



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Т. В. Лютий, О. С. Денисова



ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ з ФІЗИКИ



для напрямку підготовки 6.040106 -
екологія, охорона навколишнього
середовища та збалансованого
природокористування



ЧАСТИНА 2



Навчальний посібник



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Т. В. Лютий, О. С. Денисова

Лабораторний практикум із фізики

*Рекомендовано вченою радою
Сумського державного університету
як навчальний посібник*

Суми
Сумський державний університет
2012

ББК 52.818.1я7
УДК 53(076.5)
Л 96

Рецензенти:

д-р. фіз.-мат. наук, проф. І. Ю. Проценко
(Сумський державний університет);
канд. фіз.-мат. наук, доцент О. В. Лисенко
(Сумський державний університет)

*Рекомендовано до друку вченою радою
Сумського державного університету
(протокол № 7 від 09.02.2012)*

Л 96 **Лютий Т. В.**, Лабораторний практикум з фізики: навч.
посіб. / Т. В. Лютий, О. С. Денисова. – Суми: Сумський
державний університет, 2012. – 70 с.

Посібник містить опис лабораторних робіт з курсу загальної фізики для напряму підготовки 6.040106 – **екологія, охорона навколишнього середовища та збалансованого природокористування**, факультет технічних систем та енергоефективних технологій. Кожна робота супроводжується ґрунтовним викладенням теоретичного матеріалу, необхідного для вмотивованого виконання вимірювань та розрахунків. Детальні та проілюстровані пояснення процесу виконання робіт дозволяють підвищити ступінь самостійності студента на лабораторних заняттях, що значно підвищує ефективність бригадного методу виконання робіт.

ББК 52.818.1я7
УДК 53(076.5)

© Лютий Т. В., Денисова О. С., 2012
© Сумський державний університет, 2012

Графік виконання лабораторних робіт

II модульний цикл

Номер бригади	Тиждень 1	Тиждень 2	Тиждень 3	Тиждень 4	Тиждень 5	Заліковий тиждень
I	6	7	8	13	9	13
II	6	7	8	13	9	13
III	7	6	9	10	13	13
IV	7	6	9	10	13	13
V	8	6	7	13	10	13
VI	8	6	7	13	10	13
VII	6	8	9	10	13	13
VIII	6	8	9	10	13	13

13 – індивідуальний захист виконаних лабораторних робіт

ЗМІСТ

Лабораторна робота 6. ВИВЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ СИСТЕМИ У НЕОБОРОТНОМУ ПРОЦЕСІ	C. 6
1. МЕТА РОБОТИ	6
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	6
2.1. Термодинамічний зміст ентропії.....	6
2.2. Статистичний зміст ентропії.....	8
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	9
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	9
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	11
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	13
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	13
Лабораторна робота 7. ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ У РІДИНИ І ВПЛИВУ НА НЬОГО ПОВЕРХНЕВОАКТИВНИХ РЕЧОВИН	14
1. МЕТА РОБОТИ	14
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	14
2.1. Сутність поверхневого натягу.....	14
2.2. Сила поверхневого натягу.....	17
2.3. Явища змочування та незмочування.....	18
2.4. Капілярні явища	20
2.5. Поверхнево-активні речовини.....	21
2.6. Класифікація ПАР.....	23
2.7. Вплив ПАР на екологію	25
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	26
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	26
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	27
5.1. Визначення коефіцієнту поверхневого натягу.....	27
5.2. Визначення поверхневої активності ПАР.....	31
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	33
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	34
Лабораторна робота 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	35
1. МЕТА РОБОТИ	35
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	35
2.1. Постійний струм. Основні поняття.....	35
2.2. Суть методу компенсації.....	36
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	38
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	39

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	39
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	42
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	43
Лабораторна робота 9. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ.....	44
1. МЕТА РОБОТИ.....	44
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	44
2.1. Поняття магнітного поля.....	44
2.2. Магнітне поле Землі	45
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ.....	47
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	48
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	51
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	54
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	55
Лабораторна робота 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА	56
1. МЕТА РОБОТИ.....	56
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	56
2.1. Явище поляризації.....	56
2.2. Подвійне променезаломлення	57
2.3. Обертання площини поляризації.....	60
3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ	62
4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	62
5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	66
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	67
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	68

Лабораторна робота 6

ВИВЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ СИСТЕМИ У НЕОБОРОТНОМУ ПРОЦЕСІ

1. МЕТА РОБОТИ

1. Експериментально переконатися у справедливості другого закону термодинаміки.
2. Визначити зміну ентропії тіл під час теплообміну між тілами у замкнутій термодинамічній системі. Дослідити залежність зміни ентропії від теплоємності тіл.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Термодинамічний зміст ентропії

Термодинаміка – розділ фізики, що вивчає перетворення енергії. Термодинаміка ґрунтується на трьох законах (принципах), які є узагальненням великої кількості експериментальних фактів. Термодинаміка оперує виключно *макроскопічними параметрами* тіл, або *параметрами стану* (наприклад, температура, тиск, об'єм), та не відповідає на питання про конкретну будову систем та мікроскопічну природу цих параметрів. З точки зору термодинаміки будь-яка система є так званою “чорною скринькою”, що характеризується доступними для вимірювань величинами (макроскопічними параметрами), а вивчати систему – означає встановлювати, за якими законами змінюються макроскопічні параметри.

Параметри стану можуть бути аргументами певних функцій. Існують такі функції від параметрів стану, які однозначно характеризують стан системи. Тобто даному набору аргументів відповідає лише одне значення функції незалежно від того, у який спосіб система набула зазначеного стану. Такі функції називаються *функціями стану*. Прикладом функції стану є **внутрішня енергія** U – уся енергія системи за винятком кінетичної енергії руху системи як цілого та потенціальної енергії взаємодії системи як цілого з іншими системами. Нескінченно малий приріст внутрішньої енергії dU є **повним диференціалом**.

За **першим законом термодинаміки**

$$dU = \delta A' + \delta Q, \quad (1)$$

де $\delta A'$ – нескінченно малий приріст роботи, що виконується ззовні над вибраною системою; δQ – нескінченно малий приріст кількості теплоти, що передається системі. Різниця у позначеннях приростів « d » та « δ » свідчить про те, що лише внутрішня енергія системи є функцією стану, у той час коли робота і кількість теплоти – ні.

Оборотним називається процес, який можна змусити протікати у зворотному напрямку через ту саму сукупність станів, за умови, що у навколишньому середовищі не відбуваються зміни. У термодинаміці доведено, що оборотним процесом є **рівноважний** процес або процес, під час якого параметри стану релаксують до своїх рівноважних значень набагато швидше, ніж відбуваються їх зміни під дією зовнішніх чинників. Експериментально встановлено, що під час оборотного процесу відношення прирощення кількості теплоти до температури T , за якої воно відбувається, $\delta Q/T$ є повним диференціалом. З точки зору термодинаміки **ентропією** називається така функція S , повний диференціал якої визначається як

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

З означення (2) очевидно, що сама функція S визначена з точністю до константи. Але для ентропії, як і для внутрішньої енергії, як правило, значення має не абсолютна величина, а її зміна

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (3)$$

де межі інтегрування 1 та 2 умовно позначають різні стани системи. Якщо мають місце лише процеси теплопередачі, прирощення кількості теплоти можна подати у вигляді

$$\delta Q = cm \cdot dT, \quad (4)$$

де c – питома теплоємність речовини; m – маса тіла, що є частиною системи. Підкреслимо ще раз, що вирази (2) та (3) справедливі лише для оборотних процесів. У зворотному випадку

$dS \neq \delta Q/T$. Конкретизувати останню нерівність зручно за допомогою статистичного змісту ентропії.

2.2. Статистичний зміст ентропії

Статистична фізика, на відміну від термодинаміки, розкриває природу параметрів стану з точки зору внутрішньої будови систем. Тим самим вона забезпечує конкретне, мікроскопічне наповнення абстрактним поняттям термодинаміки. Наприклад, тиск є наслідком ударів молекул об стінку посудини, температура є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху молекул і т.д. При цьому за наявності взаємодії між елементами системи такий підхід стає необмежено складним з математичної точки зору і для подальшого вивчення системи доводиться залучати підходи термодинаміки.

Таким чином, термодинаміка та статистична фізика не є антитепами, а, навпаки, взаємодоповнюють одна одну. Особливо яскраво проявляється їх "симбіоз" у випадку ентропії. З точки зору термодинаміки маємо лише абстрактні формулювання (2) та (3), які до того ж обмежені класом оборотних процесів. Згідно з положеннями статистичної фізики ентропія є *мірою неупорядкованості* системи і визначається згідно з виразом

$$S = k_B \cdot \ln \Omega, \quad (5)$$

де $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; Ω – так звана статистична вага. **Статистичною вагою** називається кількість мікростанів, за допомогою яких можна реалізувати заданий макростан. Чим більшою є величина Ω , тим більш ймовірним є макростан, що йому відповідає. Природно, що самочинно система може переходити лише у більш ймовірні стани, а зворотні процеси при цьому практично неможливі (якщо не враховувати короточасні флуктуації). Тому оборотний процес можливий лише у невеликому околі максимального значення статистичної ваги системи $\Omega = \Omega_{\max}$. З урахуванням виразу (5) можна стверджувати, що ентропія системи під час оборотного процесу є максимальною. У той самий час, будь-який необоротний процес повинен відбуватися через послідовність станів, статистична вага яких менша від

максимальної ($\Omega < \Omega_{\max}$). Тому впродовж необоротного процесу ентропія замкнутої системи може лише збільшуватися. Останнє твердження складає зміст *другого закону термодинаміки*

$$\Delta S \geq 0. \quad (6)$$

Відповідно під час необоротного процесу ентропія має збільшуватися не лише за рахунок теплообміну, як у випадку оборотного процесу, а й за рахунок необоротності процесу. Тому вираз (3) у випадку, узагальненому на необоротні процеси, набуває вигляду

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (7)$$

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Калориметр.
2. Термометр.
3. Водомірна склянка.
4. Нагрівач.
5. Набір тіл з різних матеріалів.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Нехай маємо термоізований калориметр, в якому знаходиться вода масою m_e при температурі T_0 . Якщо у воду опустити тіло масою m_m при температурі T_m , то в системі буде певний час відбуватися нерівноважний (необоротний) процес теплообміну між тілом та водою. На початку процесу температури води та тіла будуть різними, а в кінці – однаковими та дорівнюватимуть T_p .

Оскільки процес необоротний, безпосереднє застосування виразу (3) для розрахунку ентропії є безпідставним. У той самий час ентропія є функцією стану, а, отже, величини ентропії складових системи повинні визначатися виключно температурою на початку процесу та кінцевою температурою (усі інші параметри стану, окрім температури, незмінні). Отже, приріст ентропії ΔS_1 води у калориметрі має бути однаковим як під час порівняно

швидкого (нерівноважного) нагрівання води за рахунок теплообміну з тілом масою m_m , так і під час повільного (рівноважного) нагрівання в іншому процесі. Тому величину ΔS_1 можна визначити як

$$\Delta S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_0}^{T_p} \frac{c_g m_g dT}{T} \Rightarrow$$

$$\Delta S_1 = c_g m_g \ln \frac{T_p}{T_0}. \quad (8)$$

З аналогічних міркувань можна одержати зміну ентропії ΔS_2 самого калориметра

$$\Delta S_2 = c_k m_k \ln \frac{T_p}{T_0}, \quad (9)$$

де c_k – теплоємність матеріалу калориметра; m_k – маса калориметра, а також зміну ентропії ΔS_3 тіла

$$\Delta S_3 = c_m m_m \ln \frac{T_p}{T_m}. \quad (10)$$

Ентропія є адитивною величиною, тому шукана зміна ентропії системи може бути знайдена як $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3$. Тоді з урахуванням рівностей (8)-(10) можна записати

$$\Delta S = (c_g m_g + c_k m_k) \ln \frac{T_p}{T_0} + c_m m_m \ln \frac{T_p}{T_m}. \quad (11)$$

За рівнянням теплового балансу у теплоізольованій системі сумарна кількість теплоти, що передається одним частинам системи, дорівнює сумарній кількості теплоти, що відбирається від інших

$$Q = (c_g m_g + c_k m_k)(T_p - T_0) = c_m m_m (T_m - T_p). \quad (12)$$

З урахуванням рівності (12) вираз (11) можна спростити

$$\Delta S = c_m m_m \left(\frac{T_m - T_p}{T_p - T_0} \ln \frac{T_p}{T_0} + \ln \frac{T_p}{T_m} \right). \quad (13)$$

Усі величини, наявні в останньому виразі, є або табличними, або доступні для експериментального визначення.

Зовнішній вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 1.

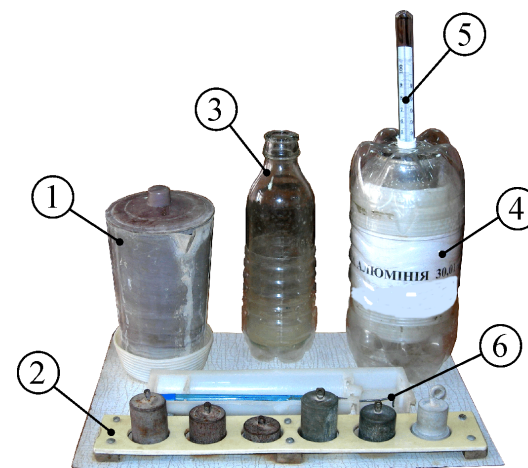


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – нагрівач; 2 – набір досліджуваних тіл; 3 – мірна склянка; 4 – калориметр; 5 – термометр; 6 – спиця для маніпуляцій з вантажами

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Опустіть у нагрівач 1 перше тіло із набору 2. Залейте його водою так, щоб тіло було повністю занурене, однак шар води зверху був невеликим.
3. Увімкніть нагрівач 1, та поки тіло нагрівається, наповніть водою водомірну склянку 3 до позначки 100 мл та вилийте її у стакан калориметра 4.

Увага! Будьте обережні під час роботи з нагрівачем та уникайте потрапляння гарячої води на відкриті ділянки шкіри.

4. За допомогою термометра 5 визначте початкову температуру T_0 води у калориметрі. Результат занесіть до таблиці 1.
5. Через 3-4 хвилини після закипання води вимкніть нагрівач та за допомогою спеціальної спиці з гачком 6 помістіть нагріте тіло у стакан калориметра та накрийте його. Температуру тіла при цьому вважати такою, що дорівнює $t_m = 98^\circ\text{C}$.
6. За термометром стежте, як зростає температура води у калориметрі, та запишіть у таблицю 1 її максимальне значення.
7. Вилити воду зі стакана калориметра до спеціальної ємності та охолодити калориметр впродовж хвилини.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№ тіла	1	2	3	4	5	6
c_m , Дж/(кг·К)						
m_m , кг						
$C = c_m \cdot m_m$, Дж/К						
T_0 , К						
T_p , К						
ΔS , Дж/К						
$T_m = 371$ К						

Середні питомі теплоємності матеріалів

залізо: $c = 500$ Дж/(кг·К), латунь: $c = 394$ Дж/(кг·К),
алюміній: $c = 920$ Дж/(кг·К), бронза: $c = 385$ Дж/(кг·К)

8. Повторіть дії, зазначені у попередніх пунктах, для ще п'яти тіл. Результати запишіть у таблицю 1.
9. Визначте теплоємність кожного тіла як $C = c_m \cdot m_m$. Результати запишіть у таблицю 1.
10. Згідно зі співвідношенням (13) визначте зміну ентропії у кожному вимірюванні. Заповніть відповідний рядок таблиці 1.
11. Побудувати графік залежності $\Delta S(C)$ за одержаними даними.
12. Зробити висновки щодо результатів лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що таке термодинаміка та що вона вивчає?
2. Що називають параметрами стану? Функціями стану?
3. Сформулювати перший та другий закони термодинаміки.
4. Який процес називається оборотним?
5. Послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Пояснити термодинамічний зміст ентропії.
7. Пояснити статистичний зміст ентропії.
8. Записати рівняння теплового балансу та пояснити його зміст.
9. Пояснити, чому процес охолодження металевого тіла у воді є необоротним.
10. Дати визначення статистичній вазі та пояснити її зміст.

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити різницю між статистичним та термодинамічним підходами до вивчення макросистем.
12. Пояснити, чому графік залежності $\Delta S(C)$ має зростати.
13. Одержати розрахункову формулу (13).
14. Які чинники зумовлюють похибку вимірювань у даній роботі?
15. Розкрити суть явища кипіння рідини та охарактеризувати його.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ І ВПЛИВУ НА НЬОГО ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися з явищем поверхневого натягу та його характерними проявами.
2. Експериментально визначити коефіцієнт поверхневого натягу чистої води.
3. Дослідити залежність коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації поверхнево-активних речовин. Експериментально визначити поверхневу активність.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Сутність поверхневого натягу

Сама назва «поверхневий натяг» свідчить про те, що зазначений феномен має місце на межі поділу середовищ у різних агрегатних станах, а саме: рідкого і газоподібного або рідкого і твердого. Причиною наявності поверхневого натягу є відмінність станів молекул рідини, що знаходяться у товщі рідини та у приповерхневому шарі. Розглянемо це більш детально.

Рідкий стан речовини характеризується тим, що внаслідок міжмолекулярної взаємодії рідина, як і тверде тіло, здатна зберігати свій об'єм. Однак інтенсивність міжмолекулярної взаємодії недостатньо велика для того, щоб утримувати молекули у визначених позиціях. Тому час від часу молекули рідини за рахунок теплових флуктуацій стрибкоподібно змінюють свої положення. Це слугує причиною текучості рідин, внаслідок якої форма рідини залежить від зовнішніх чинників, таких, як наявність гравітації та непроникних границь.

Зазначені стрибкоподібні переміщення молекул відбуваються хаотично в усіх напрямках. Якщо прослідкувати за будь-якою

молекулою, що знаходиться у товщі рідини, то її переміщення у середньому дорівнюватиме нулю (за умови, що рідина покоїться як ціле). Це дозволяє говорити, що середнє значення сили притягання (або відштовхування), яка діє на одну молекулу у товщі рідини зі сторони інших молекул, також дорівнює нулю ($\langle \vec{F} \rangle = 0$, див. рисунок 1а). Інша ситуація спостерігається для молекул приповерхневого шару. Внаслідок близькості межі поділу середовищ сила притягання зі сторони молекул товщі рідини виявляється у середньому незкомпенсованою зі сторони менш численних молекул приповерхневого шару, молекул пари цієї рідини та інших газів ($\langle \vec{F} \rangle \neq 0$, див. рисунок 1б). При цьому незкомпенсована сила спрямована переважно у товщу рідини. Такий стан речей має наступні наслідки.

1) Молекули приповерхневого шару мають тенденцію до переміщення у товщу рідини. Тобто внаслідок флуктуацій молекули будуть переважно переміщуватися з приповерхневого шару у середину рідини, поки збільшення тиску всередині рідини не зупинить цей процес. У макроскопічному масштабі це призводить до того, що площа вільної поверхні рідини є завжди мінімальною за визначених умов. Так, наприклад, якщо на рідину не діють будь-які інші тіла, вона самостійно набуває форми кулі, оскільки саме така форма відповідає мінімальній площі поверхні.

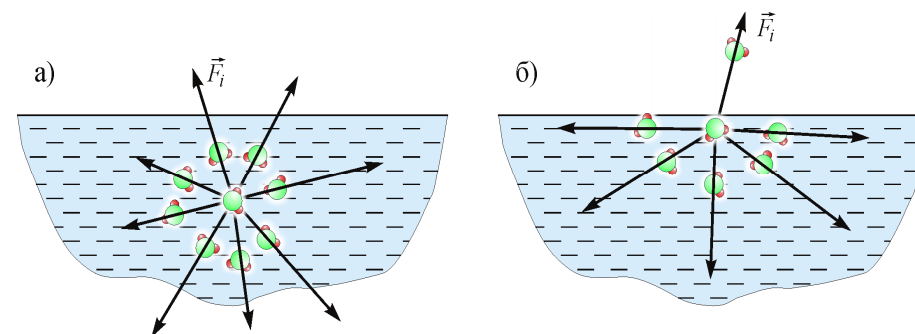


Рисунок 1 – Дія сил міжмолекулярної взаємодії на молекулу у товщі води (а) та у приповерхневому шарі (б)

2) Тиск, що створюється внаслідок руху молекул з приповерхневих шарів усередину рідини, називається **внутрішнім**. За абсолютною величиною він на декілька порядків більший порівняно з тим, що може бути створений зовнішніми чинниками як природного, так і антропогенного характеру. Тому рідини практично не піддаються стисканню.

3) Молекули приповерхневих шарів мають додаткову енергію порівняно з молекулами товщі рідини. Ця енергія називається **поверхневою**. Величина поверхневої енергії пропорційна до кількості молекул у приповерхневому шарі рідини, а отже, пропорційна площі її поверхні. Коефіцієнт пропорційності залежить від типу рідини і називається **коефіцієнтом поверхневого натягу**. Ця величина має зміст *питомої поверхневої енергії* і, як правило, позначається як σ :

$$\sigma = \frac{dW}{dS}, \quad (1)$$

де W – поверхнева енергія; S – площа вільної поверхні рідини, $[\sigma]_{\text{СИ}} = \text{Дж/м}^2$. Поруч із густиною та в'язкістю коефіцієнт поверхневого натягу є однією з основних характеристик рідини. Зважаючи на те, що мікроскопічна природа поверхневого натягу базується як на міжмолекулярній взаємодії, так і на хаотичних переміщеннях молекул, σ відчутно залежить від температури.

З енергетичної точки зору вже зазначений раніше факт, що рідина завжди прагне мінімізувати площу своєї вільної поверхні, є наслідком того, що будь-яка фізична система завжди прямує до стану з мінімальною енергією. У даному випадку мінімум енергії рідини визначається мінімумом площі її вільної поверхні.

Слід зауважити, що роль поверхневого натягу у поведінці рідини залежить від її об'єму. Зі зменшенням об'єму кількість молекул, що знаходяться на поверхні, по відношенню до їх загальної кількості збільшується. Тому зі зменшенням об'єму рідини зростає і ступінь впливу поверхневого натягу. Так, наприклад, вода об'ємом 1 літр в умовах наявності земного тяжіння повністю займає будь-яку посудину з утворенням горизонтальної, практично плоскої межі поділу вода-повітря. У той самий час

вода об'ємом близько 50 мм^3 за тих самих умов може набувати форми, близької до сферичної (крапля роси). Залежність від об'єму тіла існує не лише для поверхневого натягу, а й для усіх інших поверхневих ефектів.

2.2. Сила поверхневого натягу

Тенденція до зменшення вільної поверхні рідини внаслідок поверхневого натягу зумовлює існування на поверхні рідини певної сили, яка отримала назву **сили поверхневого натягу**. Поведінка поверхні рідини еквівалентна поведінці розтягнутої пружної плівки, а дія сили поверхневого натягу ідентична дії сили пружності, що протидіє розтягу плівки. Тому сила поверхневого натягу завжди спрямована вздовж дотичної до поверхні рідини.

Розглянемо дуже малу, практично прямокутну ділянку поверхні рідини площею ΔS (див. рис. 2). Нехай зовнішня сила \vec{F}_3 прикладена перпендикулярно до сторони Δl . Під дією цієї сили площа вільної поверхні збільшується на $dS = \Delta l dx$, і відповідно до виразу (1), поверхнева енергія зростає на $dW = \sigma dS = \sigma \Delta l dx$. Цей приріст енергії має дорівнювати роботі, що виконується проти сили поверхневого натягу \vec{F}_n , спрямованої проти \vec{F}_3 . Користуючись тим фактом, що робота у цьому випадку визначається добутком сили на переміщення $\sigma \Delta l dx = dW = dA = F_n dx$, легко встановити, що

$$F_n = \sigma \Delta l. \quad (2)$$

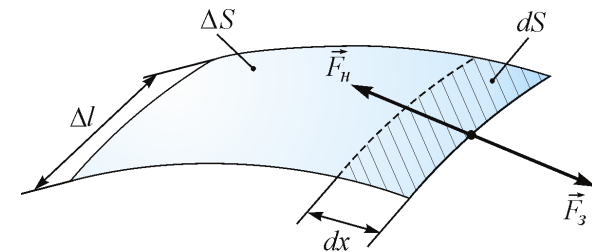


Рисунок 2 – До визначення сили поверхневого натягу

Таким чином, модуль сили поверхневого натягу буде пропорційним довжині контуру на поверхні рідини, а вектор \vec{F}_n буде спрямований перпендикулярно до контуру Δl та паралельно дотичній до її поверхні. Вибір форми та довжини контуру залежить від деталей конкретної ситуації.

2.3. Явища змочування та незмочування

Під час контакту рідини із твердим тілом її поведінка залежить від взаємодії між молекулами твердого тіла та молекулами рідини. Якщо сили притягання між молекулами твердого тіла та молекулами рідини (*адгезія*) більші за сили притягання молекул рідини між собою (*когезія*), рідина буде розтікатися по поверхні твердого тіла. У зворотному ж випадку, коли молекули рідини притягаються між собою інтенсивніше, ніж до молекул твердого тіла, рідина, навпаки, буде набувати компактної форми з мінімальною поверхнею. Розглянемо такі явища більш детально.

Нехай певний об'єм рідини знаходиться на плоскій поверхні твердого тіла в оточенні пари рідини та інших газів (див. рис. 3а). На межі поділу трьох середовищ (межа спроектована в точку А на площину рисунка) будуть діяти три сили, зумовлені взаємодією молекул усіх трьох середовищ: \vec{F}_{TG} , \vec{F}_{RT} , \vec{F}_{RG} . Кожна з цих сил має зміст сили поверхневого натягу, тому відповідно до виразу (2) можна записати

$$F_{TG} = \sigma_{TG}\Delta l, \quad F_{RT} = \sigma_{RT}\Delta l, \quad F_{RG} = \sigma_{RG}\Delta l, \quad (3)$$

де σ_{TG} – коефіцієнт поверхневого натягу твердого тіла на межі з газовим середовищем; σ_{RT} – коефіцієнт поверхневого натягу рідини на межі з твердим тілом; σ_{RG} – коефіцієнт поверхневого натягу рідини на межі з газовим середовищем.

З умови рівноваги векторна сума цих сил, як і сума проєкцій на горизонтальну вісь, має дорівнювати нулю. Тоді з урахуванням співвідношень (3) можна записати, що

$$F_{RG} \cos \theta + F_{TG} - F_{RT} = 0 \Rightarrow \sigma_{RG}\Delta l \cos \theta + \sigma_{TG}\Delta l - \sigma_{RT}\Delta l = 0 \Rightarrow \cos \theta = (\sigma_{RT} - \sigma_{TG})/\sigma_{RG}, \quad (4)$$

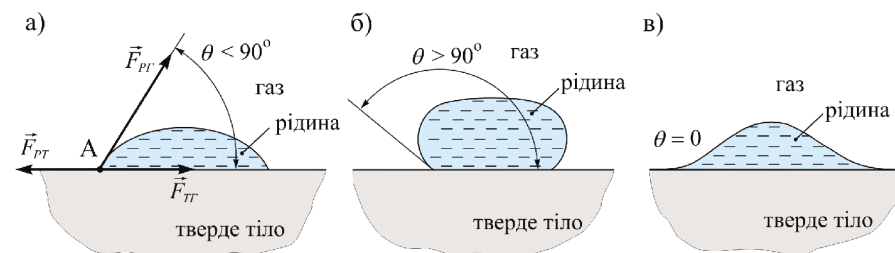


Рисунок 3 – Схематичне зображення часткового змочування рідиною твердого тіла (а), незмочування (б), повного змочування (в)

де θ – **крайовий кут змочування**.

Розрізняють такі ситуації:

1) $(\sigma_{RT} - \sigma_{TG})/\sigma_{RG} > 1 \Rightarrow \cos \theta \equiv 1 \Rightarrow \theta = 0^\circ$. При цьому рідина необмежено розтікається по поверхні твердого тіла, і говорять, що має місце **повне змочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3в).

2) $0 < (\sigma_{RT} - \sigma_{TG})/\sigma_{RG} < 1 \Rightarrow 0 < \cos \theta < 1 \Rightarrow 0^\circ < \theta < 90^\circ$. При цьому рідина розтікається по поверхні твердого тіла лише до визначених меж, і говорять, що має місце **часткове змочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3а).

3) $(\sigma_{RT} - \sigma_{TG})/\sigma_{RG} \leq 0 \Rightarrow \cos \theta \leq 0 \Rightarrow 90^\circ \leq \theta < 180^\circ$. При цьому рідина прагне «зібратися» у кульку, і говорять, що має місце **незмочування** твердого тіла рідиною (див. рис. 3б).

Явища змочування та незмочування можна спостерігати у побуті та живій природі. Так, краплі роси на листках рослин (див. рис. 4а) є яскравим прикладом незмочування. Цікаво, що у наведеному випадку ефект незмочування підсилюється тим, що поверхня листків та стеблин рослин є не плоскою, а має досить нерівномірний мікроскопічний рельєф. Це зменшує контакт між рослиною та водою та збільшує число меж поділу за типом рослина-вода-повітря з достатньо великим кутом змочування. В кінцевому підсумку достатньо великі краплини роси мають можливість знаходитися на поверхні рослини або навіть рухатися по ній. Під час руху краплини роси вона змочує поверхню частинок бруду, що знаходяться на рослині, та забирає бруд із собою. Саме такий спосіб самоочищення дозволяє бути білому лотосу

«символом чистоти», незважаючи на те, що середовищем його існування є болотна драговина.

Іншим прикладом незмочування є спосіб переміщення комах-водомерок (рисунок 4б) по поверхні водоймищ. Кінчики лапок комахи вкриті тонкими та жорсткими волосками, що не змочуються водою. Сила тяжіння, що діє на водомерку завдяки порівняно малій масі, компенсується силою поверхневого натягу.

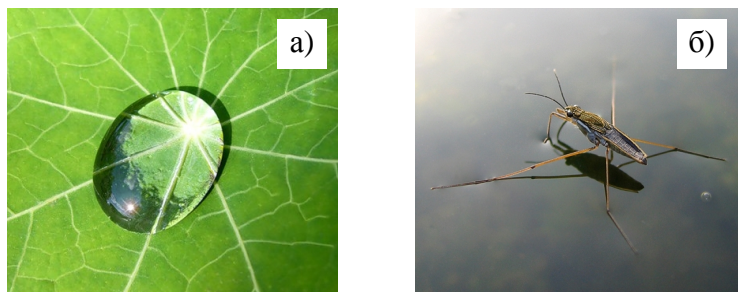


Рисунок 4 – Явища незмочування у природі. Крапля роси на листку рослини (а); комаха-водомерка на поверхні води (б)

2.4. Капілярні явища

Явища змочування та незмочування лежать в основі так званих **капілярних явищ**, які, без сумніву, є одним з основних чинників, що визначають характер життєвих процесів для усіх живих істот на землі. Сутність капілярних явищ полягає у тому, що рідина може підніматися на істотну висоту вздовж тонких порожнин або трубок – капілярів, якщо матеріал капілярів змочується рідиною. У випадку ж незмочування рідина буде опускатися вздовж капіляра, вміщеного в рідину, нижче за загальний її рівень. Саме завдяки капілярності відбувається обмін речовинами у рослинах та на клітинному рівні в організмах тварин і людини.

Висоту підняття рідини у капілярі можна знайти за допомогою таких нескладних розрахунків. З умови рівноваги сила тяжіння (див. рис. 5а) компенсується силою поверхневого натягу. Остання прикладена по внутрішній поверхні циліндричного капіляра перпендикулярно до межі поділу рідина-повітря-капіляр та паралельно його осі у припущенні, що має місце повне змочування (див. рис. 5б)

$$mg = F_n = 2\pi r\sigma \Rightarrow \rho \cdot h\pi r^2 g = 2\pi r\sigma \Rightarrow h = 2\sigma / r\rho g. \quad (5)$$

Вважається, що стовп піднятої рідини являє собою циліндр, і його маса визначається як $m = \rho \cdot h\pi r^2$. Легко побачити, що висота підняття рідини у капілярі обернено пропорційна його розмірам, тобто чим тонший капіляр, тим вище піднімається рідина (див. рис. 5в).

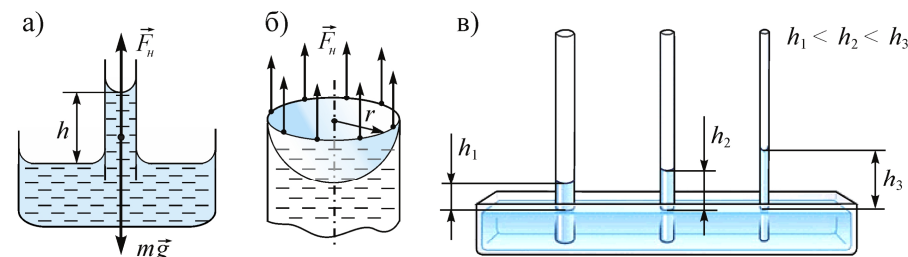


Рисунок 5 – До пояснення фізичної природи капілярних явищ. Сили, що діють на рідину в капілярі (а); характер дії сили поверхневого натягу в капілярі (б); схематичне зображення обернено пропорційної залежності висоти підняття рідини від товщини капіляра (в)

2.5. Поверхневоактивні речовини

Поверхневоактивними речовинами (ПАР) називаються хімічні сполуки, що концентруються на межі поділу рідини з іншими тілами та зменшують коефіцієнт поверхневого натягу речовини. Основною кількісною характеристикою ПАР є **поверхнева активність (A_s)** – здатність речовини зменшувати величину σ . Вона визначається як похідна від коефіцієнта поверхневого натягу за величиною концентрації n ПАР за умови, що концентрація прямує до нуля

$$A_s = - \left. \frac{d\sigma}{dn} \right|_{n \rightarrow 0}. \quad (6)$$

Зауважимо, що за рахунок обмеженої розчинності ПАР існує критична концентрація, за якої подальше додавання ПАР не приводить до зменшення коефіцієнта поверхневого натягу.

Особливість будови молекул ПАР полягає у наявності **гідрофільних** груп, які більш інтенсивно притягуються до молекул рідини, ніж між собою, та **гідрофобних** груп, що, навпаки, активніше взаємодіють між собою, ніж з молекулами рідини (див. рис. 6а). Зрозуміло, що рівноважне положення для таких молекул має місце, коли молекула знаходиться на поверхні рідини, і при цьому гідрофільна частина знаходиться у рідині, а гідрофобна – на зовні (див. рис. 6б). Молекули рідини у приповерхневому шарі виявляються розділеними молекулами ПАР, в результаті чого інтенсивність міжмолекулярної взаємодії у приповерхневому шарі зменшується. Як наслідок, поверхнева енергія також зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнта поверхневого натягу рідини.

Прикладом ПАР є звичайне мило (суміш натрієвих солей жирних карбонових кислот – олеату ($C_{17}H_{33}COONa$) та стеарату ($C_{17}H_{35}COONa$) натрію), а також спирти, карбонові кислоти.

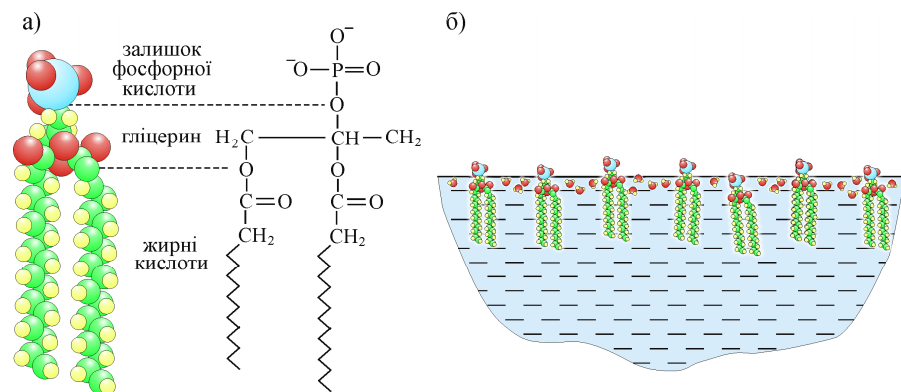


Рисунок 6 – Приклад схематичної будови молекули ПАР – фосфоліпиду (а). До пояснення поведінки молекул ПАР у рідині (б)

2.6. Класифікація ПАР

Існує надзвичайно велика кількість ПАР, які значно відрізняються між собою за фізико-хімічними характеристиками. Також існує декілька класифікацій таких речовин. Так, у відповідності до класифікації, прийнятої Міжнародною Організацією зі стандартизації (International Organization for Standardization – ISO), ПАР за хімічними властивостями поділяють на чотири типи.

1) **Аніонактивні** ПАР. Вони містять в молекулі одну чи декілька полярних груп та добре дисоціюють у воді з утворенням аніонів у вигляді довгих ланцюжків, які і визначають їх поверхневу активність. Це групи: $COOH(M)$, $OSO_2OH(M)$, $SO_3H(M)$, де M – одно-, дво- або тривалентний метал. Гідрофобна частина молекули, як правило, являє собою аліфатичні ланцюжки або алкілові та ароматичні радикали.

2) **Катіонактивні** ПАР, молекули яких під час дисоціації утворюють поверхневоактивний катіон з довгим гідрофобним ланцюжком аніона – як правило галогеніду. Катіонактивні ПАР менше знижують поверхневий натяг, ніж аніонактивні, однак можуть брати участь у хімічних реакціях з поверхнею **адсорбенту** (твердого тіла, здатного накопичувати у собі інші хімічні сполуки). Наприклад, реакція з клітинними білками бактерій зумовлює бактерицидні властивості катіонактивних ПАР, а реакція з волокнами целюлози, що міститься у тканині, надає їй водовідштовхувальних властивостей.

3) **Неіоногенні** ПАР не дисоціюють у воді на іони. Їх розчинність зумовлена наявністю в молекулах гідрофільних ефірних ($CO-O$) та гідроксильних (OH) груп. Під час розчинення молекули води за допомогою водневого зв'язку приєднується до кисню ефірних та гідроксильних груп. Подібні з'єднання називаються **гідратами**. Характерною особливістю неіоногенних ПАР є рідкий стан та низьке піноутворення у водних розчинах.

4) **Амфотерні** ПАР. Даний тип речовин не дисоціює під час розчинення, однак самі по собі вони є хімічно активними. Остання властивість забезпечується, як правило, гідрофільним радикалом та здатністю гідрофобної частини бути акцептором або донором протона. Тому, залежно від концентрації іонів вод-

ню у розчині (так званий показник *pH*) амфотерні ПАР здатні проявляти себе як аніонактивні або катіонактивні ПАР.

З точки зору фізичних властивостей, актуальних для практичного застосування, розрізняють також чотири типи ПАР.

1) Низькомолекулярні ПАР, які добре розчинні у воді, а їх розчин має порівняно малу в'язкість. Їх розчини не створюють колоїдних частинок ні в об'ємі, ні в поверхневому шарі, що перешкоджає піноутворенню. Тому такі речовини використовуються як своєрідні «піногасники» у технологічних процесах, де утворення піни є небажаним. Також такі ПАР застосовуються у різних методах сепарації дрібних твердих частинок та виділення крапель *дисперсної* (розпорошеної, розділеної на багато частинок) фази з *емульсій* (дисперсних систем, в яких маленькі краплинки однієї рідини знаходяться у об'ємі іншої), в яких використовується різна змочуваність частинок і їх здатність накопичуватися на поверхні поділу фаз – так звана *флотація*.

2) ПАР, які проявляють поверхневу активність на межі двох рідин, що не змішуються. Зменшення поверхневої енергії завдяки таким ПАР полегшує процес утворення нової поверхні, зокрема в процесі *диспергування* (механічне розпорошення, утворення дрібних частинок (об'ємів) з великих). Тому вони застосовуються при створенні емульсій, *суспензій* (дисперсних систем, в яких маленькі частинки твердого тіла знаходяться у об'ємі рідини), *аерозолів* (дисперсних систем, в яких маленькі частинки рідини або твердого тіла знаходяться у об'ємі газу).

3) Третій тип складають ПАР, молекули яких добре взаємодіють із молекулами рідини, які внаслідок змочування приєднуються до поверхні твердого тіла. В результаті поверхня твердого тіла покривається своєрідною оболонкою із молекул ПАР, при цьому зовнішня частина такої оболонки утворена гідрофобними частинами молекул. Це запобігає об'єднанню диспергованих частинок твердого тіла у більш великі утворення завдяки взаємодії з молекулами рідини – так званої *коагуляції*. Тому такі ПАР ще називають стабілізаторами.

4) Четвертий тип ПАР складають миючі речовини, або *детергенти*, що займають перше місце за масштабами практичного застосування. Так, у світі зараз виробляється близько 3 кг

миючих засобів на душу населення за рік, а в Україні рівень їх споживання наближається до 5 кг на душу населення за рік. Як і для ПАР попереднього типу, молекули детергенту приєднуються гідрофільними частинами до частинок бруду, а завдяки утвореній гідрофобній оболонці виштовхуються з води та концентруються у стабілізованих частинках емульсії або суспензії. Детергенти повинні мати весь комплекс властивостей, характерних для трьох попередніх типів, тобто суттєво знижувати поверхневий натяг, проявляти змочувальну, гідрофілізуючу дію і бути не тільки диспергаторами, але і сильними стабілізаторами емульсій і суспензій. Також бажаним є стійкість піни, за рахунок якої збільшується активна площа розчину детергенту.

2.7. Вплив ПАР на екологію

Основні загрози, що несе використання ПАР, можна розділити на такі категорії.

1) Оскільки життя практично усіх високорозвинених організмів базується на використанні води, негативна дія ПАР невід'ємно пов'язана із призначенням цих речовин. Зменшення коефіцієнта поверхневого натягу у відповідності до виразу (5) суттєво впливає на капілярні явища, які визначають процеси обміну речовин.

2) Накопичення ПАР як у прісних водоймах, так і у океані має наслідком зниження поверхневого натягу води. У свою чергу, це зменшує здатність води утримувати кисень та вуглекислий газ, що розчинені у ній, і негативно позначається на умовах існування водної флори та фауни.

3) Більшість ПАР є синтетичними речовинами, що досить повільно розпадаються і тому здатні накопичуватися в організмах в неприпустимих концентраціях. Крім того, це стосується і продуктів їх розпаду.

4) Практично всі ПАР, що використовуються у промисловості та побуті, добре адсорбуються на поверхні частинок ґрунту, піску та глини. За певних умов адсорбовані молекули ПАР можуть вивільняти іони важких металів, які утримуються цими частинками, що підвищує ризик їх потрапляння у живі організми.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Динамометр ДПН.
2. Пінцет.
3. Чашка місткістю 100 см³.
4. Мірна склянка.
5. Піпетка.
6. Водний розчин поверхнево-активної речовини.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принцип визначення коефіцієнта поверхневого натягу базується на такому явищі. Якщо вертикально занурити у рідину рамку (або частину рамки, так звану петлю) з тонкого металевого дроту, який змочується рідиною, а потім обережно витягти її, то у площині рамки утвориться тонка плівка рідини (див. рисунок 7а). При цьому на горизонтальну частину петлі вертикально вниз діятиме сила поверхневого натягу, яка у відповідності до виразу (2) буде визначатися як $F_n = 2\sigma l$. Тут l – довжина горизонтальної частини петлі, а множник 2 наявний за рахунок наявності двох поверхонь поділу рідина-повітря з обох сторін утвореної плівки. Для того щоб відірвати петлю від рідини, потрібно прикласти зовнішню силу, яка у граничному випадку за модулем має дорівнювати F_n .

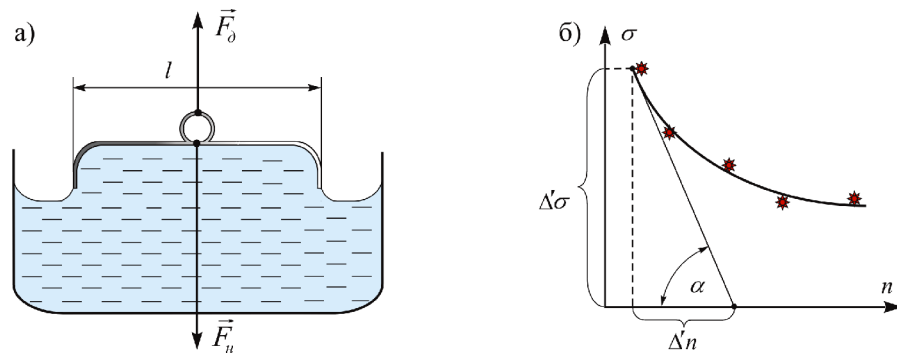


Рисунок 7 – Схематичне зображення дротяної петлі, що витягується з рідини (а). До визначення активності ПАР (б)

Зовнішньою силою може служити сила пружності пружини динамометра, що одночасно забезпечує вимірювання величини сили та компенсацію сили тяжіння відповідним встановленням нуля динамометра. Тоді коефіцієнт поверхневого натягу визначається виразом

$$\sigma = F_\delta / 2l, \quad (7)$$

де F_δ ($F_\delta = F_n$) – максимальне показання динамометра, або показання у момент відриву петлі.

Додавання розчину ПАР призводить до зменшення величини σ . Як наслідок, сила, за допомогою якої можна відірвати петлю від поверхні рідини, також зменшиться. Шляхом додавання ПАР у рідину вимірювання сили F_δ та визначення коефіцієнта поверхневого натягу за допомогою виразу (7) можна побудувати залежність $\sigma(n)$ (див. рис. 7б). Тангенс нахилу дотичної до одержаної кривої, побудованої на початку залежності, являтиме собою значення поверхневої активності

$$A_s = - \left. \frac{d\sigma}{dn} \right|_{n \rightarrow 0} = \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\Delta' \sigma}{\Delta' n}. \quad (8)$$

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 8.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

5.1. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу

1. Уважно ознайомтеся з попередніми розділами лабораторної роботи та будовою установки.
2. Установіть корпус динамометра 1 вертикально. Корпус тримача 9 встановіть так, щоб його вісь збігалася з віссю стакана 2 та пружини 3.
3. Висоту підставки 8 встановіть так, щоб петля могла занурюватися у рідину та виходити з неї за допомогою гвинта 10.
4. Налийте у чашку 7 100 см³ чистої води.
5. Установіть чашку 7 з рідиною на підставку 8.

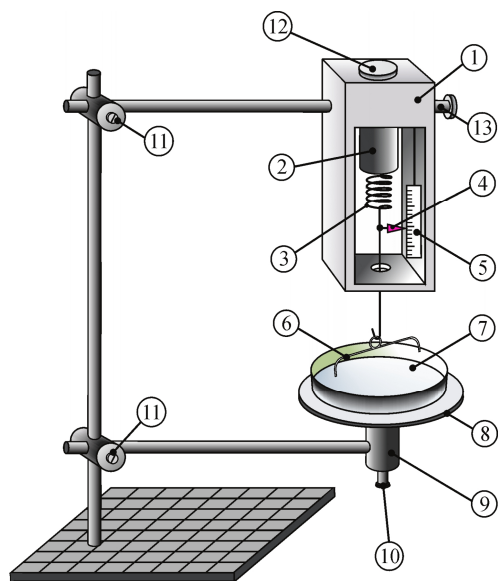


Рисунок 8 – Схематичне зображення експериментальної установки: 1 – корпус динамометра; 2 – стакан динамометра; 3 – вимірювальна пружина; 4 – стрілка для визначення сили; 5 – шкала динамометра; 6 – петля; 7 – чашка для рідини; 8 – підставка; 9 – корпус тримача; 10 – гвинт тримача; 11 – затискачі з гвинтами; 12 – регулювальний гвинт для встановлення нуля; 13 – стопорний гвинт

6. За допомогою пінцета підвісьте одну з петель до гачка в нижній частині пружини 3. Довжину горизонтальної сторони петлі, похибку її визначення Δl та інструментальну похибку динамометра $\Delta_1 F$ запишіть у таблицю 1.

Увага! Не торкайтеся руками петлі та внутрішньої сторони чашки, оскільки це погіршить змочуваність матеріалу петлі та приведе до похибок вимірювання. Якщо ж такий контакт відбувся, знежирте чашку та петлю спиртом або мильним розчином.

7. За допомогою гвинта 12 встановіть стрілку динамометра 4 на нульову позначку шкали 5.
8. За допомогою гвинта 10 підніміть підставку 8 так, щоб петля повністю занурилась у рідину.

9. Повільно обертаючи гвинт 10, забезпечте повільний та рівномірний по усій довжині l вихід петлі з рідини з утворенням плівки, як це показано на рисунку 7а. Показання динамометра при цьому будуть рівномірно збільшуватися аж до відриву петлі від рідини.
10. У момент відриву зафіксуйте показання динамометра та запишіть їх у таблицю 1.
11. Повторіть зазначені у пунктах 7-10 вимірювання ще 4 рази для тієї самої петлі. Результати запишіть у таблицю 1.
12. Повторіть зазначені у пунктах 6-10 вимірювання для решти петель. Результати запишіть у таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань коефіцієнта поверхневого натягу чистої води

№ досліду	F, Н		
	$l_1 =$ мм	$l_2 =$ мм	$l_3 =$ мм
1			
2			
3			
4			
5			
$\langle F_i \rangle$, Н			
$\Delta_2 F_i$, Н			
ΔF_i , Н			
σ_i , Н/м			
$\Delta \sigma_i$, Н/м			

$\Delta l =$	$\Delta_1 F =$	$\langle \sigma \rangle =$	$\Delta \sigma =$
$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma =$			

Увага! Подальший опис стосується обробки одержаних даних. Тому спочатку виконайте вимірювання, зазначені у пунктах 1-12, та завершіть експериментальну частину робіт, а потім здійсніть зазначені далі розрахунки.

13. Обчисліть середнє значення сили поверхневого натягу для кожної петлі у відповідності до виразу

$$\langle F_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_{ij}, \quad (9)$$

де N – загальна кількість вимірювань для кожної петлі ($N = 5$); i ($= 1, 2, 3$) – порядковий номер петлі; j ($= 1, \dots, N$) – порядковий номер досліду. Результат запишіть у таблицю 1.

14. Обчисліть значення випадкової складової абсолютної похибки вимірювання сили поверхневого натягу для кожної петлі у відповідності до виразу

$$\Delta_2 F_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (F_{ij} - \langle F_i \rangle)^2} \quad (N = 5). \quad (10)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

15. Обчисліть значення абсолютної похибки вимірювання сили поверхневого натягу для кожної петлі

$$\Delta F_i = \sqrt{(\Delta_1 F)^2 + (\Delta_2 F)^2}, \quad (11)$$

$\Delta_1 F$ – інструментальна похибка динамометра. Результат запишіть у таблицю 1.

16. Обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу для кожної петлі

$$\sigma_i = \frac{\langle F_i \rangle}{2l_i}. \quad (12)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

17. Одержіть абсолютну похибку визначення коефіцієнта поверхневого натягу для кожної петлі

$$\Delta \sigma_i = \sigma_i \sqrt{\left(\frac{\Delta F_i}{\langle F_i \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l_i}\right)^2}. \quad (13)$$

Результат запишіть у таблицю 1.

18. Кінцевий результат визначення коефіцієнта поверхневого натягу чистої води подайте у вигляді

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma,$$

де $\langle \sigma \rangle = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $\Delta \sigma = \max(\Delta \sigma_i)$.

5.2. Визначення поверхневої активності ПАР

- У другу колонку таблиці 2 (для $k = 0$) переписіть дані з таблиці 1 для визначеної викладачем петлі.
- За допомогою пінцета підвісьте петлю, зазначену викладачем, до гачка у нижній частині пружини. Довжину горизонтальної сторони петлі запишіть у таблицю 2.
- За допомогою піпетки додайте у чашку з водою одну краплю 10 % розчину мильного порошку (ПАР).

Таблиця 2 – Результати вимірювань поверхневої активності мильного розчину

№ досліду	F, H (для $l =$ мм)					
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
1						
2						
3						
4						
5						
$n_k, \text{кг/м}^3$	0					
$\langle F_k \rangle, \text{H}$						
$\Delta_2 F_k, \text{H}$						
$\Delta F_k, \text{H}$						
$\sigma_k, \text{H/м}$						
$\Delta \sigma_k, \text{H/м}$						

$\Delta' n =$	$\Delta' \sigma =$	$\Delta n =$	$\Delta \sigma =$
$A_s =$	$\Delta A_s =$		

- Проведіть зазначений у пунктах 7-10 підрозділу 5.1 дослід 5 разів. Результати запишіть у таблицю 2 (колонка $k = 1$).
- Додайте у чашку по одній краплі ще 4 рази. Після кожного додавання 5 разів виміряйте силу поверхневого натягу, як це зазначено у пунктах 7-10 підрозділу 5.1. Результати запишіть у таблицю 2 (колонки $k = 2, 3, 4, 5$).
- Обчисліть концентрацію ПАР у розчині для кожної кількості крапель у відповідності до виразу

$$n_k = \frac{0,1 \cdot V_0 \rho_m}{V} k, \quad (14)$$

де $V = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ – об'єм води у чашці; $V_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ – об'єм краплі з піпетки; $\rho_m = 1500 \text{ кг/м}^3$ – густина мила. Результати запишіть у таблицю 2.

- Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР середнє значення сили поверхневого натягу $\langle F_k \rangle$ у відповідності до виразу (9), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
- Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР випадкову складову $\Delta_2 F_k$ абсолютної похибки визначення сили у відповідності до виразу (10), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
- Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР абсолютну похибку визначення сили ΔF_k у відповідності до виразу (11), де як індекс « i » слід брати індекс « k ». Результати запишіть у таблицю 2.
- Обчисліть для кожної концентрації розчину ПАР коефіцієнт поверхневого натягу у відповідності до виразу

$$\sigma_k = \frac{\langle F_k \rangle}{2l}. \quad (15)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

- Побудуйте графік залежності $\sigma(n)$, як показано на рисунку 7б.
- Побудуйте дотичну до одержаної залежності для $n = 0$ та визначте величини $\Delta' n$ та $\Delta' \sigma$, як показано на рисунку 7б.

- Відповідно до виразу (8) обчисліть поверхневу активність A_s мильного розчину.
- Похибку визначення поверхневої активності розрахуйте за допомогою співвідношення

$$\Delta A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta' \sigma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{\Delta' n}\right)^2}, \quad (16)$$

де $\Delta n = 0,05 \cdot \rho_m \cdot V_0 / V$ – абсолютна похибка визначення концентрації; $\Delta \sigma = \max(\Delta \sigma_k)$ – абсолютна похибка визначення коефіцієнта поверхневого натягу

$$\Delta \sigma_k = \sigma_k \sqrt{\left(\frac{\Delta F_k}{\langle F_k \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}. \quad (17)$$

- Зробити висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

- Дати визначення коефіцієнта поверхневого натягу.
- Що називають силою поверхневого натягу?
- Які речовини називаються поверхневоактивними?
- Що називається змочуванням та незмочуванням?
- Послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

- Яка фізична природа поверхневого натягу?
- Пояснити сутність капілярних явищ та їх роль у живій природі?
- Одержати формулу (4). Пояснити зміст терміна “крайовий кут змочування”.
- Якою величиною характеризується дія поверхневоактивних речовин? Дати визначення цієї величини.
- У чому полягає небезпека ПАР для навколишнього середовища?

На оцінку “відмінно”

11. Одержати вираз для висоти підйому рідини у капілярі за умови заданого крайового кута змочування.
12. Як і чому коефіцієнт поверхневого натягу залежить від температури?
13. Класифікувати ПАР та описати кожен тип цих речовин.
14. Детально описати усі фізичні процеси, які мають місце у процесі прання.
15. Одержати вираз для розрахунку похибки (13).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 1. Класична механіка і теорія відносності. Молекулярно-кінетична теорія і термодинаміка. Механічні коливання та хвилі. Звук. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. http://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхнево-активні_речовини
6. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3420.html>

Лабораторна робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. МЕТА РОБОТИ

Експериментально визначити ЕРС джерела струму методом компенсації.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Постійний струм. Основні поняття

Електричний струм – це впорядкований рух зарядів. Тут і в подальшому будемо розглядати лише так званий **струм провідності**, або рух зарядів у провідниках. Для існування струму провідності повинні виконуватися дві умови: 1) наявність вільних заряджених частинок – тобто частинок, які можуть переміщатися під дією будь-якої сили; 2) наявність різниці потенціалів $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ між ділянками середовища. Матеріали, які містять вільні заряди, називаються **провідниками**. Кількісною мірою електричного струму є **сила струму**

$$I = \dot{q} = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

яка чисельно дорівнює заряду q , що проходить за одиницю часу через переріз провідника.

Властивість провідників перешкоджати впорядкованому руху зарядів називається **електричним опором** провідника. Одночасно опором називають кількісну міру цієї властивості і позначають її літерою R . Для металевого провідника довжиною l зі сталою площею поперечного перерізу S опір знаходиться із виразу

$$R = \rho l / S, \quad (2)$$

де ρ – питомий опір, який залежить від матеріалу провідника і температури зовнішнього середовища. Сила струму в таких провідниках визначається за **законом Ома для ділянки кола**

$$I = U/R. \quad (3)$$

Рух заряджених частинок, зумовлений чинниками електростатичного походження, не може існувати необмежено довго. Припустимо, певний об'єм провідника заряджений нерівномірно. У цьому випадку між ділянками провідника існуюватиме різниця потенціалів $\Delta\varphi = U$, яка зумовить проходження струму. Однак струм приведе до вирівнювання густини заряду в провіднику, внаслідок чого його потенціал стане однаковим в усьому об'ємі. Таким чином, струм, зумовлений електростатичними силами, буде усувати одну із причин свого існування і згасати. Тому такі сили не можуть забезпечити постійний рух зарядів у колі. Сталу різницю потенціалів на окремих ділянках кола (відповідно і силу струму в колі) можна створювати за рахунок так званих сторонніх сил. **Сторонні сили** – це сили будь-якого походження, крім електростатичного, які здатні переміщати заряди проти електростатичного поля. Відношення роботи A сторонніх сил з переміщення заряду q називається **електрорушійною силою**, або **ЕРС** джерела струму

$$E = A/q. \quad (4)$$

Як і напруга, ЕРС вимірюється у вольтах: $[E] = V$.

Важливою характеристикою джерела струму є також його **внутрішній опір** r . Він впливає на струм у колі так само, як і зовнішній стосовно джерела опір R . Сила струму у колі, що містить джерело ЕРС, визначається за законом **Ома для повного кола**

$$I = E/(R + r). \quad (5)$$

2.2. Суть методу компенсації

Будь-яке електричне вимірювання вимагає певних затрат енергії на роботу вимірювального приладу. Наприклад, у випадку вимірювання величини ЕРС E_x вольтметром (див. рис. 1а) через нього буде проходити струм, що визначається за формулою (5). Відповідно показання вольтметра будуть

$$U = E_x - Ir_x = E_x - E_x r_x / (R_V + r_x), \quad (6)$$

де R_V – опір вольтметра; r_x – внутрішній опір джерела. Тобто проходження струму через джерело призводить до похибки вимірювання його ЕРС. Позбутися цієї похибки можна, якщо струм у колі відсутній, тобто $I = 0$. Остання умова буде виконуватися, коли ЕРС джерела **компенсована** падінням напруги на опорі, підключеному паралельно до джерела. На цьому принципі і базується **метод компенсації**.

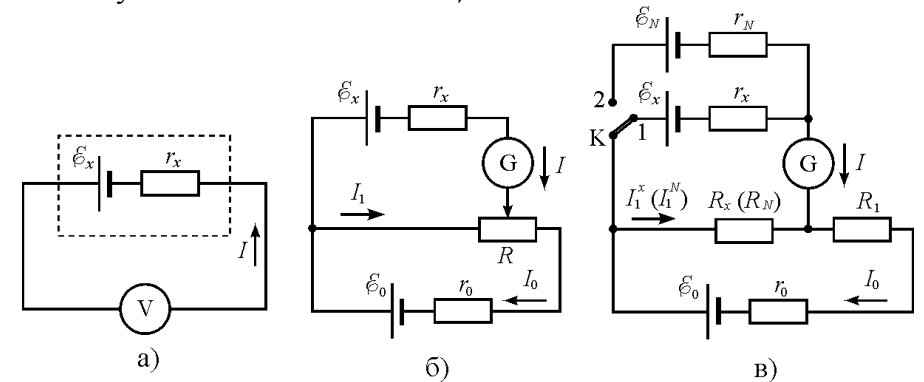


Рисунок 1 – Схема прямого вимірювання величини ЕРС вольтметром (а); схема компенсації ЕРС, що вимірюється, за рахунок зовнішнього джерела (б); схема для порівняння ЕРС невідомого джерела E_x з ЕРС еталонного E_N (в). Значення в дужках відповідають положенню 2 ключа K

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай струм від допоміжного джерела E_0 ($E_0 > E_x$) проходить через потенціометр R (див. рис. 1б). Струми I та I_1 будуть набувати довільних значень, обмежених умовою $I_1 + I = I_0$ внаслідок закону збереження заряду. Шляхом зміни положення бігунка змінного опору R можна досягти ситуації, коли струм I буде відсутнім. При цьому ЕРС E_x буде скомпенсована падінням напруги на опорі R_x тієї частини потенціометра, що знаходиться ліворуч від бігунка (див. рис. 1в)

$$E_x = I_1^x R_x = I_0 R_x. \quad (7)$$

Підкреслимо, падіння напруги $I_0 R_x$ створюється за рахунок енергії додаткового джерела E_0 .

Визначати невідомі величини I_0 та R_x не буде потреби, якщо повторити усі наведені операції для **еталонного джерела** струму E_N , а потім порівняти одержані результати. ЕРС еталонного джерела відома з великою точністю. Схема, за допомогою якої реалізується зазначена ідея, наведена на рисунку 1в. Шляхом перемикавання ключа K в положення 2 та переміщенням бігунка змінного опору можна компенсувати ЕРС еталонного джерела

$$E_N = I_1^N R_N = I_0 R_N. \quad (8)$$

При цьому струм I_0 у виразах (7) та (8) однаковий, оскільки в обох випадках він визначається сумарним опором потенціометра та внутрішнім опором зовнішнього джерела.

Як потенціометр зручно використовувати реохорд, який являє собою тонкий провідник зі сталим перерізом, розміщений вздовж проградуєваної в міліметрах шкали. Тоді згідно з виразом (2) опори R_x та R_N будуть визначатися відповідними довжинами провідників l_x та l_N , а коефіцієнти пропорційності будуть однакові. Поділимо співвідношення (7) на (8) і з урахуванням останньої обставини одержимо вираз для знаходження ЕРС E_x через ЕРС еталонного джерела E_N

$$E_x = E_N \frac{l_x}{l_N}. \quad (9)$$

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Невідоме джерело ЕРС (E_x).
2. Еталонне джерело ЕРС (E_N).
3. Джерело ЕРС, за допомогою якого відбувається компенсація (E_0).
4. Реохорд.
5. Гальванометр.
6. Магазин опорів.
7. Ключ.
8. Перемикач.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Принципова схема лабораторної роботи для визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела зображена на рисунку 2, а загальний вигляд лабораторної установки наведено на рисунку 3. За допомогою перемикача K_1 б до джерела живлення 3 підключаються через реохорд R_1 4 по чергово невідоме джерело E_x 1 та еталонне джерело E_N 2. Тут і далі літерне позначення відповідає схемі рисунка 2, а цифрове – рисунка 3. Для обмеження струмів у гілках схеми за допомогою магазину опорів 8 виставляються опори R та R_0 . Гальванометр G 5 фіксує проходження або відсутність струму в гілці скомпенсованого джерела. Для попередження проходження струмів, які перевищують діапазон вимірювання гальванометра, послідовно з ним ввімкнено ключ K_2 7. Під час підбору потрібного положення бігунка реохорда ключ K_2 має бути розімкнений.

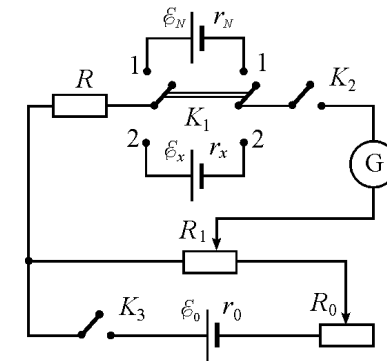


Рисунок 2 – Принципова схема установки для визначення ЕРС джерела

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтесь з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Запишіть у таблицю 1 значення ЕРС еталонного джерела E_N 2 та залежну від температури поправку $\Delta'E_N$, що зазначені на кришці джерела.

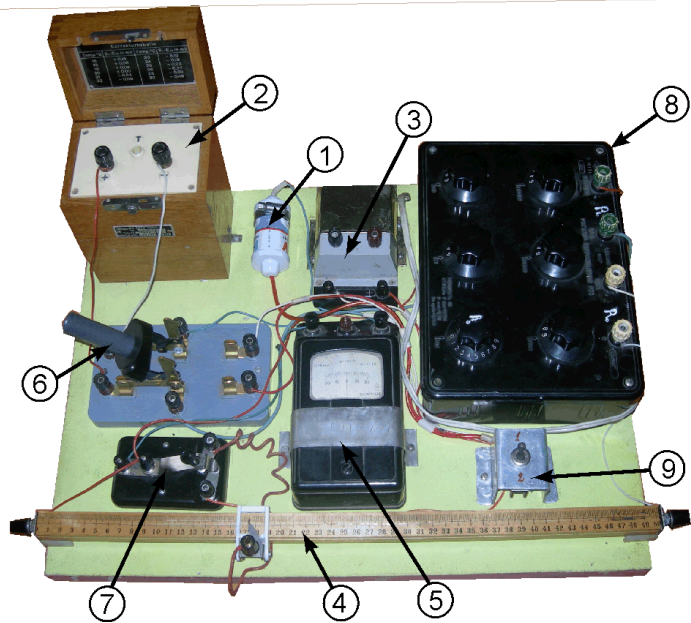


Рисунок 3 – Лабораторна установка: 1 – невідоме джерело E_x ; 2 – еталонне джерело E_N ; 3 – зовнішнє джерело E_0 ; 4 – реохорд; 5 – гальванометр; 6 – перемикач для перемикання невідомого та еталонного джерел K_1 ; 7 – ключ K_2 ; 8 – магазин опорів; 9 – тумблер підключення E_x послідовно з E_0

3. Запишіть у таблицю 1 інструментальну похибку $\Delta_1 l$ визначення довжини дроту реохорда.
4. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0$.
5. За допомогою перемикача K_1 6 підключіть невідоме джерело E_x 1.
6. Виставте бігунок реохорда так, щоб струм через гальванометр був відсутній. Занесіть значення l_x до таблиці 1.

Увага! Щоб запобігти виходу з ладу гальванометра, для розриву вітки поставлено ключ K_2 . У процесі компенсації слід замикати вітку гальванометра шляхом короткочасних натискань на даний ключ.

7. За допомогою перемикача K_1 підключіть еталонне джерело E_N 2, аналогічним чином визначте l_N та занесіть його значення до таблиці 1.

Увага! Щоб запобігти виходу з ладу еталонного джерела ЕРС, не слід тримати його включеним тривалий час. Тому виміри потрібно виконувати якнайшвидше, після чого треба відключати еталонне джерело перемикачем K_1 .

Таблиця 1 – До визначення ЕРС E_x

№ досліду	l_{xi} , мм	$ \langle l_x \rangle - l_{xi} $, мм	l_{Ni} , мм	$ \langle l_N \rangle - l_{Ni} $, мм
1				
2				
...				
$N - 1$				
N				
середнє $\langle \dots \rangle$		—		—

$E_N = E_N(20^\circ\text{C}) + \Delta' E_N =$, В	$\Delta_1 l =$, мм	$\Delta_2 l_x =$, мм	$\Delta_2 l_N =$, мм
---	-----	----------------	------	------------------	------	------------------	------

8. Повторіть усі вищенаведені операції ще чотири рази та заповніть таблицю 1.
9. У перший рядок таблиці 2 запишіть дані останнього вимірювання з таблиці 1.
10. Встановіть на магазині опорів 8 опір $R_0 = 0,1$ Ом та визначте l_x та l_N . Результати занесіть до таблиці 2. ЕРС E_x для кожного досліду визначити із співвідношення (9).
11. Повторіть п.10 ходу роботи ще 3 рази для $R_0 = 0,2; 0,3; 0,4$ Ом.

Унаслідок цього експерименту ви повинні пересвідчитись, що результати не залежать від величини опору R_0 .

Таблиця 2 – Демонстрація незалежності результатів від R_0

№ досліду	R_0 , Ом	l_{xi} , мм	l_{Ni} , мм	E_{xi} , В
	0			
	0,1			
	0,2			
	0,3			
	0,4			

12. Визначте середні значення $\langle I_x \rangle$ та $\langle I_N \rangle$ та величини $\langle I_x \rangle - I_{xi}$ та $\langle I_N \rangle - I_{Ni}$. Результати запишіть до відповідних колонок таблиці 1.
13. Обчисліть E_x за допомогою формули (9) та даних таблиці 1. Тут як I_x та I_N слід брати обчислені за даними таблиці 1 середні значення $\langle I_x \rangle$ та $\langle I_N \rangle$.
14. За допомогою даних таблиці 1 обчисліть абсолютну похибку визначення ЕРС за формулою

$$\Delta E_x = E_x \sqrt{\left(\frac{\Delta E_N}{E_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_N}{\langle I_N \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_x}{\langle I_x \rangle}\right)^2}, \quad (10)$$

де як $\Delta \dot{A}_N$ потрібно брати одиницю найменшого розряду величини \dot{A}_N ,

$$\Delta I_N = \sqrt{(\Delta_1 I)^2 + (\Delta_2 I_N)^2}, \quad (11)$$

$$\Delta_2 I_N = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle I_N \rangle - I_{Ni})^2} \quad (N = 5). \quad (12)$$

Абсолютну похибку ΔI_x слід визначати аналогічно до виразів (11) та (12) зміною індексу «N» на «x».

15. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що називають електричним струмом? Умови його існування.
2. Дати визначення сили струму.
3. Сформулювати закон Ома в інтегральній формі для повного кола та для ділянки кола.
4. Яка перевага методу компенсації над прямими вимірюваннями ЕРС?
5. Викласти послідовність виконання роботи.

На оцінку “добре”

6. Розкрити поняття “сторонні сили” та “електрорушійна сила”.
7. Розкрити поняття “електричний опір”.
8. Записати закон Ома в диференціальній формі для ділянки кола та для повного кола. Показати зв’язок між диференціальною та інтегральною формами запису.
9. Викласти сутність вимірювання ЕРС методом компенсації.
10. Накреслити принципову схему лабораторної установки. Пояснити призначення всіх її елементів.

На оцінку “відмінно”

11. Одержати розрахункову формулу (9) для визначення ЕРС E_x невідомого джерела методом компенсації.
12. Вивести формулу для знаходження похибки визначення ЕРС E_x .
13. Записати закон Джоуля-Ленца в диференціальній та інтегральній формах. Показати взаємозв’язок між ними.
14. Записати правила Кірхгофа та пояснити їх застосування на прикладі.
15. Знайти струми у кожній вітці електричної схеми, заданої викладачем, за правилами Кірхгофа.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Сивухин Д.В. Общій курс физики. Том 3. Электричество. – М.: Наука, 1980.

Лабораторна робота 9

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

1. МЕТА РОБОТИ

Визначити вектор індукції магнітного поля Землі.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Поняття магнітного поля

Згідно з класичним визначенням **магнітне поле** – це особливий вид матерії, який існує навколо електричних струмів (постійних магнітів) та передає дію одних струмів (магнітів) на інші. Як і електричне, магнітне поле має свою силову характеристику, що визначає інтенсивність взаємодії струмів – **магнітну індукцію** \vec{B} . Але формального визначення за аналогією з напруженістю електричного поля для \vec{B} не існує. Причина у тому, що будь-який струм як джерело магнітного поля є просторовим об'єктом. Відповідно індукція магнітного поля \vec{B} буде залежати, в тому числі, і від геометричної конфігурації струму. Експериментально встановлено, що кожен елемент $d\vec{l}$ струму I в точці простору, положення якої задано радіусом-вектором \vec{r} (див. рис. 1), збуджує поле $d\vec{B}$, яке визначається **законом Біо-Савара-Лапласа**

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{|\vec{r}|^3}, \quad (1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнітна стала. Індукція сумарного поля \vec{B} , що створюється усім провідником зі струмом, визначається лінійним інтегралом від $d\vec{B}$, оскільки для магнітного поля є справедливим принцип суперпозиції. Просторова конфігурація магнітного поля описується за допомогою так званих **силових ліній** – ліній, дотична до кожної з яких в будь-якій точці простору збігається з напрямком \vec{B} , а їх густина пропорційна модулю індукції

магнітного поля. Важливо, що на відміну від силових ліній електричного поля силові лінії магнітного поля завжди **замкнені**.

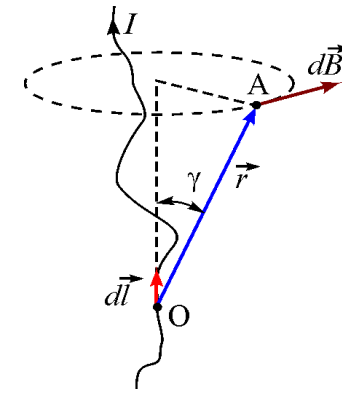


Рисунок 1 – До закону Біо-Савара-Лапласа. Точка О задає початок елемента струму $d\vec{l}$, який створює поле з індукцією $d\vec{B}$ в точці А. Вектор \vec{r} з'єднує точки О та А

2.2. Магнітне поле Землі

Планета Земля являє собою великий за розмірами постійний магніт (див. рис. 2а). Походження магнітного поля Землі на сьогодні до кінця не встановлено. Проте відомо, що воно формується як за рахунок внутрішніх процесів у надрах нашої планети, так і зовнішніми космічними джерелами. Перший чинник дає основний внесок і може бути поясненим у рамках гіпотези так званого **гідромагнітного динамо**. У спрощеному вигляді її суть полягає у такому. Припустимо, що вздовж осі обертання Землі діє постійне поле \vec{B}' . Розглянемо ядро Землі, що обертається (див. рис. 2б). За рахунок сили Лоренца вільні електрони, які містяться у провідному матеріалі ядра, будуть виходити на траєкторії з більшими радіусами. Відповідно їх концентрація зі збільшенням радіуса буде зростати, і їх заряд не буде компенсуватися зарядом іонів. Обертаючись, така система еквівалентна набору колових струмів, які будуть створювати сумарне магнітне поле \vec{B} вздовж \vec{B}' . Таким чином, магнітне поле буде підсилювати само себе

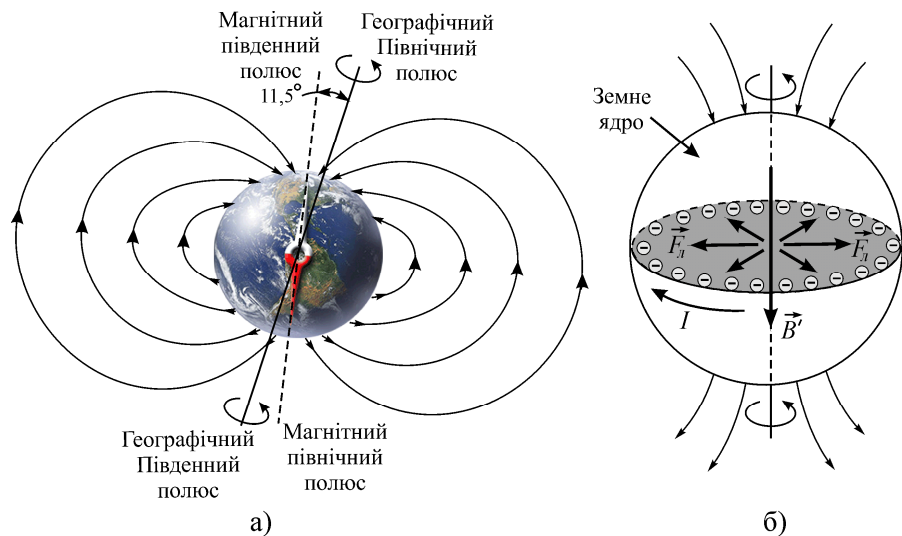


Рисунок 2 – Силкові лінії магнітного поля Землі (а). До пояснення гіпотези гідромагнітного динамо (б)

поки явище самоіндукції не зупинить подальше його зростання. На подібному ефекті працюють генератори постійного струму із самозбудженням. Початкове поле \vec{B}' може мати дуже малу величину і бути зумовленим гіромагнітним ефектом, який полягає у наявності магнітного поля вздовж осі обертання для будь-якого тіла, що обертається. Значний вплив на результуюче магнітне поле має той факт, що верхні шари земного ядра є рідкими, і їх рух є досить складним завдяки конвективним потокам та потокам, зумовленим відцентровими силами. Тому ще раз зазначимо, що вищенаведені пояснення є дуже спрощеними.

У результаті конфігурація силових ліній магнітного поля Землі подібна до поля, що створюється постійним смуговим магнітом (див. рис. 2а). Умовились, що ділянку магніту, в яку входять силові лінії, називають **південним полюсом**, а ділянку магніту, з якої виходять силові лінії, називають **північним полюсом** магніту. Лінії, проведені вздовж поверхні Землі, які з'єднують географічні полюси, називають **географічними меридіанами** (див. рис. 3а). Аналогічні лінії, які з'єднують магнітні полюси, називають **магнітними меридіанами**.

З рисунка 2 та рисунка 3а видно, що південний магнітний полюс Землі знаходиться біля північного географічного полюса і навпаки. Така особливість є основою для приблизного визначення напрямку на північ за допомогою компаса. Слід зазначити, що положення магнітних полюсів Землі не є фіксованим. На поточний момент південний магнітний полюс знаходиться за координатами 109° західної довготи та 79° північної широти, і він дрейфує зі швидкістю 40 м/добу з півночі Канади до Сибіру. З рисунка 2а також видно, що напрямок та модуль поля \vec{B} будуть різними для різних точок земної поверхні. Щоб визначити вектор у тривимірному просторі, досить задати три незалежні координати. Історично склалося, що магнітне поле Землі визначається за допомогою двох кутів та однієї лінійної величини. **Магнітним схиленням** α називається кут, який утворюють магнітний та географічний меридіани в даній точці земної поверхні (див. рис. 3б). **Магнітним нахиленням** β називається кут між горизонтальною площиною та вектором індукції поля Землі \vec{B} . **Горизонтальною складовою вектора індукції** поля Землі \vec{B}_0 називається проекція \vec{B} на горизонтальну площину в даній точці земної поверхні. Вищезазначені три величини називають **елементами земного магнетизму**.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Тангенс-гальванометр.
2. Реостат.
3. Міліамперметр.
4. Джерело живлення.
5. Інклінактор.
6. Глобус.
7. Нитка.
8. Транспортир.

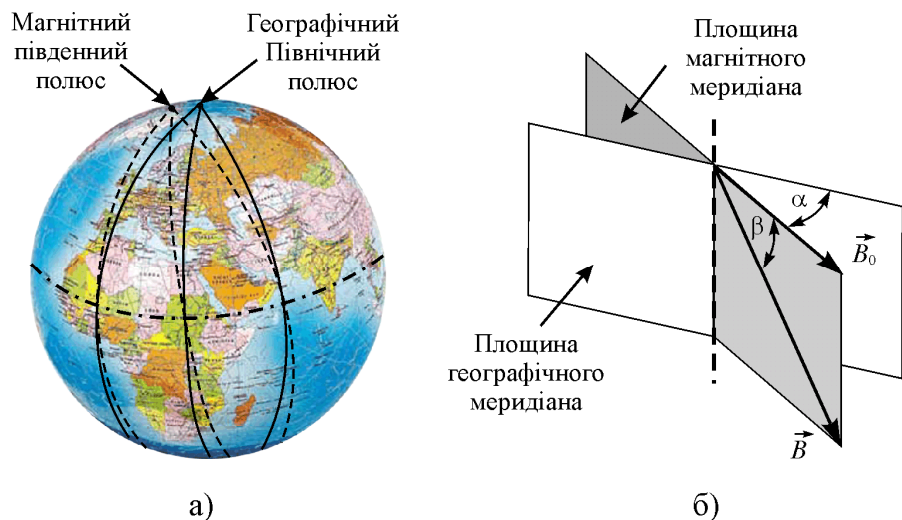


Рисунок 3 – Магнітні (пунктирна лінія) та географічні (суцільна лінія) меридіани. Штрих-пунктирна лінія – екватор (а). Елементи земного магнетизму. Пунктирна пряма – нормаль до Землі в точці знаходження спостерігача (б)

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для визначення горизонтальної складової індукції поля Землі \vec{B}_0 використовується **тангенс-гальванометр** або тангенс-бусоль (див. рис. 4), що підключається до джерела живлення згідно з принциповою схемою рисунка 5а. Прилад складається з немагнітного кільця радіусом R , на яке намотаний тонкий провідник. Кількість витків – N . У центрі кільця розміщено магнітну стрілку у такий спосіб, що вона може обертатися у площині, перпендикулярній до площини витків. Тангенс-гальванометр встановлюють так, що площина витків є вертикальною. Тоді магнітна стрілка, вільно обертаючись у горизонтальній площині, встановлюється вздовж горизонтальної складової вектора індукції магнітного поля.

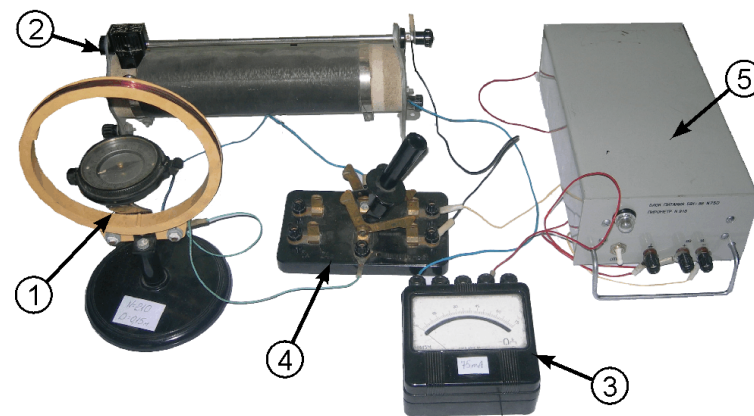


Рисунок 4 – Установа для визначення горизонтальної складової поля Землі: 1 – тангенс-гальванометр; 2 – реостат; 3 – міліамперметр; 4 – перемикач напрямку струму через тангенс-гальванометр; 5 – блок живлення

За відсутності струму у витках магнітна стрілка буде спрямована вздовж шуканої горизонтальної складової \vec{B}_0 . Після ввімкнення струму I стрілка буде спрямована вздовж результуючого поля $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$ (див. рисунок 5б, в)

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 NI}{2R} \vec{n}, \quad (2)$$

де \vec{B}_1 – індукція поля системи колових струмів у їх центрі; \vec{n} – нормаль до витків, що визначається правилом правого гвинта за напрямком струму. Вираз (2) був одержаний з (1) інтегруванням вздовж кола. Якщо сумістити площину витків з площиною магнітного меридіана, то вектори \vec{B}_0 і \vec{B}_1 утворять прямокутник (див. рисунок 5в), з якого можна знайти модуль \vec{B}_0 у наступному вигляді:

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2R \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

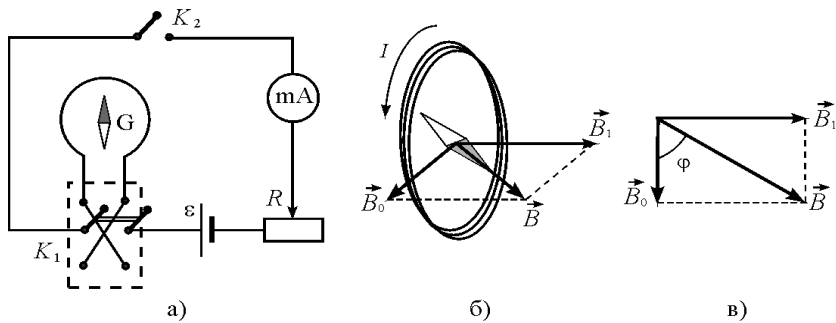


Рисунок 5 – Схема ввімкнення тангенс-гальванометра (а); магнітна стрілка під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі та поля витків зі струмом (б); сумарне поле в центрі колових витків тангенс-гальванометра (в)

Величину магнітного нахилення β визначають за допомогою **інклінометра** (див. рисунок б). Даний прилад являє собою магнітну стрілку, вісь обертання якої проходить через геометричний центр перпендикулярно до її площини. Вісь обертання стрілки, в свою чергу, може обертатися у вертикальній площині за допомогою горизонтального вала, закріпленого у опорі. При цьому разом зі стрілкою буде повертатися і площина проградуєваної шкали.

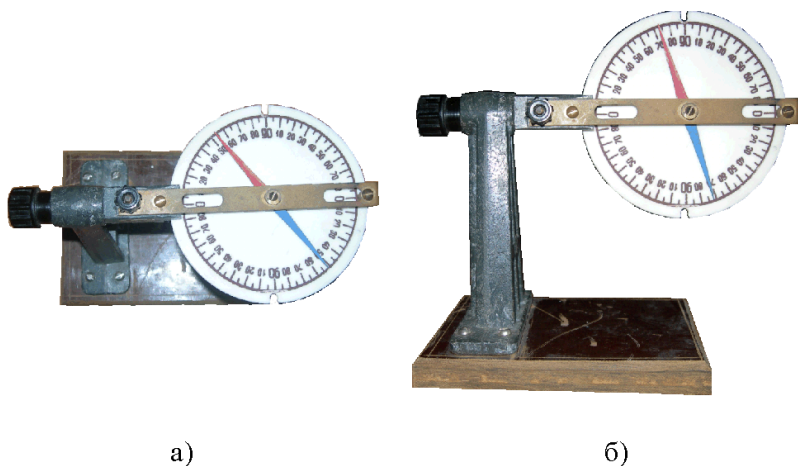


Рисунок 6 – Інклінометр: горизонтальне положення стрілки, вид згори (а); вертикальне положення стрілки, вид збоку (б)

Щоб виміряти нахилення β , потрібно спочатку розмістити стрілку інклінометра у площині магнітного меридіана так, щоб її вісь була вертикальною. Потім поворотом горизонтального вала на 90° слід розмістити магнітну стрілку у вертикальній площині. Кут її нахилу до горизонту і буде являти собою магнітне нахилення β .

Магнітне схилення α для географічного розташування міста Сум ($50^\circ 55'$ північної широти $34^\circ 45'$ східної довготи) визначається як кут між напрямком на географічний Північний полюс та напрямком на південний магнітний полюс (79° північної широти та 109° західної довготи).

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з будовою установки та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Розмістіть тангенс-гальванометр таким чином, щоб площина витків збігалася з площиною магнітного меридіана Землі.
3. З'єднайте прилад із джерелом живлення згідно зі схемою рисунка 5а.
4. Перепишіть значення діаметра витків $D = 2R$ та кількість витків N тангенс-гальванометра у зошит.
5. Занесіть до таблиці 1 похибки вимірювання кута за допомогою компаса $\Delta\varphi$ та вимірювання струму амперметром

$$\Delta I = \frac{\delta I \cdot I_{\max}}{100}, \quad (4)$$

де δI – клас точності амперметра, зазначений на корпусі або на шкалі приладу; I_{\max} – його верхня межа вимірювання.

6. Одержіть від викладача 5 значень сили струму у витках, для яких будуть проводитися вимірювання.
7. За допомогою реостата встановіть перше задане значення сили струму у витках тангенс-гальванометра. За встановленим положенням магнітної стрілки визначте кут φ_1 , який становить індукція сумарного поля \vec{B} з площиною магнітного меридіана. Результат занесіть до таблиці 1.

Таблиця 1 – До визначення горизонтальної складової поля Землі

№ досліджу	$I, \text{мА}$	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2, ^\circ$	$B_0, \text{Тл}$	$ \langle B_0 \rangle - B_{0i} , \text{Тл}$
1						
2						
...						
$N-1$						
N						

$\Delta\varphi = \dots$	$\Delta I = \dots$	$\Delta R = 0,5 \text{ см}$	$\langle B_0 \rangle = \dots$
$\max(\Delta_1 B_0) = \dots$	$\Delta_2 B_0 = \dots$		$\Delta B_0 = \dots$

- Перемикачем K_1 змініть напрямок струму у витках, не змінюючи його величини. Визначте кут φ_2 і занесіть його до таблиці 1.
- Повторіть наведені у пунктах 7 та 8 операції для наступних чотирьох значень струму. Результати занесіть до таблиці 1.
- Відімкніть установку від електричної мережі.
- Розмістіть інклінометр таким чином, щоб північний полюс його стрілки вказував на 0.
- Поверніть вісь вала на 90° та виміряйте кут β . Результат занесіть до таблиці 2.

Таблиця 2 – До визначення магнітного нахилення β та схилення α

№ досліджу	$\beta, ^\circ$	$ \langle \beta \rangle - \beta_i , ^\circ$	$\Delta_1 \beta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$ \langle \alpha \rangle - \alpha_i , ^\circ$	$\Delta_1 \alpha, ^\circ$
1						
2						
...						
$N-1$			$\Delta_2 \beta, ^\circ$			$\Delta_2 \alpha, ^\circ$
N						
середнє $\langle \dots \rangle$		–			–	
–	$\Delta\beta =$			$\Delta\alpha =$		

- Повторіть дії пунктів 11 та 12 ще чотири рази.
- За допомогою глобуса, нитки та транспортира визначте магнітне схилення α для міста Сум. Для цього візьміть шматок нитки, складіть удвоє та зафіксуйте його середину в місці знаходження м. Сум ($50^\circ 55'$ північної широти, $34^\circ 45'$ східної

довготи). Два вільних кінці зафіксуйте відповідно на північному географічному полюсі та південному магнітному полюсі (79° північної широти та 109° західної довготи).

- Транспортиром виміряйте п'ять разів величину кута α . Результат занесіть до таблиці 2.
- Занесіть інструментальну похибку $\Delta_1 \beta$ інклінометра та $\Delta_1 \alpha$ транспортира до таблиці 2.
- Визначте систематичну складову абсолютної похибки $\Delta_1 B_0$ непрямого вимірювання величини B_0 для кожного вимірювання за формулою

$$\Delta_1 B_{0i} = B_{0i} \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta \varphi}{\sin \varphi_i}\right)^2}. \quad (5)$$

У подальшому буде використовуватися максимальне значення $\max(\Delta_1 B_0)$ з усіх $\Delta_1 B_{0i}$. Результати запишіть у таблицю 1.

- Визначте випадкову складову абсолютної похибки $\Delta_2 B_0$ у відповідності до виразу

$$\Delta_2 B_0 = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle B_0 \rangle - B_{0i})^2} \quad (N=5). \quad (6)$$

Результати запишіть у таблицю 1.

- Визначте абсолютну похибку визначення величини горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі згідно з виразом

$$\Delta B_0 = \sqrt{[\max(\Delta_1 B_0)]^2 + (\Delta_2 B_0)^2}. \quad (7)$$

- Визначте випадкові складові абсолютних похибок визначення магнітного нахилення $\Delta_2 \beta$ та магнітного схилення $\Delta_2 \alpha$ у відповідності до виразів

$$\Delta_2 \beta = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle \beta \rangle - \beta_i)^2} \quad (N=5), \quad (8)$$

$$\Delta_2\alpha = 3\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(\langle\alpha\rangle - \alpha_i)^2} \quad (N = 5). \quad (9)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

21. Визначте абсолютні похибки визначення величин магнітного нахилення та магнітного схилення згідно з виразами

$$\Delta\beta = \sqrt{(\Delta_1\beta)^2 + (\Delta_2\beta)^2}, \quad (1)$$

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\Delta_1\alpha)^2 + (\Delta_2\alpha)^2}. \quad (10)$$

Результати запишіть у таблицю 2.

22. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Що називають магнітним полем?
2. Записати закон Біо-Савара-Лапласа, пояснити усі величини, які він містить. Пояснити даний закон за допомогою рисунка.
3. Перелічити елементи земного магнетизму та дати їм визначення.
4. Пояснити будову тангенс-гальванометра та інклінометра.
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Нарисувати силові лінії магнітного поля Землі, показати на рисунку географічні та магнітні полюси.
7. Пояснити принцип дії тангенс-гальванометра та інклінометра.
8. Одержати формулу (2), користуючись законом Біо-Савара-Лапласа (1).
9. Як за допомогою магнітної стрілки можна визначити положення площини географічного меридіана?
10. Пояснити природу похибок вимірювань у даній лабораторній роботі.

На оцінку “відмінно”

11. Користуючись законом Біо-Савара-Лапласа, одержати вираз для індукції поля нескінченного прямого струму.
12. Пояснити, чому магнітна стрілка розміщується вздовж силових ліній магнітного поля.
13. Пояснити, як буде себе поводити контур зі струмом у магнітному полі.
14. Одержати робочу формулу для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.
15. Одержати формулу для визначення інструментальної похибки Δ_2B_0 непрямого вимірювання величини B_0 .

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 2. Електрика. Магнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Оптика. – Суми, 2003.
3. Бушок Г.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
6. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш. шк., 1991.
7. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: Физматлит, 2001.

Лабораторна робота 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА

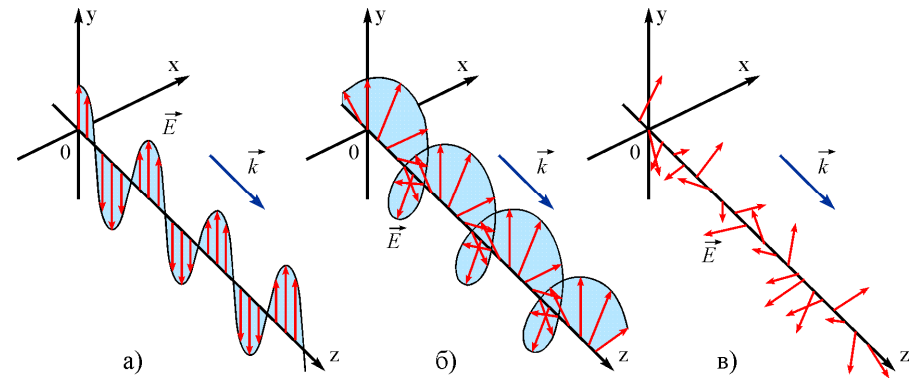
1. МЕТА РОБОТИ

1. Засвоїти методику роботи з поляриметром.
2. Визначити концентрацію цукрового розчину за допомогою поляриметра.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Явище поляризації

Світлом у вузькому розумінні називають сукупність електромагнітних хвиль, частоти яких лежать у межах сприйняття людського ока: $\nu = 4,3 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц, що відповідає довжинам хвиль у вакуумі від $\lambda = 400$ до 700 нм. У свою чергу, під електромагнітною хвилею розуміють процес поширення взаємно перпендикулярних коливань електричної \vec{E} та магнітної \vec{H} компонент єдиного електромагнітного поля. При цьому як \vec{E} , так і \vec{H} перпендикулярні до напрямку поширення хвилі, що задається хвильовим вектором \vec{k} . Таким чином, електромагнітна теорія визначає лише відносну орієнтацію зазначених векторів, проте жодним чином не регламентує безпосереднього положення \vec{E} та \vec{H} для поточного моменту часу. Для того щоб однозначно задати хвильовий процес, потрібно вказати часову залежність положення площини коливань \vec{E} або **тип поляризації**. У разі, коли вектор \vec{E} виконує коливання весь час в одній площині, світло називають **плоскополяризованим**. Якщо площина коливань обертається рівномірно навколо напрямку поширення хвилі, говорять, що світло є **поляризованим по колу**, або **циркулярно поляризованим** (див. рис. 1). Коли під час обертання площини коливань змінюється модуль вектора \vec{E} таким чином, що його кінець описує еліпс, – світло є **поляризованим по еліпсу**, або **еліптично поляризованим**. Узагальнюючи наведені визначення, можна зробити висновок, що **поляризованим** називають таке світло, для якого коливання вектора \vec{E} певним чином



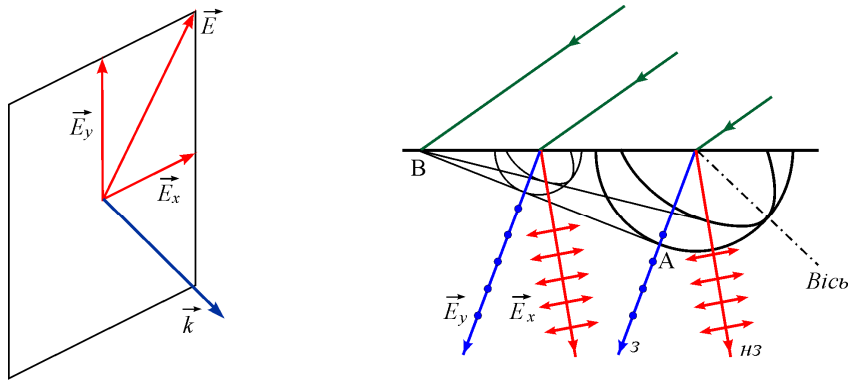
Рисунк 1 – Схематичні зображення: плоскополяризованого (а); поляризованого по колу (б); неполяризованого світла (в)

упорядковані. У протилежному випадку говорять, що світло є **природним** або **неполяризованим**.

У переважній більшості випадків доводиться мати справу саме з природним світлом. Будь-яке макроскопічне джерело електромагнітного випромінювання складається з великої кількості безпосередніх випромінювачів – атомів. Незважаючи на те, що атоми одного виду випромінюють на одних і тих самих довжинах хвиль, за рахунок різної геометрії їх розміщення та незгодженості моментів випромінювання результуючі коливання вектора \vec{E} мають хаотичний характер для будь-якого світлового променя. Великий інтерес для багатьох дослідницьких та промислових потреб має поляризоване світло. Тому актуальним є одержання поляризованого світла з неполяризованого. Прилади, які перетворюють природне світло на плоскополяризоване, називають **поляризаторами**.

2.2. Подвійне променезаломлення

Вектор \vec{E} у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, можна представити у вигляді двох взаємно перпендикулярних компонент \vec{E}_x та \vec{E}_y (див. рис. 2а). Фактично, для того щоб поляризувати природне світло, потрібно розділити промінь на дві частини, кожна з яких буде носієм однієї з двох компонент. Обидві частини являтимуть собою промені плоско-



а)

б)

Рисунок 2 – Схематичні зображення: розкладання вектора \vec{E} на компоненти (а); хід звичайного (з) та незвичайного (нз) променів в одновісному кристалі (б)

поляризованого світла, що готові до використання. На практиці реалізувати таку ситуацію можливо шляхом пропускання світла через деякі анізотропні кристали. Анізотропія електричних властивостей, зумовлена кристалічною будовою, призводить до того, що умови подальшого поширення коливань для взаємно перпендикулярних компонент \vec{E}_x та \vec{E}_y є різними. Це проявляється в різних значеннях показників заломлення для хвиль-носіїв \vec{E}_x та \vec{E}_y і, як наслідок, у різних напрямках поширення для таких хвиль.

Пояснимо дане явище на прикладі одновісного кристала. **Одновісним** називають кристал, який має лише одну оптичну вісь. **Оптичною віссю** називають напрямок у кристалі, вздовж якого показник заломлення не залежить від напрямку коливань \vec{E} . Тобто під час поширення вздовж оптичної осі природне світло не буде поділятися на дві плоскополяризовані частини. Будь-яку площину, що проходить через оптичну вісь, називають **головною площиною кристала**. Нехай промінь природного світла падає під певним кутом на кристал. Користуючись довільністю поділу вектора \vec{E} на компоненти \vec{E}_x та \vec{E}_y , будемо вважати, що \vec{E}_x лежить у головній площині, а \vec{E}_y перпендикулярна до неї. Одновісний кристал має два значення відносної

діелектричної проникності: ε_{\perp} – у напрямку, перпендикулярному до оптичної осі, та ε_{\parallel} – у напрямку, паралельному оптичній осі. Швидкість поширення хвилі, що відповідає \vec{E}_y , визначається показником заломлення

$$n_0 = \sqrt{\varepsilon_{\perp}} \quad (1)$$

і за умови перпендикулярності \vec{E}_y до оптичної осі буде однаковою незалежно від напрямку коливань. Згідно з принципом Гюйгенса кожна точка, до якої дійшла хвиля, сама стає джерелом вторинних хвиль. Фронти вторинних хвиль для променя \vec{E}_y являтимуть собою сфери (див. рисунок 2б). Наступний фронт самої хвилі буде обвідною поверхнею фронтів вторинних хвиль (лінія AB на рисунку 2б). Напрямок самого променя буде визначатися згідно зі стандартним законом заломлення

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_0. \quad (2)$$

Тому такий промінь називають **звичайним**.

У той самий час для хвилі-носія \vec{E}_x ситуація буде іншою. Залежно від напрямку її поширення діелектрична проникність буде змінюватися від ε_{\perp} до ε_{\parallel} , і тому швидкість поширення такої хвилі залежатиме від напрямку. Фронти вторинних хвиль матимуть форму еліпсоїдів обертання, а хвильовий фронт самої хвилі-носія \vec{E}_x не збігатиметься з AB (див. рисунок 2б). Це означає, що дві плоскополяризовані хвилі із взаємно перпендикулярними напрямками коливань напруженості електричного поля будуть поширюватися у різних напрямках. Другий промінь, який не підкоряється закону заломлення, називають **незвичайним**. Саме явище наявності двох заломлених променів в анізотропному кристалі називають **подвійним променезаломленням**.

2.3. Обертання площини поляризації

З історичних причин **площиною поляризації** називають площину, перпендикулярну до площини коливань вектора \vec{E} . Оскільки ці площини однозначним чином пов'язані одна з одною, в подальшому будемо користуватися також і терміном “площина поляризації”. Встановлено, що деякі речовини здатні обертати площину коливань вектора \vec{E} . Такі речовини називають оптично активними. До них відносять тверді тіла – кварц, кіновар (сульфід ртуті II); чисті рідини – нікотин, скипидар; а також розчини оптично активних речовин у неактивних розчинниках, наприклад, водні розчини цукру та винної кислоти. Елементарна теорія обертання площини коливань була побудована Френелем. В її основу покладене припущення, що оптично активні речовини мають особливий тип подвійного променезаломлення, який полягає в розкладанні плоскополяризованої світлової хвилі на дві хвилі, кожна з яких поляризована по колу. При цьому для однієї з них напрямок обертання вектора напруженості електричного поля буде збігатися з напрямком руху годинникової стрілки (права поляризація), для іншої – буде протилежним (ліва поляризація). Амплітуди поляризованих по колу хвиль однакові й становлять половину амплітуди початкової хвилі $E_1 = E_2 = E/2$. У разі, коли швидкість їх поширення однакова, в будь-який момент часу їх сума зображатиме коливання вектора \vec{E} в одній площині (див. рис. 3а, б).

Іншою буде ситуація, якщо швидкості їх поширення не збігатимуться. Це є можливим завдяки різним показникам заломлення n_n для правополяризованої та n_l для лівополяризованої хвиль. Синхронність обертання \vec{E}_1 та \vec{E}_2 порушується завдяки тому, що довжини двох поляризованих по колу хвиль стають різними. За час одного оберту вектора напруженості хвиля проходить відстань, що дорівнює її довжині. Тому внаслідок проходження через шар оптично активного середовища довжиною l кути повороту хвиль \vec{E}_1 та \vec{E}_2 будуть відрізнятися на $\Delta\Psi = \Psi_n - \Psi_l$. У результаті площина поляризації змінить свою орієнтацію на кут $\alpha = \Delta\Psi/2$ (див. рисунок 3в). Оптична різниця ходу двох хвиль

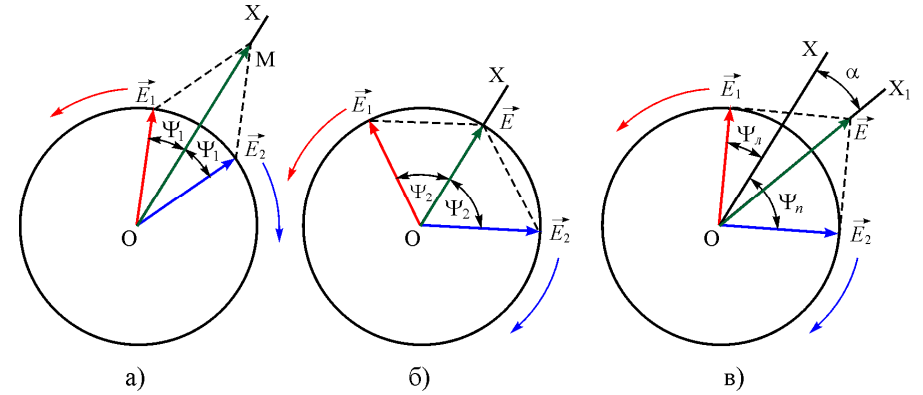


Рисунок 3 – Подання плоскополяризованої хвилі як суперпозиції поляризованих по колу ліво- та правополяризованої хвиль. Однакова швидкість поширення ліво- та правополяризованої хвиль (а, б); різні швидкості (в)

$$\Delta = l(n_l - n_n) \quad (3)$$

пов'язана з різницею фаз коливань на виході з оптично активної речовини як

$$\Delta\Psi = \frac{\omega}{c} l \cdot n_l - \frac{\omega}{c} l \cdot n_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (4)$$

де λ_0 – довжина хвилі у вакуумі.

Таким чином, кут повороту площини поляризації буде описуватися залежністю

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda_0} l(n_l - n_n). \quad (5)$$

Для розчинів оптично активної речовини з концентрацією C для монохроматичного світла (5) переходить у відомий закон Біо

$$\alpha = [\alpha]Cl, \quad (6)$$

де $[\alpha]$ – питома обертаність, що залежить від типу речовини.

Застосування закону Біо (6) дозволяє визначати концентрацію активної речовини в розчині шляхом вимірювання кута обе-

ртання площини коливань α . Такий метод називають **поляриметричним** методом кількісного аналізу. Він є одночасно точнішим і швидшим за інші методи, тому має широке застосування як у лабораторних дослідженнях, так і в промисловості.

3. КОМПЛЕКТАЦІЯ РОБОТИ

1. Поляриметр.
2. Кювета з розчином відомої концентрації.
3. Дві кювети з розчином невідомої концентрації.

4. ОПИС УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Значна поширеність поляриметричного методу аналізу зумовила наявність великого набору вимірювальних пристроїв – **поляриметрів**, призначених для спостереження за обертанням площини коливань вектора \vec{E} у світловій хвилі. У найбільш типовому виконанні схема поляриметра має вигляд, як показано на рисунку 4а. Як правило, як поляризатори використовують так звані **призми Ніколя** (див. рисунок 4б). Кожна така призма являє собою кристал ісландського шпату (різновид кальциту, CaCO_3), розрізаний навпіл під певним кутом, як показано на рисунку 4б. Дві половини кристала в подальшому склеюються за допомогою канадського бальзаму (екстракт ефірних олій та смол з рослин *Abies balsamea* – пихти бальзамічної, або *Abies canadensis* – канадської ялини). Склад речовин та геометрія виробу підібрані таким чином, що з утворених унаслідок подвійного променезаломлення двох плоскополяризованих променів один (незвичайний) вийде з призми, не змінюючи напрямку. Водночас звичайний промінь унаслідок повного відбивання на межі поділу ісландський шпат – канадський бальзам буде виходити через іншу грань призми і поглинатиметься поляриметром.

Від джерела S світло проходить через систему лінз та світлофільтр F , а потім потрапляє в поляризатор P та поляризатор P' .

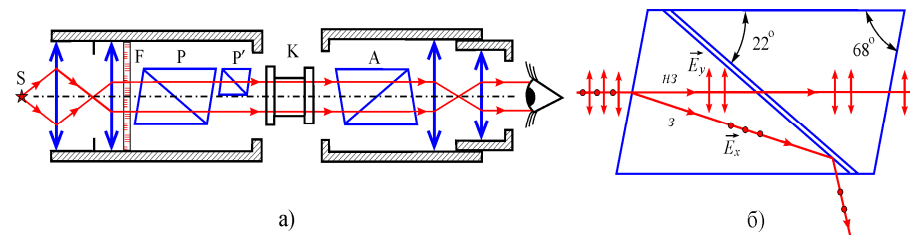


Рисунок 4 – Схема типового поляриметра (а); вид призми Ніколя та схема ходу світла через неї (б)

Останній закриває одну половину поляризатора P . Площини пропускання цих двох поляризаторів утворюють невеликий кут 2β (див. рис. 5). За відсутності оптично активної речовини в кюветі K світло безперешкодно потрапляє на аналізатор A . **Аналізатором** називають поляризатор, призначений для визначення кута повороту між власною площиною пропускання та площиною коливань світла, що на нього потрапляє. Якщо площина пропускання аналізатора утворює однакові кути з площинами коливань світла, що пройшло через поляризатори P та P' , то освітленість правої та лівої половин поля зору буде однаковою (див. рисунок 5б) внаслідок закону Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \gamma . \quad (7)$$

Тут I – інтенсивність світла, що вийшло з аналізатора; I_0 – початкова інтенсивність світла; γ – кут між площиною пропускання аналізатора та площиною коливань падаючого світла. У разі, коли площина пропускання аналізатора утворює різні кути з площинами коливань світла, освітленості обох половин будуть різними (див. рисунок 5а, в). При цьому роздільна здатність такого методу є дуже високою внаслідок великої чутливості людського ока.

Наявність оптично активної речовини в кюветі K зумовить обертання площин коливань \vec{E} світлових хвиль від обох поляризаторів на однаковий кут α . Щоб відновити зображення в окулярі, характерне для випадку відсутності оптично активної речовини, потрібно повернути аналізатор на той самий кут α . Даний факт

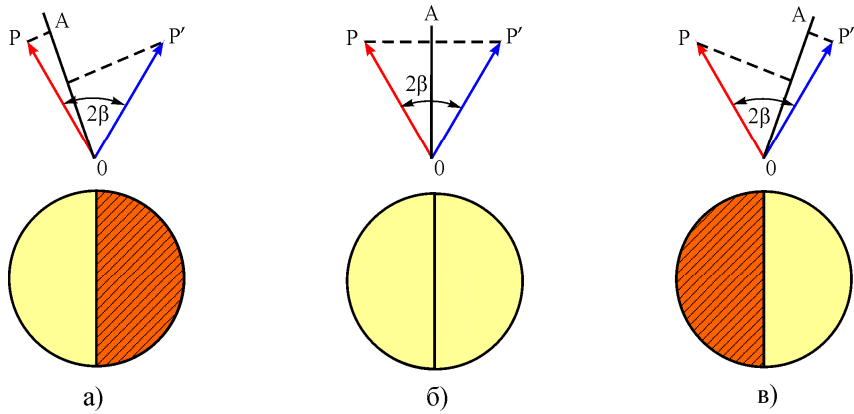


Рисунок 5 – Поле зору в окулярі поляриметра для різних кутів між площинами пропускання аналізатора та поляризаторів

є основою для вимірювання концентрації розчинів таких речовин. Нехай маємо кювету відомої довжини l_1 з розчином відомої концентрації C_1 . Згідно із законом Біо (6) кут повороту площини коливань для неї становить $\alpha_1 = [\alpha] \cdot C_1 \cdot l_1$. Даний кут можна виміряти за допомогою поляриметра, як і кут $\alpha_2 = [\alpha] \cdot C_2 \cdot l_2$ для кювети довжиною l_2 з розчином невідомої концентрації C_2 . При цьому велика точність вимірювання кутів забезпечується наявністю шкали ноніуса (див. рисунок 6), яка знаходиться в полі зору другого окуляра поляриметра. Виключенням питомого обертання $[\alpha]$ одержимо

$$C_2 = C_1 \frac{\alpha_2 l_1}{\alpha_1 l_2}. \quad (8)$$

Зауважимо, що досить часто конструкція поляриметра передбачає нерухоме положення аналізатора, а обертається площина коливань вектора \vec{E} за допомогою спеціального компенсатора.

Зовнішній вигляд лабораторної установки показаний на рисунку 7.

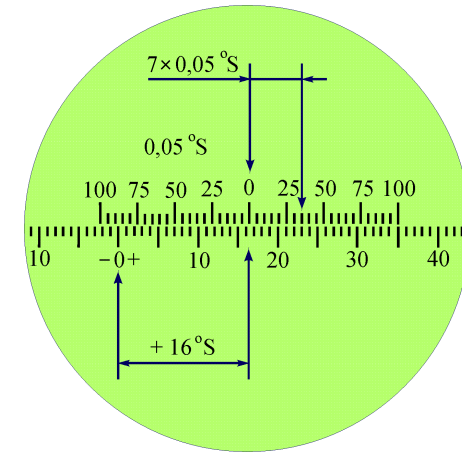


Рисунок 6 – Вигляд у вимірювальному окулярі

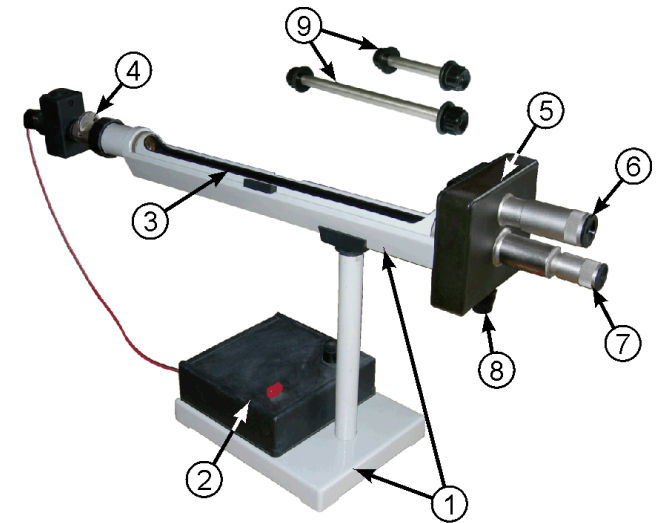


Рисунок 7 – Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – поляриметр; 2 – блок живлення поляриметра; 3 – камера; 4 – освітлювальний вузол та поляризатор; 5 – вимірювальний вузол; 6 – окуляр шкали ноніуса; 7 – окуляр; 8 – ручка компенсатора; 9 – кювети для рідини

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно ознайомтеся з установкою та попередніми розділами методичних вказівок до даної лабораторної роботи.
2. Підключіть поляриметр 1 до мережі живлення. Встановіть чітке зображення ноніуса в окулярі 6 та зображення межі між по-різному освітленими частинами поля зору в окулярі 7.
3. Виміряйте значення нульового відліку α_0 . Для цього обертанням ручки компенсатора 8 досягніть однакового затемненого кольору обох половин зору в окулярі 7. Під час обертання ручки 8 освітленість двох частин поля зору в окулярі 7 змінюється. Кювета 9 з розчином при цьому має бути відсутньою в поляриметрі.
4. Повторіть дані вимірювання ще 4 рази, а результати занесіть до таблиці 1.
5. Проведіть аналогічні серії вимірювань для кювети з розчином еталонної концентрації та заповніть колонку α_1 таблиці 1.
6. Запишіть довжини кювет та похибки їх вимірювання у таблицю 1.
7. Проведіть аналогічні серії вимірювань для кювет з розчином невідомої концентрації та заповніть колонки α_2 та α_3 таблиці 1.

Таблиця 1 – Вимірювання концентрації цукрового розчину

№	Кути				Похибки				$l_1 =$	$\Delta l_1 =$
	α_0	α_1	α_2	α_3	$\Delta \alpha_0$	$\Delta \alpha_1$	$\Delta \alpha_2$	$\Delta \alpha_3$		
1										
2									$l_2 =$	$\Delta l_2 =$
3										
4									$l_3 =$	$\Delta l_3 =$
5										
$\langle \dots \rangle$										
$\Delta_1 \alpha = 0,05^\circ \text{S}$	$C_1 \pm \Delta C_1 = \dots$				$C_2 \pm \Delta C_2 = \dots$				$C_3 \pm \Delta C_3 = \dots$	

8. Знайдіть середні значення кутів α_i , результат занесіть до таблиці 1.

9. Розрахуйте похибки визначення кутів у відповідності до виразу

$$\Delta \alpha_i = \sqrt{(\Delta_1 \alpha)^2 + (\Delta_2 \alpha_i)^2}, \quad (9)$$

де $\Delta_1 \alpha$ – інструментальна похибка, а випадкові складові абсолютних похибок $\Delta_2 \alpha_i$ визначаються за правилом «трьох сигм»

$$\Delta_2 \alpha_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\langle \alpha_i \rangle - \alpha_{ij})^2} \quad (N=5). \quad (10)$$

10. Визначте невідомі концентрації розчинів згідно з даними таблиці 1 з урахуванням поправки на зміщення нульової позначки

$$C_i = C_1 \frac{\langle \alpha_i \rangle - \langle \alpha_0 \rangle}{\langle \alpha_1 \rangle - \langle \alpha_0 \rangle} \cdot \frac{l_1}{l_i} \quad (i=2, 3). \quad (11)$$

11. Оцініть похибки з урахуванням як систематичної, так і випадкової складових за формулою

$$\Delta C_i = C_i \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha_i}{\langle \alpha_i \rangle - \langle \alpha_0 \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha_1}{\langle \alpha_1 \rangle - \langle \alpha_0 \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l_1}{l_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l_i}{l_i} \right)^2}. \quad (12)$$

12. Зробіть висновки до лабораторної роботи.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

На оцінку “задовільно”

1. Яке світло називають поляризованим? Перелічити типи поляризації.
2. Які речовини називають оптично активними?
3. Як за допомогою поляриметра можна виміряти концентрацію цукрового розчину?
4. Що називають площиною поляризації?
5. Викласти послідовність виконання лабораторної роботи.

На оцінку “добре”

6. Навести приклади застосування поляриметричного аналізу. У чому його перевага над іншими методами?
7. Пояснити загальну будову та принцип роботи поляриметра.
8. Що таке призма Ніколя? Яка її роль у поляриметрі?
9. Що таке звичайний та незвичайний промені?
10. Одержати робочу формулу для визначення невідомої концентрації цукрового розчину.

На оцінку “відмінно”

11. Пояснити, чому відбувається подвійне променезаломлення?
12. У чому сутність явища обертання площини коливань вектора напруженості у світловій хвилі згідно з теорією Френеля?
13. Сформулювати та обґрунтувати закон Малюса.
14. Показати за допомогою закону Малюса, що природне світло під час проходження через поляризатор втрачає половину своєї інтенсивності.
15. Класифікувати похибки, що виникають у процесі вимірювань, та викласти методику їх урахування.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Савельев И.В. Курс физики. Том 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Наука, 1989.
2. Черняк Л.М. Лекції із загальної фізики: навчальний посібник: у 3 книгах. Книга 3. Фізика атома, твердого тіла і ядра. – Суми: Алан ЕКС, 2003.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики: у 2 книгах. Книга 2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Либідь, 2001
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 1990.
5. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник по физике. Том 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2001.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. – М.: Наука, 1980.

Навчальне видання

Лютий Тарас Володимирович,
Денисова Олена Станіславівна

Лабораторний практикум з фізики

Навчальний посібник

Укладач	Т. В. Лютий
Дизайн обкладинки	Т. В. Лютого
Редактор	Н. В. Лисогуб
Комп'ютерний набір та верстання	Т. В. Лютого

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Р.-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.