцях обмотки дорівнює 2 В.

414. Між полюсами електромагніту створено однорідне магнітне поле з індукцією 0,1 Тл. По провіднику довжиною 70 см, розміщеному між полюсами перпендикулярно силовим лініям, тече струм силою 70 А. Знайти силу, що діє на провідник.

415. В однорідне магнітне поле з індукцією $1,26 \cdot 10^{-3}$ Тл поміщено прямолінійний провідник довжиною 20 см. Знайти силу, що діє на провідник, якщо по ньому тече струм 50 А, а кут між напрямком струму і вектором індукції 30° .

416. Прямолінійний провідник довжиною 10 см, по якому тече струм силою 0,5 А, поміщено в однорідне магнітне поле перпендикулярно силовим лініям. Знайти індукцію магнітного поля, якщо воно діє на провідник з силою $2,6 \cdot 10^{-3}$ Н.

417. По витку радіусом 10 см тече струм 50 А. Виток помістили в однорідне магнітне поле напруженістю 100 А/м. Визначити обертальний момент, що діє на виток, якщо площина витка становить кут 60° з лініями напруженості.

418. По двох прямолінійних провідниках, розташованих паралельно один до одного, течуть однакові струми. Відстань між провідниками 10 см. Знайти силу струму, якщо провідники взаємодіють із силою 0,02 Н на кожний метр довжини провідника.

419. Електрон, прискорений різницею потенціалів 300 В, рухається паралельно прямолінійному провіднику на відстані 4 мм від нього. Яка сила діятиме на електрон, якщо по провіднику пропустити струм 5 А?

420. Рамка зі струмом 5 А складається з 20 витків дроту. Визначити магнітний момент рамки зі струмом, якщо її площа 10 см^2 .

421. Дві паралельні мідні стрічки довжиною по 2 м знаходяться на відстані 20 см. Знайти силу взаємного відштовхування між ними у випадку короткого замикання, коли по ним тече струм силою 10^4 А.

422. По трьох паралельних прямих провідниках, що знаходяться на однаковій відстані 10 см один від одного, течуть однакові струми по 100 А. В двох провідниках напрямки струмів співпадають. Обчислити силу, що діє на одиницю довжини кожного провідника.

423. Напруженість магнітного поля у центрі колового струму становить 200 А/м. Магнітний момент витка – $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$. Обчислити силу струму.

424. Магнітний момент кругового витка 1 Дж/Тл. Знайти його радіус, якщо напруженість магнітного поля у центрі витка 200 А/м.

425. Два паралельних провідники, відстань між якими 20 см, взаємодіють з силою 0,03 Н. Визначити силу струму у другому провіднику, якщо сила струму у першому – 15 А, а довжина кожного провідника 6 м.

426. Горизонтальне магнітне поле з індукцією 48 Тл врівноважує у полі тяжіння провідник, по якому тече струм 23 А. Кут між напрямком струму і поля дорівнює 60° . Визначити довжину провідника, якщо його маса 0,0237 кг.

427. Електрон, який має швидкість 10^3 м/с, влітає в однорідне магнітне поле і, рухаючись перпендикулярно силовим лініям, описує дугу кола радіусом 1 см. Визначити індукцію магнітного поля.

428. Протон влітає в однорідне магнітне поле, індукція якого 0,2 Тл, перпендикулярно силовим лініям і описує дугу кола радіусом 5 см. Визначити лінійну швидкість протона.

429. Частинка рухається по колу радіусом 1 см в однорідному магнітному полі з індукцією $1,26\cdot 10^{-2}$ Тл. Знайти питомий заряд частинки, якщо її швидкість 10^6 м/с.

430. Електрон, прискорений різницею потенціалів 1000 В, влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярне напрямку його руху. Індукція магнітного поля дорівнює $1,19\cdot 10^{-3}$ Тл. Знайти радіус кривизни траєкторії електрона, період обертання його по колу і момент кількості руху електрона.

431. Знайти кінетичну енергію протона, що рухається по колу радіусом 60 см у магнітному полі, індукція якого дорівнює 1 Тл.

432. Електрон в однорідному полі рухається по гвинтовій лінії радіусом 5 см і кроком 20 см. Визначити швидкість електрона, якщо індукція магнітного поля 10^{-4} Тл.

433. Протон влітає в однорідне магнітне поле під кутом 30° до напрямку поля і рухається по спіралі, радіус якої дорівнює 1,5 см. Індукція магнітного поля дорівнює 0,1 Тл. Знайти кінетичну енергію протона.

434. Протон прискорюється електричним полем з сталою напруженістю. Через 0,01 с він влітає в магнітне поле, перпендикулярне електричному,

магнітна індукція якого становить 10^{-5} Тл. У скільки разів тангенціальне прискорення протона в цей момент менше за його нормальне прискорення?

435. Заряджена частинка, що пройшла прискорюючу різницю потенціалів 2 кВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 15,1 мТл по колу радіусом 1 см. Чому дорівнює відношення заряду частинки до її маси і яка її швидкість?

436. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл перпендикулярно лініям поля. Визначити силу, що діє на електрон з боку поля, якщо радіус кривизни траєкторії 0,5 см.

437. Електрон рухається в однорідному магнітному полі напруженістю 4 кА/м із швидкістю 10 Мм/с перпендикулярно лініям поля. Знайти силу, з якою магнітне поле діє на електрон, і радіус кола, по якому він рухається.

438. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі напруженістю 10^4 А/м. Обчислити період обертання електрона.

439. Визначити частоту обертання електрона по коловій орбіті у магнітному полі, індукція якого 0,2 Тл .

440. В однорідному магнітному полі, напруженість якого 10^5 А/м, розміщена квадратна рамка. Її площа складає з напрямком магнітного поля кут 45° . Сторона рамки 4 см. Визначити магнітний потік, що перетинає рамку.

441. Кільце радіусом 10 см знаходиться в однорідному магнітному полі напруженістю 10^3 А/м. Площина кільця утворює кут 30° з лініями поля. Знайти величину магнітного потоку через площину кільця.

442. По соленоїду, що має 100 витків діаметром 4 см, тече струм. Визначити магнітний потік і потокозчеплення соленоїда, якщо індукція поля в ньому дорівнює $1,26 \cdot 10^{-2}$ Тл.

443. Скільки ампер–витків треба для створення магнітного потоку в 42000 Мкс у соленоїді із залізним осердям довжиною 12 см і площею поперечного перерізу 3 см^2 ? ($1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$)

444. Знайти магнітну індукцію в замкненому залізному осерді тороїда довжиною 20,9 см, якщо число ампер–витків тороїда дорівнює 1500. Знайти магнітну проникність матеріалу осердя за цих умов.

445. Залізне осердя знаходиться в однорідному магнітному полі напруженістю 1000 А/м. Визначити, користуючись таблицею, індукцію магнітного поля в осерді і магнітну проникність його.

446. При силі струму 1 А, що проходить по обмотці соленоїда, енергія його магнітного поля 10^{-4} Дж. Визначити індуктивність соленоїда і кількість витків на один метр довжини. Довжина соленоїда 1 м, площа поперечного перерізу 2 см^2 .

447. Котушка із залізним осердям має площу поперечного перерізу 20 см^2 і кількість витків 500. Індуктивність котушки з осердям – 0,28 Гн при силі струму в ній 5 А. Знайти за цих умов магнітну проникність залізного осердя.

448. Соленоїд довжиною 1 м має 2000 витків. Обчислити потокозчеплення при силі струму в обмотці 10 А. Площа перерізу соленоїда – 16 см^2 .

449. Залізне осердя знаходиться в однорідному магнітному полі напруженістю 1 кА/м . Знайти індукцію магнітного поля в осерді і магнітну проникність заліза.

450. Замкнений соленоїд (тороїд) зі сталевим осердям має 10 витків на кожний сантиметр довжини. По соленоїду тече струм силою 2 А. Обчислити магнітний потік в осерді, якщо його переріз 4 см^2 .

451. Скільки треба ампер–витків для того, щоб отримати магнітний потік $0,3 \text{ мВб}$ у залізному осерді тороїда, якщо довжина середньої лінії осердя 120 см і площа перерізу його $2,5 \text{ см}^2$?

452. По провіднику, зігнутому у вигляді квадрату зі стороною 10 см , тече струм 20 А . Площина квадрату перпендикулярна магнітним силовим лініям поля. Визначити роботу, яку необхідно виконати для того, щоб винести провідник за межі поля. Поле, індукція якого $0,1 \text{ Тл}$, вважати однорідним.

453. Коловий контур поміщено у однорідне магнітне поле так, що площина його перпендикулярна до напрямку силових ліній поля. Напруженість магнітного поля – 2000 А/м . По контуру тече струм силою 2 А . Радіус контура – 2 см . Яку роботу треба виконати, щоб повернути контур на кут 90° навколо осі, що співпадає з його діаметром?

454. Провідник довжиною 1 м рухається зі швидкістю 5 м/с перпендикулярно лініям індукції однорідного магнітного поля. Визначити індукцію поля, якщо на кінцях провідника виникає при цьому різниця потенціалів $0,02 \text{ В}$.

455. Швидкість літака з реактивним двигуном дорівнює 950 км/год . Знайти ЕРС індукції, яка виникає на кінцях крил такого літака, якщо вертикальна складова напруженості земного магнітного поля дорівнює $0,5 \text{ Е}$ і відстань між кінцями крил літака – $12,5 \text{ м}$. ($1 \text{ Е} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \text{ А/м}$).

456. Рамка площею 50 см^2 , що складається із 100 витків дроту, рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією $0,04 \text{ Тл}$. Визначити максимальну ЕРС індукції, якщо вісь обертання лежить у площині рамки і перпендикулярна лініям індукції, а рамка здійснює 960 об/хв .

457. Кільце із дроту опором 10^{-3} Ом знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,4 \text{ Тл}$. Площина кільця становить кут 90° з лініями індукції. Визначити кількість електрики, що протече через кільце, якщо його винести за межі поля.

458. В однорідному магнітному полі, індукція якого $0,1 \text{ Тл}$, рівномірно обертається котушка, що складається зі 100 витків дроту. Вісь обертання перпендикулярна до осі котушки і до напрямку магнітного поля. Котушка має площу перерізу 100 см^2 і здійснює 5 об/с . Знайти максимальну ЕРС індукції в котушці.

459. Між полюсами електромагніту в магнітному полі з індукцією $0,6 \text{ Тл}$ обертається якір, який складається зі 100 витків площею 600 см^2 кожний. Визначити максимальну ЕРС індукції, якщо якір здійснює 10 об/с.

460. В однорідному магнітному полі з індукцією $0,8 \text{ Тл}$ рівномірно обертається рамка з кутовою швидкістю 15 рад/с . Площа рамки 150 см^2 . Вісь обертання знаходиться в площині рамки і становить кут 30° з напрямком силових ліній магнітного поля. Знайти максимальну ЕРС індукції у рамці.

461. Плоский контур, площа якого 300 см^2 , знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,01 \text{ Тл}$. Площина контура перпендикулярна лініям поля. У контурі тече постійний струм 10 А . Визначити роботу зовнішніх сил по вийманню контура із магнітного поля.

462. Знайти різницю потенціалів, що виникає між кінцями осі дизельного електротрактора, при русі його у транспортному режимі з швидкістю 15 км/год , якщо довжина осі 3 м і вертикальна складова напруженості магнітного поля Землі 40 А/м .

463. Індукція магнітного поля між полюсами двохполюсного генератора $0,8 \text{ Тл}$. Ротор має 100 витків площею 400 см^2 . Скільки обертів за хвилину здійснює якір, якщо максимальне значення ЕРС індукції 200 В ?

464. У котушці за $0,1 \text{ с}$ рівномірно зменшується струм з 25 А до 5 А . При цьому виникає ЕРС індукції, яка дорівнює 100 В . Визначити індуктивність котушки.

465. Визначити індуктивність первинної обмотки бобіни у пусковому двигуні трактора Т-75, якщо відомо, що струм зростає у колі до максимуму (5 А) за $0,02 \text{ с}$. Напруга акумуляторів 12 В . Активний опір котушки малий.

466. Чому дорівнює індуктивність соленоїда без осердя, якщо при зміні струму на $0,2 \text{ А}$ за секунду у ньому виникає ЕРС самоіндукції $0,01 \text{ В}$?

467. Котушка довжиною 20 см і діаметром 3 см має 400 витків. По ній тече струм силою 2 А . Знайти індуктивність котушки і магнітний потік, що перетинає площу її поперечного перерізу.

468. Визначити силу струму у колі через $0,01 \text{ с}$ після його розмикання. Опір кола 20 Ом та індуктивність $0,1 \text{ Гн}$. Сила струму до розмикання – 50 А .

469. Соленоїд містить 4000 витків дроту, по якому тече струм 20 А . Визначити магнітний потік і потокозчіплення, якщо індуктивність соленоїда дорівнює $0,4 \text{ Гн}$.

470. На картонний каркас довжиною 50 см і площею перерізу 4 см^2 намотано у один шар дріт діаметром $0,2 \text{ мм}$ так, що витки впритул прилягають один до одного. Визначити індуктивність отриманого соленоїда.

471. Обчислити коефіцієнт самоіндукції соленоїда довжиною 80 см і площею поперечного перерізу 20 см^2 , який містить 1000 витків.

472. Індуктивність соленоїда, який намотано одним шаром на немагнітний каркас, становить 1,6 мГн. Довжина соленоїда – 1 м, переріз – 20 см^2 . Скільки витків припадає на один сантиметр довжини соленоїда?

473. Скільки витків дроту діаметром 0,4 мм треба намотати на картонний циліндр діаметром 2 см, щоб отримати котушку із одним шаром витків індуктивністю 1 мГн? Витки впритул прилягають один до одного.

474. Соленоїд індуктивністю 4 мГн містить 600 витків. Чому дорівнює магнітний потік, якщо сила струму, що тече в соленоїді, – 12 А?

475. Соленоїд перерізом 5 см^2 містить 1200 витків. Індукція магнітного поля в соленоїді при силі струму 1 А дорівнює 0,01 Тл. Визначити індуктивність соленоїда.

476. Скільки ампер–витків знадобиться для того, щоб в середині соленоїда малого діаметра довжиною 30 см об'ємна густина енергії магнітного поля дорівнювала $6 \cdot 1,75 \text{ Дж/м}^3$?

477. По соленоїду тече струм 5 А. Соленоїд має довжину 1 м, кількість витків – 500, площу поперечного перерізу – 50 см^2 . Знайти енергію магнітного поля соленоїда.

478. Соленоїд довжиною 50 см і площею поперечного перерізу 2 см^2 має індуктивність 10^{-7} Гн. При якій силі струму об'ємна густина енергії магнітного поля в соленоїді дорівнює 10^{-3} Дж/м^3 ?

479. Через котушку, індуктивність якої дорівнює 0,021 Гн, тече змінний струм, що синусоїдально змінюється у часі із амплітудою 5 А і періодом 0,02 с. Знайти амплітудні значення ЕРС самоіндукції і енергії магнітного поля в соленоїді.

480. Обмотка тороїда містить 10 витків на кожний сантиметр довжини. Осердя немагнітне. При якій силі струму густина енергії магнітного поля становить 1 Дж/м^3 ?

481. Обмотка довгого соленоїда із залізним осердям має 10 витків на кожний сантиметр довжини. Знайти магнітну проникність заліза, якщо при силі струму в 1 А густина енергії поля дорівнює 250 Дж/м^3 .

482. Соленоїд з залізним осердям має 200 витків. При силі струму 2,5 А магнітний потік у залізі $6 \cdot 10^{-4}$ Вб. Знайти енергію магнітного поля у залізі.

483. При силі струму 1 А, який тече по обмотці соленоїда, енергія його магнітного поля 10^{-4} Дж. Визначити індуктивність соленоїда та кількість витків, що припадає на один метр довжини. Довжина соленоїда – 1 м, площа поперечного перерізу – 2 см^2 .

484. Соленоїд містить 10^3 витків. Сила струму в обмотці соленоїда – 1 А, магнітний потік – 0,01 Вб. Обчислити енергію магнітного поля.

485. На залізне кільце намотано в один шар 200 витків. Чому дорівнює енергія магнітного поля, якщо при силі струму 2,5 А магнітний потік в залізі становить 0,5 мВб?

486. При індукції магнітного поля 1 Тл густина енергії магнітного поля в залізі становить 200 Дж/м^3 . Яка магнітна проникність заліза за цих умов?

487. Знайти густину енергії магнітного поля у залізному осерді соленоїда, якщо напруженість поля дорівнює $1,6 \text{ кА/м}$.

488. Коливальний контур складається із конденсатора ємністю 800 пФ і котушки з індуктивністю $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$. На яку довжину хвилі налаштовано контур? Опором контура знехтувати.

489. На який діапазон хвиль можна налаштувати коливальний контур, якщо його індуктивність $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$, а ємність може змінюватись від 70 до 500 пФ ? Активним опором контура знехтувати.

490. Котушка, індуктивність якої $3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, приєднана до плоского конденсатора з площею пластин 100 см^2 . Відстань між ними $0,1 \text{ мм}$. Чому дорівнює діелектрична проникність середовища, що заповнює простір між пластинами, якщо контур резонує на хвилю довжиною 750 м ?

491. Визначити період коливань у контурі, що складається з котушки індуктивністю 1 мГн і плоского конденсатора з площею обкладинок по $0,5 \text{ м}^2$, розділених шаром слюди товщиною $0,1 \text{ мм}$.

492. Сила струму в провіднику змінюється з часом відповідно закону $I = I_0 \cdot \sin(2\omega t)$, де амплітуда $I_0 = 5 \text{ А}$; циклічна частота – $\omega = 10 \cdot \pi \text{ с}^{-1}$. Визначити кількість електрики, що пройде через поперечний переріз провідника за 2 с .

493. Коливальний контур має ємність $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ та індуктивність 5 мГн . Логарифмічний декремент затухання дорівнює $0,005$. За який час втрачається внаслідок затухання 99% енергії контура?

494. В коло змінного струму включені послідовно конденсатор ємністю 5 мкФ і котушка індуктивністю $0,2 \text{ Гн}$. Визначити частоту змінного струму, при якій настане електричний резонанс напруг.

495. При якій амплітуді напруги по обмотці дроселя, що має активний опір 4 Ом та індуктивність $0,1 \text{ Гн}$, піде змінний струм з амплітудою 2 А , якщо його частота 50 Гц ?

496. Обмотка дроселя має активний опір 35 Ом . При нарузі 141 В по ній тече змінний струм силою 3 А . Визначити індуктивність дроселя, якщо частота струму – 50 Гц .

497. Коливальний контур має індуктивність $0,01 \text{ мГн}$. Конденсатор має заряд $2,5 \text{ мкКл}$ при максимальній різниці потенціалів на обкладках 100 В . Знайти довжину хвилі, на яку резонує контур.

498. Індуктивність контура становить 9 мГн . Площа пластин конденсатора – 9 см^2 , відстань між ними – 2 см . Яким діелектриком треба заповнити простір між пластинами, щоб контур був налаштований на хвилю довжиною 750 м ?

499. На який діапазон хвиль розрахований коливальний контур, якщо його індуктивність $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$, а ємність може змінюватись від 62 до 480 одиниць СГСЕ? Активним опором контура знехтувати. ($1 \text{ Ф} = 0,9 \cdot 10^{12} \text{ СГСЕ}$).

Оптика. Фізика атома і ядра

При переході променя з одного середовища в друге справедливий закон заломлення світла

$$n = \sin \alpha / \sin \gamma = c_1 / c_2, \quad (1)$$

де n – показник заломлення другого середовища відносно першого; α – кут падіння; γ – кут заломлення; c_1 і c_2 – швидкості поширення світла в першому та другому середовищах.

Різниця ходу променів для максимуму і мінімуму інтерференції від-повідно становить

$$\Delta = k \cdot \lambda; \quad \Delta = (2k + 1) \cdot \lambda / 2; \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (2)$$

Відстань Δx між інтерференційними смугами на екрані для щілин Юнга дорівнює

$$\Delta x = \lambda \cdot l / d, \quad (3)$$

де λ – довжина світлової хвилі; l – відстань від екрана до щілин; d – від-стань між щілинами.

Різниця ходу Δ між променями, відбитими від нижньої та верхньої границі тонкої плівки, становить

$$\Delta = 2nd \cos \alpha, \quad (4)$$

де d – товщина плівки; n – показник заломлення плівки; α – кут падіння; λ – довжина хвилі світла.

Радіуси темних та світлих кілець Ньютона визначаються через радіус лінзи R та довжину світлової хвилі λ

$$r_k = \sqrt{k \lambda R} \quad \text{для темних кілець} \quad (5)$$

Інтенсивність поляризованого світла I після проходження через аналізатор зменшується відносно початкової інтенсивності I_0 згідно з законом Малюса

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

де φ – кут між головними площинами поляризатора і аналізатора.

Кут падіння α_B , що відповідає повній поляризації відбитого від діелектрика променя світла, зв'язаний з показником заломлення діелектрика n співвідношенням (закон Брюстера)

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n. \quad (7)$$

Кут повороту φ площини поляризації світлового променя оптично активними речовинами пропорційний шляху l , пройденому променем в речовині

$$\varphi = \alpha \cdot l, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт питомого обергання. Для розчинів оптично активних речовин в формулу додається значення концентрації розчину – c

$$\varphi = \alpha \cdot c \cdot l. \quad (9)$$

Формула головних максимумів інтенсивності дифракційної решітки задає кут φ_k , під яким спостерігається на екрані максимум k -го порядку для даної довжини хвилі λ (світло падає нормально до решітки)

$$b \cdot \sin \varphi_k = k \cdot \lambda; \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (10)$$

де b – стала дифракційної решітки.

Найменша відстань між точками Δx , при якій вони не зливаються при розгляді під мікроскопом, задається співвідношенням

$$\Delta x = \lambda / u, \quad (11)$$

де λ – довжина хвилі світла; n – показник заломлення середовища між предметом і об'єктивом; u – апертурний кут.

Дифракцію рентгенівського випромінювання на кристалічних тілах описує формула Вульфа-Брегга

$$2d \cdot \sin\theta = k \cdot \lambda; \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (12)$$

де d – стала кристалічної решітки; θ – кут ковзання; k – порядок максимуму; λ – довжина хвилі випромінювання.

Довжина тіла l в рухомій системі відліку зменшується порівняно з вихідною довжиною l_0 в нерухомій системі відліку по закону

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (13)$$

де v – швидкість рухомої системи відліку вздовж довжини тіла; c – швидкість світла у вакуумі.

Інтервал часу τ в системі, що рухається зі швидкістю v відносно спостерігача, зростає порівняно з часовим інтервалом τ_0 в системі, нерухомій для спостерігача, згідно з співвідношенням

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (14)$$

де c – швидкість світла у вакуумі.

Маса m і енергія E тіла, що рухається із швидкістю v , задається такими рівняннями:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad (15)$$

де m_0 – маса спокою; c – швидкість світла у вакуумі.

В умовах теплової рівноваги енергетична світимість тіла R та його поглинальна здатність A зв'язані співвідношенням (закон Кірхгофа)

$$R/A = R^*, \quad (16)$$

де R^* – енергетична світимість абсолютно чорного тіла.

Енергетична світимість абсолютно чорного тіла R^* виражається через його температуру за формулою

$$R^* = \sigma \cdot T^4, \quad (17)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана; T – абсолютна температура.

Довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної енергетичної світимості абсолютно чорного тіла $\lambda_{\text{тик}}$, зв'язана з його температурою співвідношенням

$$\lambda_{\text{тик}} = \frac{C}{T}, \quad (18)$$

де C – стала Віна; T – абсолютна температура.

Зв'язок між енергією фотона ($h \cdot \nu$), що викликає фотоефект, і кінетичною енергією фотоелектронів ($m \cdot v^2/2$) встановлюється за формулою Ейнштейна

$$h \cdot \nu = A + \frac{m v^2}{2}, \quad (19)$$

де A – робота виходу електрона з металу; h – стала Планка; ν – частота світлового випромінювання.

Формула, яка дозволяє знайти частоти ν або довжини хвиль λ , що відповідають лініям водневого спектра, має вид

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R \cdot c \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (20)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; R – стала Рідберга; n і m – номери орбіт.

Мікрочастинці масою m , яка рухається зі швидкістю v , відповідає хвильовий процес і з довжиною хвилі λ (принцип де-Бройля)

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (21)$$

де h – стала Планка.

Для радіоактивного розпаду кількість радіоактивних ядер N , яка залишилась від початкової кількості ядер N_0 , зв'язана з часом розпаду t законом

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (22)$$

де λ – стала розпаду. Стала радіоактивного розпаду може бути виражена через період піврозпаду T

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (23)$$

Активність радіоактивного препарату A визначається як

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N. \quad (24)$$

Дефект маси ядра Δm визначається за формулою

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}, \quad (25)$$

де Z – порядковий номер ізотопу; A – масове число; m_p – маса протона; m_n – маса нейтрона; $m_{\text{я}}$ – маса ядра.

Енергія зв'язку ядра визначається співвідношенням

$$E = \Delta m \cdot c^2, \quad (26)$$

де Δm – дефект маси ядра; c – швидкість світла у вакуумі.

Електропровідність σ напівпровідників має виражену залежність від температури

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (27)$$

де σ_0 – деяка стала, E – ширина забороненої зони, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

* * *

501. Різниця ходу інтерферуючих променів від двох когерентних джерел світла становить $1,65 \cdot 10^{-7}$ м. Джерела світла випромінюють хвилі довжиною $6,6 \cdot 10^{-7}$ м. Визначити, будуть хвилі підсилювати чи ослаблювати одна одну.

502. Різниця ходу інтерферуючих променів від двох когерентних джерел монохроматичного світла з довжиною хвилі $6,3 \cdot 10^{-7}$ м становить $12,6 \cdot 10^{-7}$ м. Визначити, підсилюють ці хвилі одна одну чи ослаблюють.

503. На мильну плівку з показником заломлення 1,3 нормально падає пучок променів білого світла. Яка найменша товщина плівки, якщо у відбитому світлі вона здається зеленою ($\lambda = 0,55$ мкм)?

504. На мильну плівку ($n = 1,33$) падає біле світло під кутом 45° . При якій найменшій товщині плівки відбите від неї світло буде зеленим ($\lambda = 550$ нм)?

505. В досліді Юнга отвори освітлювались монохроматичним світлом з довжиною хвилі $6 \cdot 10^{-5}$ см. Відстань між отворами 1 мм, а відстань від отворів до екрана – 3 м. Знайти положення трьох перших світлих смуг.

506. Діаметр другого світлого кільця Ньютона при спостереженні у відбитому світлі ($\lambda = 0,6$ мкм) дорівнює 1,2 мм. Визначити оптичну силу плоско-опуклої лінзи, взятої для дослідів.

507. Екран освітлюється двома когерентними джерелами світла, що знаходяться на відстані 1 мм один від одного. Відстань від площини джерел до екрана становить 3,5 м, довжина хвилі використаного світла – 400 нм.

Визначити положення першого та другого інтерференційних максимумів відносно центрального максимуму.

508. Пучок паралельних променів, що відповідають довжині хвилі $6 \cdot 10^{-7}$ м, падає на мильну плівку під кутом 45° . Показник заломлення мильної води становить 1,33. При якій найменшій товщині плівки відбите від неї світло максимально ослаблене?

509. Кожний інтерференційний максимум, створений на екрані двома когерентними джерелами білого світла, є багатокольоровим, з червоним ($\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ м) зовнішнім і фіолетовим ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м) внутрішнім краями. Яка ширина першого максимуму, якщо відстань між джерелами світла 4 мм, а від них до екрана – 4 м?

510. Різниця ходу двох когерентних променів становить $2,5 \cdot 10^{-6}$ м. Визначити довжини хвиль видимого світла (від 760 нм до 400 нм), які дадуть інтерференційні максимуми.

511. Скільки штрихів на кожний міліметр містить дифракційна ґратка, якщо при спостереженні в монохроматичному світлі ($\lambda = 0,6$ мкм) максимум п'ятого порядку відхилений на кут 18° ?

512. Знайти найбільший порядок спектра для жовтої лінії натрію ($\lambda = 589$ нм), якщо стала дифракційної ґратки дорівнює 2 мкм.

513. На дифракційну ґратку нормально падає пучок світла від розрядної трубки, що заповнена гелієм. На яку лінію в спектрі третього порядку накладається червона лінія гелія ($\lambda = 6,7 \cdot 10^{-5}$ см) спектра другого порядку?

514. Скільки штрихів на 1 мм довжини має дифракційна ґратка, якщо зелена лінія ртуті (546,1 нм) в спектрі першого порядку виникає під кутом $19^\circ 8'$?

515. На дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Чому повинна дорівнювати стала дифракційної ґратки, щоб у напрямі $\varphi = 41^\circ$ співпадали максимуми двох ліній – 656,2 нм і 410,2 нм?

516. На дифракційну ґратку нормально падає монохроматичне світло довжиною хвилі 600 нм. Ґратка має 200 штрихів на міліметр. Визначити число дифракційних максимумів, що виникнуть у даному випадку.

517. На дифракційну ґратку нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 0,59 мкм. Під якими кутами до осі коліматора будуть спостерігатись дифракційні максимуми першого і другого порядків, якщо ґратка має 500 штрихів на сантиметр?

518. На дифракційну ґратку нормально падає монохроматичний пучок світла ($\lambda = 0,59$ мкм), причому спектр третього порядку спостерігається під кутом $10^\circ 12'$. При якій довжині світлової хвилі дифракційний спектр першого порядку спостерігатиметься під кутом $2^\circ 48'$?

519. Знайти найменший розмір об'єктів, які можливо вивчати під мікроскопом, якщо препарат освітлюється червоним світлом з довжиною хвилі 760 нм. Апертурний кут об'єктиву – 160° . Між препаратом і об'єктивом знаходиться повітря.

520. При дослідженні зрізів рослинних волокон використовують біологічний мікроскоп (без імерсійної рідини). Препарат освітлюють моно-

хроматичним світлом з довжиною хвилі 500 нм. Яким повинен бути апертурний кут об'єктива, якщо діаметр волокон становить 10^{-5} м?

521. При переході променя світла зі скла у воду граничний кут повного внутрішнього відбивання виявився рівним 62° . Під яким кутом до поверхні скла має падати промінь, щоб відбитий промінь був повністю поляризованим?

522. Граничний кут повного внутрішнього відбивання для деякої рідини дорівнює 49° . Визначити кут повної поляризації відбитого променя.

523. Кут між головними площинами поляризатора і аналізатора дорівнює 45° . У скільки разів зменшиться інтенсивність світла після виходу з аналізатора, якщо кут збільшити до 60° .

524. Промінь, який падає на скло під кутом 58° , повністю поляризується. Визначити показник заломлення і кут заломлення променя у склі.

525. Визначити кут падіння променя на поверхню води з повітря і кут заломлення променя у воді, якщо відбитий промінь максимально поляризований.

526. Визначити товщину кварцевої пластинки, для якої кут повороту площини поляризації світла з довжиною хвилі $5,69 \cdot 10^{-7}$ м дорівнює 100° . Стала обертання для кварцу при даній довжині хвилі становить $29,7^\circ$ на міліметр довжини.

527. Обчислити концентрацію цукрового розчину, якщо при проходженні світла через трубку з розчином довжиною 15 см площина поляризації повертається на кут 20° . Коефіцієнт питомого обертання для цукрового розчину $66,5$ градусів на дециметр при концентрації розчину 1 г/см^3 .

528. Нікотин (чиста рідина), що знаходиться в скляній трубці довжиною 8 см, обертає площину поляризації жовтого світла натрію на кут $136,6^\circ$. Густина нікотину – $1,01 \text{ г/см}^3$. Визначити коефіцієнт питомого обертання нікотину.

529. Промінь світла, що проходить крізь скляну посудину з водою, відбивається від поверхні скла. При якому куті падіння відбите світло максимально поляризоване? Показники заломлення води і скла $1,33$ та $1,5$.

530. Розчин глюкози концентрацією $0,28 \text{ г/см}^3$, налитий у скляну трубку довжиною 15 см, повертає площину поляризації монохроматичного світла, що проходить через цей розчин, на кут 32° . Визначити коефіцієнт питомого обертання глюкози.

531. Яку швидкість повинно мати рухоме тіло, щоб його поздовжні розміри зменшились в 2 рази?

532. При якій швидкості маса електрона, що рухається, вдвічі більша від його маси спокою?

533. Визначити кінетичну енергію електрона, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює половині швидкості світла.

534. Визначити швидкість електрона, який має кінетичну енергію $1,53 \text{ MeV}$.

535. На скільки збільшиться маса α -частинки при прискоренні її від початкової швидкості, що дорівнює нулю, до швидкості, яка становить 0,9 швидкості світла?

536. Сонце випромінює щохвилини енергію, яка становить $6,5 \cdot 10^{21}$ кВт·год. Вважаючи випромінювання Сонця незмінним, знайти, за який час маса Сонця зменшиться у 2 рази.

537. У скільки разів збільшується тривалість життя (за годинником нерухомого спостерігача) нестабільної частинки, якщо вона починає рухатись зі швидкістю, яка становить 99% швидкості світла?

538. Визначте енергію, яка відповідає масі нерухомого електрона (власну енергію електрона).

539. Яку частку швидкості світла має складати швидкість частинки, щоб її кінетична енергія стала дорівнювати її енергії спокою?

540. При поділі ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$ вивільнюється енергія, що становить наближено 200 МеВ. Знайти зміну маси при поділі одного кіломоля урану.

541. Визначте температуру поверхні Сонця, вважаючи його за абсолютно чорне тіло, якщо довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання, становить 0,5 мкм.

542. Визначити енергетичну світимість Сонця, приймаючи його за абсолютно чорне тіло з температурою поверхні 6000 К.

543. Радіатор автомобіля нагрівається від 27 °С до 87 °С. У скільки разів збільшилась енергетична світимість радіатора? Прийняти радіатор за абсолютно чорне тіло.

544. Середня температура поверхні Землі становить +14 °С. Визначити довжину хвилі, на яку припадає максимум земного випромінювання, при умові, що Земля – абсолютно чорне тіло.

545. Яку енергію випромінює Сонце за 1 хв.? (Випромінювання Сонця вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла. Температура поверхні Сонця 5800 К).

546. На яку довжину хвилі припадає максимум випромінювання абсолютно чорного тіла, яке має температуру людського тіла – 37 °С?

547. В яких ділянках спектру знаходяться довжини хвиль, що відповідають максимуму енергетичної світимості, якщо джерелом світла служить спіраль електричної лампочки ($T = 3000$ К), поверхня Сонця ($T = 6000$ К) та атомна бомба, в якій в момент вибуху розвивається температура біля 10^7 К. Випромінювання вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла.

548. Поглинальні здатності ділянок луку і зраного поля дорівнюють відповідно 0,6 і 0,8. Яка ділянка має більшу енергетичну світимість і у скільки разів? Температури ділянок однакові.

549. Для підвищення температури верхнього шару ґрунту застосували мульчування вугільним порошком, в результаті чого встановилась температура, яка дорівнює 27 °С. Визначити енергетичну світимість вугільної мульчі, якщо її поглинальна здатність при даній температурі становить 0,88.

550. В результаті мульчування змолотою крейдою поверхня ґрунту досягла температури 17 °С. Визначити поглинальну здатність мульчі, якщо її енергетична світимість при даній температурі – 64 Вт/м².

551. На ядра тваринних та рослинних клітин можна діяти ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі біля 254 нм, бо воно не поглинається цитоплазмою клітини. Визначити частоту і енергію фотонів цього випромінювання.

552. На тваринницькій фермі для дезинфекції повітря в приміщенні молодняка провели ультрафіолетове опромінення за допомогою ртутно-кварцевої лампи. Інтенсивність опромінення становила 6 Вт/м², довжина хвилі – 254 нм. Підрахувати число фотонів, що пронизують одиницю площі поверхні, перпендикулярної до швидкості фотонів, за 1 с.

553. Кванти світла з енергією 4,9 еВ утворюють фотоелектрони з металу, робота виходу для якого – 4,5 еВ. Знайти максимальну швидкість фотоелектронів.

554. Визначити роботу виходу електронів з металу, якщо при освітленні його поверхні променями з довжиною хвилі 400 нм утворюються вільні електрони зі швидкістю $6,5 \cdot 10^5$ м/с.

555. Червона границя фотоефекту для вольфраму становить 275 нм. Знайти роботу виходу електронів.

556. На поверхню величиною 100 см² щохвилини падає 63 Дж світлової енергії. Знайти величину світлового тиску для випадків, коли поверхня повністю відбиває і повністю поглинає всі промені, що падають на неї.

557. Людське око найбільш чутливе до зеленого світла ($\lambda = 550$ нм), границя чутливості ока для якого відповідає 80 фотонам, що падають на сітківку за 1 с. Якій потужності світла відповідає цей поріг?

558. У деякого металу фотоефект починається при частоті світла, що використовується для опромінення, – $5,8 \cdot 10^{14}$ Гц. Визначити роботу виходу електронів з цього металу в електрон-вольтах.

559. Формула реакції фотосинтезу для одержання одного кіломоля цукру $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 2,83 \cdot 10^6$ Дж = $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. Яка кількість фотонів фіолетового випромінювання ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м) необхідна для одержання однієї молекули цукру?

560. Червона границя фотоефекту для деякого металу становить 275 нм. Знайти максимальну швидкість електронів, які виходять з металу під дією світла з довжиною хвилі 180 нм.

561. Знайти довжину хвилі де-Бройля для електронів, що пройшли різницю потенціалів 100 В.

562. Знайти довжину хвилі де-Бройля для електрона, який рухається зі швидкістю 10^6 м/с.

563. Визначити довжину хвилі де-Бройля для протона, що летить зі швидкістю 500 м/с.

564. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів 200 В, набуває довжини хвилі де-Бройля 2,02 пікометра. Знайти масу частинки, якщо її заряд співпадає з зарядом електрона.

565. Визначити швидкість руху електрона, довжина хвилі де-Бройля якого становить $1,5 \cdot 10^{-10}$ м.

566. При відбиванні від алюмінієвої пластинки електронного променя дифракційний максимум другого порядку відповідає куту ковзання $84^{\circ}48'$. Визначити швидкість електронів в промені, якщо відстань між атомними площинами кристалічної решітки алюмінію 0,4 нм.

567. Рентгенівські промені з довжиною хвилі $1,63 \text{ \AA}$ падають на кристал кам'яної солі. Знайти сталу кристалічної решітки солі, якщо дифракційний максимум першого порядку спостерігається при куті ковзання 17° .

568. Електрони, що падають на алюмінієву фольгу, створюють дифракційну картину з кутовим відхиленням максимуму першого порядку 1° . Стала кристалічної решітки алюмінію – $4,05 \cdot 10^{-10}$ мм. Яка швидкість електронів?

569. Паралельний пучок рентгенівських променів падає на грань кристалу кам'яної солі. Визначити довжину хвилі променів, якщо дифракційний максимум другого порядку спостерігається при куті ковзання 30° . Відстань між атомними площинами кристалу дорівнює 0,3 нм.

570. При якому найменшому куті між площиною кристалу і пучком рентгенівських променів спостерігається дифракційний максимум першого порядку, якщо довжина хвилі рентгенівських променів дорівнює $2 \cdot 10^{-11}$ м, а стала кристалічної решітки – $3,03 \cdot 10^{-10}$ м?

571. Знайти довжину хвилі фотона, яка відповідає переходу електрона з другої борівської орбіти на першу в позитивно іонізованому атомі гелію.

572. Знайти найменшу і найбільшу довжини хвилі спектра атома водню в оптичному діапазоні випромінювання.

573. Знайти відношення довжин хвиль других за порядком спектральних ліній серій Бальмера і Пашена.

574. Визначити максимальну енергію фотона, що випромінюється атомом водню в серії Лаймана.

575. Електрон атома водню переходить з четвертого енергетичного рівня на другий. Знайти довжину хвилі випромінювання.

576. Обчислити частоту і енергію, що відповідають короткохвильовій межі серії Бальмера.

577. Визначити масу та імпульс фотону, які відповідають переходу електрона в атомі водню з третьої орбіти на другу.

578. Яку енергію одержав незбуджений атом водню, якщо електрон його оболонки перейшов з першого енергетичного рівня на третій?

579. В яких межах мають знаходитись довжини хвиль монохроматичного світла, щоб при збудженні атомів водню квантами цього світла радіус орбіти електрона збільшився в 9 разів?

580. В яких межах мають знаходитись довжини хвиль монохроматичного світла, щоб при збудженні атомів водню квантами цього світла спостерігались три спектральні лінії?

581. Обчислити дефект маси та енергію зв'язку ядра дейтерію.

582. Обчислити дефект маси та енергію зв'язку ядра ізотопу кисню ${}^8\text{O}^{16}$.

583. Знайти енергію ядерної реакції ${}^3\text{Li}^6 + {}^1_0\text{n}^1 \rightarrow {}^2\text{He}^4 + {}^1_1\text{H}^3$. Виділяється чи поглинається ця енергія?

584. Реакція поділу ядра урану ${}^{92}\text{U}^{235}$ проходить з виділенням енергії 200 МеВ на кожний акт поділу. Обчислити енергію, яка виділяється при розщепленні 1 кг урану-235.

585. Знайти енергію, що виділяється при ядерній реакції ${}^1_1\text{H}^2 + {}^1_1\text{H}^2 \rightarrow {}^2_2\text{He}^3 + {}^1_0\text{n}^1$.

586. Для пригнічення весняного проростання харчової картоплі та інших овочів застосовується радіоактивний Co^{60} . В овочесховища закладено таку кількість Co^{60} , яка має початкову активність $3,7 \cdot 10^{11}$ Бк. Визначте активність кобальту через 2 роки.

587. При вивченні швидкості руху поживних речовин в рослинах як індикатор було застосовано радіоактивний фосфор P^{32} . Лист рослини з площею 12 см^2 дає в лічильнику Гейгера-Мюллера 36 імпульсів за секунду при безпосередньому контакті його з приладом. Вважаючи, що лічильником реєструється лише 50% випромінювання, визначте кількість P^{32} в листі. Площа віконця лічильника 3 см^2 .

588. В агробіологічних дослідженнях методом мічених атомів використовують радіоактивний ізоотоп фосфору P^{32} . При розпаді цього ізотопу з ядра викидаються електрон і нейтрино. Написати ядерну реакцію розпаду фосфору та визначити число атомів, що розпадаються протягом 1 с і 10 діб. Початкова кількість атомів ізотопу $1,9 \cdot 10^{19}$.

589. Визначити сталу розпаду і активність 1 мг ізотопу фосфору ${}^{32}\text{P}$.

590. Обчислити дефект маси (а. о. м.) і енергію зв'язку (МеВ) ядра ізотопу ${}^6\text{C}^{12}$.

591. Германієвий напівпровідник з власною провідністю має при деякій температурі питомий опір $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Визначити концентрацію носіїв заряду, якщо рухливість електронів $0,38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ і рухливість дірок $-0,18 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

592. Питома провідність кремнію з домішками становить $10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Визначити рухливість дірок. Вважати, що напівпровідник має тільки діркову провідність. Концентрація дірок дорівнює $1,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

593. Рухливість електронів в германію n-типу становить $3,7 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Визначити концентрацію електронів, якщо питомий опір напівпровідника $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

594. Концентрація носіїв струму в кремнію дорівнює $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, рухливість електронів і дірок відповідно $-0,15 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ і $0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Визначити опір кремнієвого стрижня довжиною 2 см і перерізом 1 мм^2 .

595. Рухливості електронів і дірок у кремнію відповідно дорівнюють $1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ і $5 \cdot 10^2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Обчислити концентрацію носіїв заряду, якщо питомий опір кремнію $6,2 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

596. Алюміній має гранецентровану кубічну решітку. Період решітки становить $0,404 \text{ нм}$. Визначити густину алюмінію.

597. Визначити ширину забороненої зони фоторезистора, чутливого до випромінювання з довжиною хвилі $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

598. Визначити питомий опір кремнію, рухливості електронів і дірок якого відповідно становлять $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ та $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Концентрація носіїв заряду у кремнію – $1,6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

599. Знайти ширину забороненої зони напівпровідника, якщо відомо, що при температурах $T_1 = 300 \text{ К}$ і $T_2 = 350 \text{ К}$ його опір відповідно становить $R_1 = 700 \text{ Ом}$ та $R_2 = 100 \text{ Ом}$.

1. Основні фізичні сталі (округлені значення)

<i>Фізична стала</i>	<i>Позначення</i>	<i>Числове значення</i>
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	γ	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Елементарний заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,67493 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою протона	m_p	$1,67262 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою електрона	m_e	$9,12 \cdot 10^{-31}$ кг
Стала Рідберга	R_∞	$1,10 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
Стала Віна	b	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Стала Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Універсальна газова стала	R	8,31 Дж/(моль·К)
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Число Лошмідта	n_0	$2,69 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
Нормальний атмосферний тиск	p_0	101325 Па
Густина повітря при н. у.	D_0	1,29 кг/м ³
Число Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с ²

2. Деякі астрономічні величини

<i>Найменування параметра</i>	<i>Середнє значення</i>
Радіус Землі	$6,37 \cdot 10^6$ м
Маса Землі	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радіус Сонця	$6,96 \cdot 10^8$ м
Маса Сонця	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Радіус Місяця	$1,74 \cdot 10^6$ м
Маса Місяця	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Відстань від Землі до Сонця	$1,50 \cdot 10^{11}$ м
Відстань від Землі до Місяця	$3,84 \cdot 10^8$ м

3. Густина твердих тіл

<i>Тверде тіло</i>	<i>Густина, кг/м³</i>	<i>Тверде тіло</i>	<i>Густина, кг/м³</i>
Алюміній	$2,70 \cdot 10^3$	Сталь	$7,75 \cdot 10^3$
Мідь	$8,96 \cdot 10^3$	Уран	$19,0 \cdot 10^3$

4. Густина рідин

<i>Рідина</i>	<i>Густина, кг/м³</i>	<i>Рідина</i>	<i>Густина, кг/м³</i>
Вода (при 4°C)	$1,00 \cdot 10^3$	Кров	$1,05 \cdot 10^3$
Олія	$0,90 \cdot 10^3$	Плазма крові	$1,03 \cdot 10^3$
Гліцерин	$1,26 \cdot 10^3$	Бензол	$0,88 \cdot 10^3$
Спирт	$0,79 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$

5. Питома теплоємність деяких матеріалів

<i>Речовина</i>	<i>Питома теплоємність, Дж/(кг·К)</i>	<i>Сплав</i>	<i>Питома теплоємність, Дж/(кг·К)</i>
Вода	$4,19 \cdot 10^3$	Сталь	$0,48 \cdot 10^3$
Спирт	$2,51 \cdot 10^3$	Чавун	$0,54 \cdot 10^3$

6. В'язкість рідин та газів

<i>Рідина</i>	<i>В'язкість, Па·с</i>	<i>Газ</i>	<i>В'язкість, Па·с</i>
Вода	$1,004 \cdot 10^{-3}$	Повітря	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Кров	$4,5 \cdot 10^{-3}$	Кисень	$2,02 \cdot 10^{-5}$
Молоко	$1,79 \cdot 10^{-3}$	Азот	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Гліцерин	1,5	Водень	$0,88 \cdot 10^{-5}$

7. Коефіцієнт поверхневого натягу рідин

<i>Рідина</i>	<i>Коефіцієнт, мН/м</i>	<i>Рідина</i>	<i>Коефіцієнт, мН/м</i>
Вода	73	Бензол	30
Мильна вода	40	Гас	30
Спирт	22	Ртуть	510

8. Ефективний діаметр молекул

<i>Газ</i>	<i>Діаметр, Å</i>	<i>Газ</i>	<i>Діаметр, Å</i>
Азот	3,1	Кисень	2,9
Гелій	2,0	Водень	2,3
Вуглекислий газ	3,2	Водяна пара	2,8

9. Критичні значення температури T_K та тиску P_K

<i>Речовина</i>	T_K, K	$P_K, МПа$	<i>Речовина</i>	T_K, K	$P_K, МПа$
Вода	647	22,0	Кисень	154	5,07
CO ₂	304	7,38	Азот	126	3,40

10. Питома теплота згоряння палива ζ

<i>Паливо</i>	ζ , МДж/кг	<i>Паливо</i>	ζ , МДж/кг
Антрацит	29,2	Дизельне паливо	42,7
Бензин	44,0	Спирт	29,0
Гас	46,0	Ядерне паливо	$7,4 \cdot 10^7$

11. Відносна діелектрична проникність речовин ϵ

<i>Речовина</i>	<i>Проникність</i>	<i>Речовина</i>	<i>Проникність</i>
Парафін	2,0	Вода	81
Скло	8,0	Олія	2,2
Слюда	6,5	Гас	2,0

12. Питомий опір металів і сплавів

<i>Метал</i>	<i>Питомий опір, мкОм·м</i>	<i>Метал</i>	<i>Питомий опір, мкОм·м</i>
Мідь	0,017	Нікелін	0,42
Срібло	0,016	Ніхром	1,0
Сталь	0,12	Константан	0,50

13. Залежність індукції від напруженості магнітного поля для заліза

<i>Напруженість, кА/м</i>	<i>Індукція, Тл</i>	<i>Напруженість, кА/м</i>	<i>Індукція, Тл</i>
0,25	1,0	2,0	1,6
0,50	1,2	4,0	1,7
1,0	1,4	8,0	1,8

14. Показник заломлення світла

<i>Речовина</i>	<i>Показник</i>	<i>Речовина</i>	<i>Показник</i>
Алмаз	2,42	Повітря	1,00029
Вода	1,33	Скло	1,5-2,0
Лід	1,31	Спирт	1,36

15. Період піврозпаду радіоактивних ізотопів

<i>Ізотоп</i>	<i>Період піврозпаду</i>	<i>Ізотоп</i>	<i>Період піврозпаду</i>
Йод-131	8 діб	Стронцій-90	28 років
Кобальт-60	5,3 року	Уран-235	$7,1 \cdot 10^8$ років
Радій-226	$1,6 \cdot 10^3$ років	Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радон-222	3,8 доби	Фосфор-32	14,3 доби

16. Маса деяких нуклідів (в атомних одиницях маси)

<i>Нуклід</i>	<i>Маса, а. о. м.</i>	<i>Нуклід</i>	<i>Маса, а. о. м.</i>
Нейтрон	1,00867	Гелій-4	4,00260
Дейтерій	2,01410	Літій-6	6,01513
Тритій	3,01605	Вуглець-12	12,0000
Гелій-3	3,01603	Кисень-16	15,9949