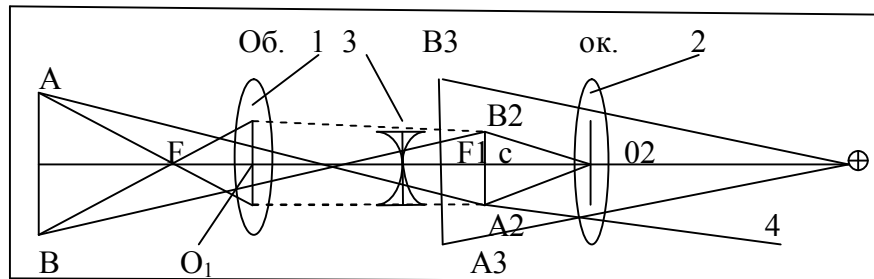


Р.М. Літнарівич

## ФІЗИКА З ОСНОВАМИ ГЕОФІЗИКИ

### Лабораторний практикум

#### Частина 2



Рівне, 2008

Рецензенти: Боровий В.О., доктор технічних наук, професор  
Бурачек В.Г., доктор технічних наук, професор  
Парняков С.С., доктор технічних наук, професор

Відповідальний за випуск: ДЖУНЬ Й.В., доктор фізико-  
математичних наук, професор

В лабораторному практикумі розроблено сімнадцять лабораторних робіт, які проводяться в курсі фізики з основами геофізики. На ряду з традиційними лабораторними роботами, які виконують студенти вищих навчальних закладів напрямку наук про Землю, пропонуються студентам ряд робіт пошукового характеру, формуючи у майбутніх географів творчий підхід, необхідний для розкриття таланту майбутнього педагога – дослідника.  
Для студентів і аспірантів напрямку наук про Землю

© ЛІТНАРОВИЧ Р.М.

## З М І С Т

	<b>Стор.</b>
Передмова .....	4
Лабораторна робота №9. Дослідження магнітних моментів при взаємодії двох магнітів і поведінки магнітної стрілки в однорідному магнітному полі.....	5
Лабораторна робота №10. Дослідження поведінки магнітної стрілки в полі соленоїдів.....	9
Лабораторна робота №11. Дослідження взаємного розташування магнітних стрілок в положенні нейтралізації магнітних полів.....	17
Лабораторна робота №12. Дослідження густини струму провідності в атмосфері земної кулі.....	21
Лабораторна робота №13. Дослідження середньої провідності земної атмосфери і густини заряду Землі.....	25
Лабораторна робота №14. Розробка методики визначення магнітної індукції поля при коливанні магніта у вертикальному магнітному полі.....	29
Лабораторна робота №15. Дослідження положення магнітної стрілки в електромагнітному полі струму.....	34
Лабораторна робота №16. Встановлення збільшення зорової труби та оптичної сили тонких збиральних лінз..	37
Лабораторна робота №17. Встановлення поля зору труби	43
Література .....	46

## ПЕРЕДМОВА

У лабораторному практикумі розглянуто лабораторні роботи по курсу «Фізика з основами геофізики», підібраних відповідно до навчальної програми.

Розділ «Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка» представлений лабораторними роботами №1-6.

Розділ «Основи електродинаміки» представлений лабораторними роботами №7-15.

Розділ «Оптика» представлений лабораторними роботами №16,17.

Основну увагу приділено принципам і методам вивчення фізичних явищ, техніці виконання лабораторних робіт, методам обробки результатів фізичного експерименту.

Поряд з традиційними лабораторними роботами, які виконують студенти вищих навчальних закладів напрямку наук про Землю, пропонуються студентам ряд робіт пошукового характеру, формуючи у майбутніх географів творчий підхід, необхідний для розкриття таланту майбутнього педагога-дослідника.

Для студентів і аспірантів напрямку наук про Землю.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

**Тема:** Дослідження магнітних моментів при взаємодії двох магнітів і поведінки магнітної стрілки в однорідному магнітному полі

**Ціль роботи:** Вивести формулу магнітних моментів при взаємодії двох магнітів і дослідити поведінку магнітної стрілки в однорідному магнітному полі.

**Мета роботи:** Провести пошукову роботу і встановити необхідні параметри.

**Прилади:** Вихідні параметри, калькулятор, два прямих магніти, магнітна стрілка підвішена на пружній нитці.

**9.1.** розглянемо два однакових прямих магніти, які розташовані на одній прямій і повернуті один до одного різнойменними полюсами; віддаль між ними  $d = 2m$ , а їх довжина  $l \ll d$ .

Необхідно визначити магнітний момент кожного з них, якщо вони притягнуться з силою  $F = 10^{-4}$  Н.

На магніт, поміщений в магнітне поле, паралельно цьому полю діє сила  $F$

$$F = P_m \frac{dB}{dX}, \quad (9.1.)$$

де  $P_m$  – магнітний момент замкнутого плоского контура зі струмом  $I$

$$P_m = I \cdot S, \quad (9.2.)$$

$\frac{dB}{dX}$  - зміна вектора магнітної індукції вздовж  $P_m$  на одиницю довжини.

Магнітне поле колового струму, що створюється в будь-якій точці осі струму, яка знаходиться на віддалі  $d$ , набагато більшої радіуса витка, за допомогою знаку Біо-Савара-Лапласа виражається так

$$B = \frac{\mu\mu_0 IS}{2\pi X^3}, \quad (9.3.)$$

де  $S$ - площа, обтікаєма витком.

Це магнітне поле можна розглядати як поле магнітного диполя, магнітний момент якого виражається формулою (9.2.). Таким магнітним диполем являється полюсовий магніт, якщо тільки довжина його достойно мала.

Диференціюючи формулу (9.3.) по  $X$ , отримає

$$dB = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\mu\mu_0 P_m}{\pi} \cdot \frac{3X^2 dX}{(X^3)^2}. \quad (9.4.)$$

Представимо (9.4) у вигляді

$$\frac{dB}{dX} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu\mu_0 P_m}{\pi X^4}. \quad (9.5)$$

Тоді, формула (9.1) буде

$$F = \frac{3}{2} P_m^2 \frac{\mu\mu_0}{\pi d^4}. \quad (9.6)$$

Звідси

$$P_m = \sqrt{\frac{2\pi d^4 F}{3\mu\mu_0}}. \quad (9.7)$$

Крім індукції  $B$  магнітне поле характеризується напруженістю  $H$ . Ці величини зв'язані між собою співвідношенням

$$B = \mu\mu_0 H. \quad (9.8)$$

Тут  $\mu$ - так звана відносна магнітна проникність середовища, яка показує, в скільки разів сила, що діє на провідник зі струмом у даному середовищі, більша, ніж у вакуумі (при інших однакових умовах);  $\mu_0$  - магнітна стала, що залежить від вибору систем одиниць. В системі СІ

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ в. сек./а.м.}$$

Для вакууму  $\mu = 1$ , тому

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (9.9)$$

де  $B_0$  - величина магнітної індукції у вакуумі.

В системі СІ напруженість магнітного поля  $H$  вимірюється в амперах на метр (а/м). ця одиниця є напруженістю такого магнітного поля, індукція якого у вакуумі становить  $4\pi \cdot 10^{-7}$  тл.

Згідно формули (9.7) отримаємо

$$P_m = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 2^4 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{\frac{1,005 \cdot 10^{-2}}{3,78 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{2659,549} = 51,57$$

Встановимо розмірність

$$[P_m] = \sqrt{\frac{M^4 \cdot H}{\frac{\text{Гн}}{м}}} = \sqrt{\frac{M^4 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{сек}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{сек}^2 A^2}} = [A \cdot \text{м}], \quad (9.10)$$

Таким чином, магнітний момент кожного з двох магнітів буде  $P_m = 51,57 \text{ А} \cdot \text{М}^2$ .

**9.2.** Дослідимо поведінку магнітної стрілки в однорідному магнітному полі.

Магнітна стрілка моментом  $P_m = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{М}^2$  підвішена на пружній нитці. При включенні однорідного магнітного поля з індукцією  $B = 10^{-3} \text{ т}$ , що утворює кут  $\alpha = 60^\circ$  з віссю стрілки, стрілка поверталась на кут  $\beta = 30^\circ$ .

Вважаючи, що закручуючий момент нитки пропорціональний куту закручування, тобто

$$M = k\varphi, \quad (9.11)$$

визначити постійну  $k$ .

Нитка буде знаходитись в спокої тоді, коли моменти всіх сил зрівноважуються, тобто

$$P_m B \sin(\alpha - \beta) = k\varphi. \quad (9.12)$$

Тому

$$k = \frac{P_m B \sin(\alpha - \beta)}{\varphi}. \quad (9.13)$$

Кут закручування  $\varphi$  дорівнює куту  $\beta$ , але його потрібно виразити в радіанах

$$\varphi = \frac{2\pi\beta^0}{360^0}. \quad (9.14)$$

І в нашому випадку

$$k = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(60^0 - 30^0)}{5,236 \cdot 10^{-1}} = \frac{1,57 \cdot 10^{-7}}{5,236 \cdot 10^{-1}} = 2,998 \cdot 10^{-7},$$

де  $\varphi = \frac{2\pi \cdot 30^0}{360^0} = 5,236 \cdot 10^{-1}$  радіан.

Розглянемо розмірність коефіцієнта  $k$ .



Приймаючи до уваги, що  $1 \text{ тесла} = 1 \left[ \frac{H}{A \cdot m} \right]$

отримаємо  $[k] = [H \cdot m]$ .

Таким чином, постійна  $K$  закручую чого моменту, рівна

$$K = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В подальшому розрахувати постійну  $k$  закручуючого моменту для значень  $\beta$ , приведених в табл.9.1.

Таблиця 9.1. Значення постійної  $k$  закручуючого моменту

№	$\beta^\circ$	$\varphi = \beta$ рад.	$K$	$M = K \cdot \varphi$	$\Delta M_i = M_{i+1} - M_i$
1	0°				
2	10				
3	20				
4	30				
5	40				
6	50				
7	60				
8					

Рис.9.1.Графік залежності  $M$  від  $\varphi$   
Знайти перші різниці  $\Delta M_i = M_{i+1} - M_i$ .

Побудувати графік і зробити висновки.

Виконати оцінку точності розрахунків.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

**Тема:** Дослідження поведінки магнітної стрілки в полі соленоїдів.

**Ціль роботи:** Вивести формулу розрахунку кута відхилення магнітної стрілки в полі соленоїдів і формулу розрахунку відносної магнітної проникності ферромагнетика та горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі.

**Мета роботи:** Провести пошукову роботу і встановити необхідні параметри.

**Прилади:** Два соленоїди, магнітна стрілка, платиновий циліндрок, ферромагнітний диск, довгий прямий соленоїд, мікрокалькулятор, Лекція №9.

**10.1.** Між двома однаковими соленоїдами, розташованими, як показано на рис.10.1., на рівній віддалі від них в горизонтальній площині знаходиться магнітна стрілка.

Площина магнітного меридіану перпендикулярна осі соленоїдів. Струми в соленоїдах пропускають у протилежних напрямках так, щоб їх сумарне магнітне поле в точці  $M$  дорівнювало нулю.

Рис.10.1.Магнітна стрілка в полі соленоїдів

Після всередину одного із соленоїдів вносимо невеликий циліндрок, зроблений із платини. Вісь цього циліндрика співпадає з віссю соленоїда. Віддаль центра платинового циліндра до точки  $M$   $OM = 50 \text{ см}$ ., висота циліндрика  $h = 1 \text{ см}$ ., площа поперечного перерізу його  $S = 1 \text{ кв. см}$  Число витків соленоїда на одиницю його довжини  $n = 50 \text{ на } 1 \text{ см}$ . Горизонтальну складову магнітного поля Землі приймаємо  $H_z = 10^2 / 2\pi \text{ А/М}$ . Через соленоїди пропускаються струми  $I = 10 \text{ А}$ .

Необхідно встановити, на який кут  $\alpha$  повинна відхилитися магнітна стрілка при цьому?

... На стрілку будуть діяти два взаємно перпендикулярних поля: поле Землі і поле намагніченого платинового циліндрика.

... Так як  $h \ll L$ , то для індукції другого магнітного поля можна використовувати формулу

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{P_m}{2\pi L^3}, \quad (10.1)$$

де  $P_m$  – магнітний момент циліндрика

$$P_m = PhS. \quad (10.2)$$

У формулі (10.2)  $P$  – вектор його поляризації.

Але

$$P = \kappa H_{BH} = \kappa ni, \quad (10.3)$$

де  $\kappa$  (каппа) – магнітна сприйнятливість платини;  $H_{BH}$  – напруженість поля соленоїда, який намагнічує циліндрик.

В таблицях іноді дається значення питомої сприйнятливості речовини  $\kappa_{\text{пит.}}$ . Знайдемо магнітну сприйнятливість платини, знаючи, що її питома магнітна сприйнятливість

$$\kappa_{\text{пит.}} = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Магнітна сприйнятливість речовини  $\kappa_m$  відноситься до одиниці об'єму магнетика. Питома магнітна сприйнятливість  $\kappa_{\text{пит.}}$  відноситься до одиниці маси. Тому зв'язок між цими величинами виражається

$$\kappa_{\text{пит.}} = \frac{\kappa}{\rho}, \quad (10.4)$$

або

$$\kappa = \kappa_{\text{пит.}} \cdot \rho, \quad (10.5)$$

де  $\rho$  – густина речовини.

Для платини  $\rho = 21400 \text{ кг/м}^3$ .

Тоді

$$\kappa_{\text{плат.}} = 3,6 \cdot 10^{-4}.$$

Таким чином,

$$H = \frac{PhS}{2\pi L^3}, \quad (10.6)$$

або

$$H = \frac{\kappa n i h S}{2\pi L^3}. \quad (10.7)$$

Шуканий кут визначиться відношенням

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{H_3}, \quad (10.8)$$

або

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\kappa n i h S}{2\pi L^3 H_3}. \quad (10.9)$$

В нашому випадку при  $\kappa = 3,6 \cdot 10^{-4}$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 1/\text{см} \cdot 10 \text{ А} \cdot 1 \text{ см} \cdot 0,001 \text{ м}^2}{2\pi (0,5 \text{ м})^3 \cdot \frac{100}{2\pi} \text{ А/м}}$$

$$\text{і } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{12,5} = \operatorname{arctg} 1,44 \cdot 10^{-5}.$$

Тобто  $\alpha' = 8,25 \cdot 10^{-4} \cdot 3600'' = 2,97'' \approx 3''$ .

**10.2.** Тепер на місце платинового циліндрика внесемо феромагнітний диск, вісь якого співпадає з віссю соленоїда. Віддаль  $OM = L = 20$  см, товщина диска  $h = 1$  см, площа диска  $S = 10 \text{ см}^2$ , число витків соленоїда, які приходяться на одиницю довжини,  $n = 50$  на  $1/\text{см}$ , сила струму, який проходить через соленоїд  $I = 10 \text{ А}$ . Магнітна стрілка відхиляється на кут  $\alpha = 79^\circ 55'$ .

Необхідно визначити за цими даними відносну магнітну проникність феромагнетика.

Також, як і в попередньому випадку, напруженість магнітного поля створеного феромагнітним диском в точці  $M$

$$H = \frac{P_m}{2\pi L^3}, \quad (10.10)$$

Або

$$H = \frac{\kappa n i h S}{2\pi L^3}, \quad (10.11)$$

і

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{H_3}, \quad (10.12)$$

тобто

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\kappa n i h S}{2\pi L^3 H_3}, \quad (10.13)$$

Звідки

$$\kappa = \frac{\operatorname{tg} \alpha H_3 L^3 2\pi}{n S h i}. \quad (10.14)$$

І в нашому випадку

$$\kappa = \frac{\operatorname{tg} 79^{\circ} 55' \cdot 10^2 / 2\pi A / m \cdot (0,2m)^3 \cdot 2\pi}{50 \text{ l/cm} \cdot 0,01m^2 \cdot 1cm \cdot 10A} = 9.$$

Відносна магнітна проникність феромагнітного диска розраховується за формулою

$$\mu = 1 + \kappa, \quad (10.15)$$

і в нашому випадку

$$\mu = 10.$$

**10.3.** Продовжимо дослідження поведінки магнітної стрілки в таких умовах:

- по довгому прямому соленоїду, який має  $n = 3,3$  витка на  $1\text{ см.}$ , протікає струм  $I = 0,13\text{ А}$ . Соленоїд встановлений горизонтально в площині магнітного меридіану.

Період коливань маленької магнітної стрілки, поміщеної всередину соленоїда вздовж його осі, відносно цієї осі  $T = 0,2\text{ с}$ . Якщо соленоїд забрати, то період коливань магнітної стрілки буде  $T_1 = 0,4\text{ с}$ .

Визначити по цим даним горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі  $B_3$ .

У першому випадку на магнітну стрілку діє і поле соленоїда і магнітне поле Землі.

Згідно розглянутому нами випадку

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{j}{P_m (B + B_3)}}, \quad (10.16)$$

і

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{j}{P_m B_3}}. \quad (10.17)$$

Звідки

$$\frac{T^2}{T_1^2} = \frac{B_3}{B + B_3}. \quad (10.18)$$

Тому

$$B_3 = B \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}. \quad (10.19)$$

Але по закону Біо – Савара – Лапласа для довгого оленоїда

$$B = \mu n i. \quad (10.20)$$

В такому випадку

$$B_3 = \mu_0 n i \left( \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} \right). \quad (10.21)$$

І в нашому випадку, приймаючи до уваги, що  $3,3$  витки на  $1\text{ см.}$  дорівнюють  $330$  витків на метр, отримаємо

$$B_3 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кГ} \cdot \text{м}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{сек}^2 \cdot \text{м}} \cdot 330 \frac{1}{\text{м}} \cdot 0,13\text{ А} \left( \frac{0,04}{0,16 - 0,04} \right) = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ тл.}$$

**10.4.** Тепер дослідимо, як зміняться періоди коливань магнітної стрілки, якщо намагніченість стрілки зросте у два рази.

Так як

$$T \approx \frac{I}{\sqrt{P_m}},$$

то при збільшенні намагнічення стрілки у два рази, період її коливань і всередині соленоїда і зовні його зменшиться у  $\sqrt{2}$  рази. Обидва періоди коливань стрілки зменшаться у  $\sqrt{2}$  раз.

Змінюючи за допомогою реостата силу струму  $I$  і фіксуючи значення періодів коливань  $T_2$  і  $T_1$ , за формулою (10.21.) визначити значення  $B_3$ . Провести розрахунки і зробити оцінку точності.

Таблиця 10.1. Розрахунок горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі  $B_3$ .

№	I, А	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$B_3$	$\Delta B_3$	$\Delta B_3^2$	$m_B$	$M_m$	$\frac{(M_m)}{B}$ %
1	0,13	0,4	0,2						
2	0,17	0,4	0,18						
3	0,20	0,4	0,17						
4	0,30	0,4	0,14						
5	0,60	0,4	0,10						
6	0,02	0,4	0,33						

Розраховується середнє значення

$$\bar{B}_3 = \frac{\sum B_{3i}}{6};$$

Знаходяться відхилення від середнього арифметичного

$$\Delta B_{3емлі i} = B_i + 1 - \bar{B}_3;$$

Середня квадратична похибка розрахованої індукції

$$m_B = \sqrt{\frac{\sum \Delta B^2}{5}}.$$

Середня квадратична похибка арифметичної середини

$$M_m = \frac{m_B}{\sqrt{6}}.$$

Відносна випадкова похибка у процентах

$$\left[ \frac{M_m \cdot 100}{B_{cp.}} \right] \% = \dots$$

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

**Тема:** Дослідження взаємного розташування магнітних стрілок в положенні нейтралізації магнітних полів.

**Ціль роботи:** Вивести співвідношення сторін прямокутника в положенні нейтралізації магнітних полів.

**Мета роботи:** Провести пошукову роботу і встановити необхідні параметри.

**Прилади:** Дві однакові магнітні стрілки, лінійка, калькулятор.

**11.1.** Розглянемо дві однакові магнітні стрілки, розташовані у протилежних вершинах  $K$  і  $M$  прямокутника  $KLMQ$ , як показано на рис.11.1. Яке повинно бути відношення сторін прямокутника

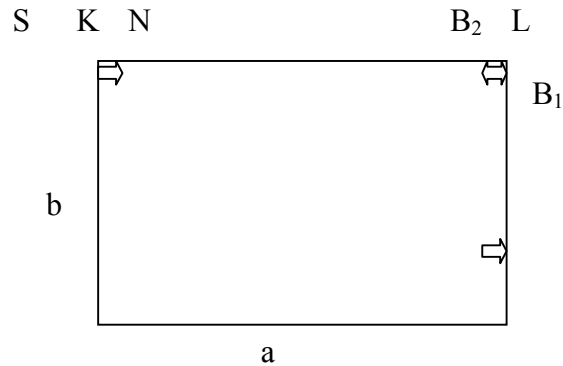
$$X = a/b,$$

щоб в точці  $L$  магнітне поле було відсутнім.

Вважати довжини стрілок меншими сторін прямокутника.

Магнітна індукція в точці  $L$ , творена верхньою стрілкою

$$B_1 = \frac{2\mu\mu_0 P_m}{4\pi a^3}. \quad (11.1)$$



Q S M N  
Рис. 11.1 Вибір положення  
нейтралізації магнітних полів

Магнітна індукція в точці L, створена нижньою стрілкою

$$B_2 = \frac{2\mu\mu_0 P_m}{4\pi b^3}. \quad (11.12)$$

Так як  $B_1$  і  $B_2$  мають протилежні напрямки, то в точці L  $B = 0$ , коли  $|B_1| = |B_2|$ , тобто

$$\frac{2\mu\mu_0 P_m}{4\pi a^3} = \frac{2\mu\mu_0 P_m}{4\pi b^3}. \quad (11.13)$$

Звідки

$$\frac{2}{a^3} = \frac{1}{b^3},$$

або

$$\frac{a^3}{b^3} = 2.$$

Тоді

$$\frac{a}{b} = \sqrt[3]{2}, \quad (11.4)$$

тобто

$$\frac{a}{b} = 1.26.$$

Таким чином, для того, щоб в точці L магнітне поле було відсутнім, тобто щоб протилежно направлені поля магнітних стрілок зрівноважились відношення сторін  $a/b$  повинно бути рівним 1,26.

**11.2.** Дослідження взаємодії прямого магніту і колового струму.

Розглянемо взаємодію прямого магніту і колового струму. Контур із струмом розташований так, що центр його лежить на осі магніта, а нормаль до його площини складає з вісію магніта кут  $\alpha = 30^\circ$ .

Віддаль між центрами витка і магніта  $r = 1$  м. По контуру проходить струм  $I = 10$  А. Площа, обтікаєма струмом,  $S = 20$  см.<sup>2</sup>. Магнітний момент  $P_m = 1$  А·м<sup>2</sup>.

Необхідно знайти обертаючий момент, який діє на контур із струмом (вважати розміри магніта малими в порівнянні із віддаллю до витка).

На виток, поміщений в магнітному полі, діє обертаючий момент

$$M = BI S \sin \alpha \quad (11.5)$$

Так як контур розташований достатньо далеко від магніта і площа контура мала, то в кожній точці цієї площі індукція

$$B = \frac{2\mu_0 P_m}{4\pi r^3}. \quad (11.6)$$

Тому

$$M = \frac{\mu_0 P_m IS \sin \alpha}{2\pi r^3}. \quad (11.7)$$

І в нашому випадку

$$M = \frac{1.26 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0.002 \cdot \sin 30^\circ}{2\pi \cdot 1} = 4.01 \cdot 10^{-9} \sin 30^\circ = 2 \cdot 10^{-9}.$$

Розглянемо розмірність

$$[M] = \left[ \frac{\text{гн} / \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3} \right].$$

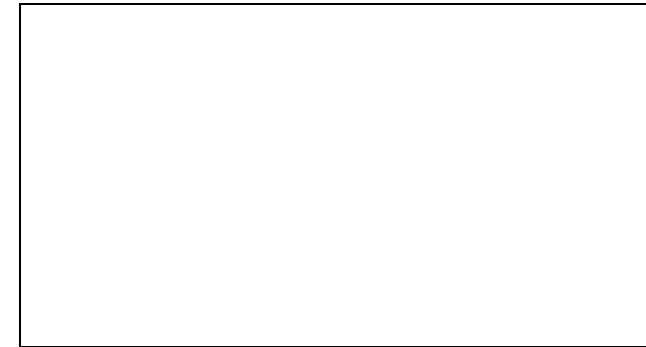
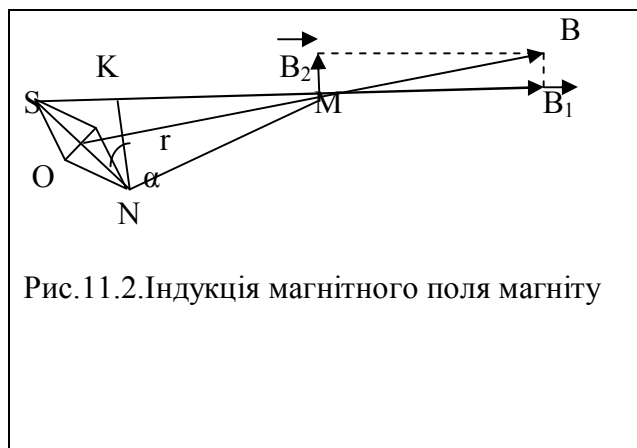
Приймаючи до уваги, що 1 Генрі  $\left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А}^2 \text{сек}^2} \right]$ , отримаємо

$$[M] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^2}{\text{А}^2 \text{сек}^2} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}].$$

Таким чином, обертаючий момент, який діє на контур із струмом буде дорівнювати  $2 \cdot 10^{-9} \text{Н} \cdot \text{м}$ .

### 11.3. Дослідження магнітної індукції поля магніту.

Необхідно визначити магнітну індукцію поля, створеного у вакуумі магнітом з магнітним моментом  $P_m = 5 \text{А} \cdot \text{м}^2$  в точці М, яка знаходиться на віддалі  $r = 0,5 \text{м}$ , якщо пряма, що з'єднує центр магніта О з точкою М, утворює кут  $\alpha = 60^\circ$  з віссю магніту. Вважати віддаль ОМ більшою у порівнянні з довжиною магніту.



По побудові  $NK \perp SM$ . В точці К уявимо собі два полюси  $N'$  і  $S'$ , що дорівнюють полюсам N і S. Розглянемо два магніти  $S N'$  і  $S' N$ .

Перший із них має магнітний момент

$$P_{m1} = P_m \cos \alpha, \quad (11.8.)$$

другий

$$P_{m2} = P_m \sin \alpha, \quad (11.9.)$$

Ці магніти створюють в точці М магнітні індукції

$$B_1 = \frac{2\mu_0 P_m \cos \alpha}{4\pi r^3}, \quad (11.10)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 P_m \sin \alpha}{4\pi r^3}, \quad (11.11)$$

Так як вони взаємно перпендикулярні, то

$$B = \sqrt{4 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \cdot \frac{P_m \mu_0}{4\pi r^3}. \quad (11.12)$$

І в нашому випадку

$$q = 1,6 \cdot 10 \text{ кулона,}$$

$$B = \sqrt{4 \cos^2 60^\circ + \sin^2 60^\circ} \cdot \frac{5 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 0,5^3} = 1,32 \cdot 4,01 \cdot 10^{-6} = 5,29 \cdot 10^{-6}.$$

Розглянемо розмірність

$$[B] = \frac{A \cdot m^2 \cdot \cancel{2H}}{m \cdot m^3} = \left[ A \cdot m^2 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \text{сек}^2 \cdot m} \cdot \frac{1}{m^3} \right] = \left[ \frac{kg}{A \text{сек}^2} \right] = 1 \text{ тесла}$$

Таким чином, магніт з магнітним моментом  $Pm = 5 \text{ Ам}^2$  у вакуумі в точці М створює магнітне поле з індукцією  $5,29 \cdot 10^{-6} \text{ Т}$ .

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12

**Тема:** Дослідження густини струму провідності в атмосфері земної кулі.

**Ціль роботи:** Вивести робочу формулу і встановити значення густини струму провідності в атмосфері, знайти питому електропровідність.

**Мета роботи:** Набуття навиків при виконанні пошукової роботи по встановленню густини струму провідності атмосфери.

**Прилади:** Вихідні параметри, калькулятор.

**12.1.** В атмосфері поблизу поверхні Землі утворюється через радіоактивність ґрунтів і космічне випромінювання в середньому  $\Delta n_0 = 5$  пар іонів за 1с в  $1 \text{ см}^3$  повітря.

Встановимо струм насичення між плоскими електродами площею  $S = 100 \text{ см}^2$ , розташованими на віддалі  $\ell = 10 \text{ см}$ . Іони вважати одноразовими.

Густина струму насичення розраховується за формулою

$$i_H = \Delta n_0 \cdot q \cdot \ell, \quad (12.1)$$

де  $q$  – заряд іона і чисельно дорівнює заряду електрона

$\Delta n_0$  – число пар іонів;  $\ell$  - віддаль між електродами.

Приймаючи до уваги, що 1 кулон = 1 ампер · секунду, отримаємо

$$i_H = 5 \frac{1}{\text{сек} \cdot \text{см}^3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{сек} \cdot 10 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-18} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

Струм насичення між плоскими електродами площею  $S$ , розраховуємо за формулою

$$I_H = i_H \cdot S, \quad (12.2)$$

звідки

$$I_H = 8 \cdot 10^{-18} \text{ А} / \text{см}^2 \cdot 100 \text{ см}^2 = 8 \cdot 10^{-16} \text{ А}.$$

**12.2.** Число пар іонів в  $1 \text{ см}^3$  повітря при іонізації рентгенівським промінням дорівнює  $n_0 = 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Виявимо, через який час після припинення дії проміння число пар іонів внаслідок рекомбінації зменшиться до  $n = 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

А) якщо повітря чисте ( $\alpha = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ );

Б) якщо в повітрі є пил.

При цьому  $\alpha$  – коефіцієнт молізації повітря при 1 атмосфері і температурі  $18^\circ \text{ С}$ .

За формулою

$$n = \frac{n_0}{1 + \alpha n_0 t},$$

(12.3)

визначимо проміжок часу  $t = \tau$ , за який число іонів внаслідок рекомбінації зменшиться до  $n$

$$\tau = \frac{n_0 \tau_0}{\alpha n_0 n}$$

(12.4)

І в нашому випадку

$$\tau = \frac{10^6 \text{см}^{-3} - 10^4 \text{см}^{-3}}{1 + 1,67 \cdot 10^{-6} \text{см}^3 \text{сек}^{-1} \cdot 10^6 \text{см}^{-3} \cdot 10^4 \text{см}^{-3}} = \frac{990000}{16701} = 59,27 \text{сек.}$$

Якщо в повітрі є частинки пилу, рекомбінація значною мірою проходить на них. У цьому випадку число пар іонів, які рекомбінують за час  $t$  можна вважати ропорціональним

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\beta dt. \quad (12.5)$$

Інтегруючи цей вираз у межах від  $n_0$  до  $n$ , матимемо

$$-\frac{1}{\beta} \int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = dt, \quad (12.6)$$

або

$$\tau = \frac{1}{\beta \ln n_0} \quad (12.7)$$

**12.3.** Встановимо концентрацію одновалентних іонів  $n_0$  в повітрі, якщо при напруженості поля  $E = 34$  в/м густина струму  $i = 2 \cdot 10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>. Рухомість іонів  $u_+ = 1,38 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> / (сек·в),  $u_- = 1,91 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> / (сек·в).

Густину струму, що виникає в атмосферному повітрі, можна визначити за законом Ома в диференціальній формі

$$i = \gamma \cdot E, \quad (12.8)$$

де  $\gamma$  - питома провідність повітря;  $E$  – напруженість поля.

Залежність питомої електропровідності від величини іона  $q$ , числа іонів в одиниці об'єму  $n_0$  і рухливості іонів  $u_+$  і  $u_-$  виражається, як відомо, формулою.

$$\gamma = q n_0 (u_+ + u_-). \quad (12.9)$$

Підставивши (12.9) у (12.8), дістанемо

$$i = q n_0 (u_+ + u_-) E, \quad (12.10)$$

або число іонів кожного знаку (число пар іонів), які містяться в одиниці об'єму газу (атмосфери повітря)

$$n_0 = \frac{i}{q(u_+ + u_-)E}. \quad (12.11)$$

І в нашому випадку

$$n_0 = \frac{2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{сек}}{\text{А}} \cdot \frac{\text{сек} (1,38 \cdot 10^{-4} + 1,91 \cdot 10^{-4}) \text{м}^2 \cdot 34 \frac{\text{В}}{\text{м}}}{\text{сек} \cdot \text{В}}} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{м}^{-3}}{1,789 \cdot 10^{-21}} = 1,12 \cdot 10^{15} \text{м}^{-3}.$$

**12.4.** В 1 см<sup>3</sup> атмосферного повітря в середньому є 700 пар іонів. Рухливість додатних іонів, як було сказано вище,  $u_+ = 1,4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ , а від'ємних  $u_- = 1,9$

Встановимо густину вертикального струму, якщо напруженість електричного поля Землі  $E = 130$  в/м. Вважати, що заряди всіх іонів однакові і дорівнюють заряду електрона.

За формулою (12.10) знайдемо густину струму провідності в атмосфері, приймаючи до уваги, що заряд іона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  кулон =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  А·сек,  $n_0 = 700 \text{см}^{-3} = 7 \cdot 10^8 \text{м}^{-3}$ ,



$$u_+ = 1.4 \frac{\text{см/сек}}{\text{в/см}} = 1.4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м/сек}}{\text{в/м}}; u_- = 1.9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м/сек}}{\text{в/м}}.$$

$$i = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{сек} \cdot 7 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot (1.4 + 1.9) \cdot 10 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}.$$

$$130 \frac{\text{в}}{\text{м}} = 4.8 \cdot 10^{-12}$$

Встановимо питому електропровідність атмосфери.  
За формулою (12.9) отримаємо

$$\gamma = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ А/сек} \cdot 7 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot 3.3 \cdot 10^{-4} = 3.696 \cdot 10^{-14}$$

За формулою  $i = \gamma E$  (12.12)

проконтролюємо обчислення

$$i = 3.696 \cdot 10^{-14} \frac{\text{А}}{\text{в} \cdot \text{м}} \cdot 130 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 4.8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13

**Тема:** Дослідження середньої провідності земної атмосфери і густини заряду Землі.

**Ціль роботи:** Продовжити дослідження лабораторної роботи №12.

**Мета роботи:** Набуття навиків при виконанні пошукової роботи по встановленню середньої провідності Земної атмосфери.

**Прилади:** Вихідні параметри, калькулятор.

**13.1.** Рух іонів під дією сил електричного поля Землі, градієнт якого рівний 130 в/м, створює в атмосфері вертикальний струм. Якщо не враховувати протитоків в районах, охоплених грозою, то отримаємо для всієї планети земної поверхні силу струму в 1500А.

Знайдемо 1) середню провідність земної атмосфери біля поверхні Землі;

2) час, за який під дією цього струму і при відсутності протитоків електричне поле біля поверхні Землі зменшилось би в 100раз.

Запишемо закон Ома в диференціальній формі

$$i = \gamma E, \quad (13.1)$$

де  $i$  – густина струму;  $\gamma$  - питома провідність атмосфери.

Для земної кулі густину струму  $i$  розрахуємо за формулою

$$i = \frac{I}{4\pi R^2}. \quad (13.2)$$

де  $R = 6371000\text{м}$ -радіус земної кулі.

Тоді

$$i = \frac{I}{S}, \quad (13.3)$$

де  $S$  площа поверхні Землі.

Густина струму в атмосфері Землі

$$i = \frac{1500\text{А}}{4\pi(6371000\text{м})^2} = 2.94 \cdot 10^{-12} \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Питому електропровідність атмосфери Землі розрахуємо за формулою

$$\gamma = \frac{i}{E}. \quad (13.4)$$

$I$  в нашому випадку

$$\gamma = \frac{2,94 \cdot 10^{-12} \frac{A}{m^2}}{130 \frac{B}{m}} = 2,26 \cdot 10^{-14} \frac{A}{B \cdot m}.$$

Зі зміною часу

$$idt = \gamma E dt. \quad (13.5)$$

Але

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}. \quad (13.6)$$

де  $\sigma$  – поверхнева густина зарядів;  $\epsilon_0$  – електрична стала.

Тоді

$$idt = -d\sigma, \quad (13.7)$$

тому

$$-d\sigma = \frac{\sigma \gamma}{\epsilon_0} dt. \quad (13.8)$$

Звідки

$$dt = -\frac{\epsilon_0 d\sigma}{\gamma \sigma}. \quad (13.9)$$

При цьому

$$t = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\epsilon_0}{\gamma \sigma} d\sigma. \quad (13.10)$$

і

$$t = \frac{\epsilon_0 \ln \sigma_1}{\gamma \sigma}. \quad (13.11)$$

Але

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1}{E_2}. \quad (13.12)$$

Досліджуючи нашу умову

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1}{E_2} = 100,$$

де  $\sigma_2$  – поверхнева густина струму провідності атмосфери при його зменшенні в 100 раз.

Приймаючи  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$ , отримаємо

$$t = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot \text{сек}}{B \cdot m}}{2,26 \cdot 10^{-14} \frac{A}{B \cdot m}} \ln 100 = 1803,35 \text{ сек} = 0,500 \text{ год} = 30 \text{ хв}.$$

Приймаючи до уваги, що 1 фарада = 1 Ампер·сек/Вольт,

$$[t] = \left[ \frac{\frac{A \cdot \text{сек}}{B \cdot m}}{\frac{A}{B \cdot m}} \right] = 1 [\text{секунда}].$$

Знайдемо поверхневу густина струму в атмосфері Земної кулі по нашим даним

$$i = \gamma E =$$

В табличних даних вказано, що густина струму провідності електричного поля Землі складає  $2 \div 3 \cdot 10^{-16} \text{ А/см}^2$ , Тобто  $2 \div 3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ , що добре узгоджується з отриманими нами даними.

**13.2.** На заключення знайдемо середню поверхневу густина заряду Землі, знаючи, що градієнт потенціалу електричного поля Землі біля її поверхні направлений вертикально вниз і дорівнює (в середньому)  $130 \text{ В/м}$ .

Запишемо формулу зв'язку між напруженістю і потенціалом

$$E = -gzd\phi \quad (13.13)$$

Мірою інтенсивності зміни потенціалу вздовж електричної силової лінії поля, утвореного точковим зарядом, є похідна від потенціалу по відстані до джерела поля. Ця величина називається градієнтом потенціалу і дорівнює

напруженості поля, взятій із законом мінус. Градієнт є величина вектора, направлена в бік зростання потенціалу. Із формули

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} \quad (13.14)$$

знайдемо середню поверхневу густину заряду Землі за формулою

$$\sigma = -E \epsilon\epsilon_0 \quad (13.15)$$

І в нашому випадку, приймаючи  $\epsilon\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ В/М}$

$$\sigma = -130 \text{ В/М} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/М} = -1,15 \cdot 10^{-9}$$

Приймаючи до уваги, що  $1 \text{ А с} = 1 \text{ к}$ , отримаємо

$$\sigma = -1,15 \cdot 10^{-9} \text{ к/М}^2.$$

Таким чином, середня поверхнева густина заряду Землі складає

$$\sigma = -1,15 \cdot 10 \text{ к/М}^2.$$

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14

**Тема:** Розробка методики визначення магнітної індукції поля при коливанні магніта у вертикальному магнітному полі

**Ціль роботи:** Розробити методику визначення магнітної індукції при коливанні магніта у вертикальному магнітному полі.

**Мета роботи:** Набуття навиків при виконанні пошукової роботи по розробці методики визначення індукції при коливанні магніта у вертикальному магнітному полі.

**Прилади:** Намагнічений стержень, тонка нитка, секундомір, калькулятор..

**14.1.** В однорідному вертикальному магнітному полі висить підвішений за один кінець намагнічений стержень масою  $m = 60 \text{ г}$ . Довжина стержня  $\ell = 10 \text{ см}$ . Період коливань  $T$  цього магніта, який можна розглядати як фізичний маятник, в два рази менший його періоду коливань  $T_1$  у відсутності поля. Магнітний момент стержня  $Pm = 4,9 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Необхідно визначити магнітну індукцію поля  $B$ .

Згідно другого закону Ньютона для обертального руху

$$PmB \sin \alpha = mja \sin \alpha = j\epsilon, \quad (14.1)$$

де

$$\alpha = \frac{\ell}{2}.$$

Так як  $\alpha$  мале, то

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left( \frac{PmB + mga}{J} \right) \alpha = 0. \quad (14.2)$$

Приймаючи до уваги, що період коливань фізичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}. \quad (14.3)$$

де  $m$  – маса маятника;  $j$  -його момент інерції.

В нашому випадку

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{Pm + mga}} \quad (14.4)$$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga}} \quad (14.5)$$

Тоді

$$\frac{T^2}{T_1^2} = \frac{mga}{PmB + mga}. \quad (14.6)$$

Виразимо звідси  $B$

$$B = \frac{mgl}{2P_m} \left( \frac{T_1^2}{T^2} - 1 \right). \quad (14.7)$$

$I$  в нашому випадку

$$B = \frac{0.06 \cdot 9.81 \cdot 0.10}{2 \cdot 4.9} \left( \frac{2^2}{1^2} - 1 \right) = 6.006 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 1.8018 \cdot 10^{-2}.$$

Розмірність

$$[B] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сек}^2} \right] \cdot \left[ \frac{\text{м}}{\text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\text{А} \cdot \text{м}} \right] = 1 \text{ тесла}.$$

Таким чином, магнітна індукція поля складає  $1,8 \cdot 10^{-2}$ т.

**14.2.** Тепер знайдемо індукцію магнітного поля, створеного полосовим магнітом, який має магнітний момент  $P_m$ .

Індукцію магнітного поля знайдемо в точці  $B_1$ , якщо вона лежить на прямій, яка проходить через полюси магніту і в точці  $A$ , перпендикулярній магніту, що проходить через його середину. Віддаль цієї точки до магніту  $r$  набагато більша довжини магніта.

1. Магнітне поле колового струму, створюємого в будь-якій точці осі струму, що знаходиться на віддалі  $r$ , яка набагато більша радіуса витка, за допомогою закону Біо-Савара\_Лапласа виражається формулою

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{IS}{r^3}, \quad (14.8)$$

де  $I$  – сила струму у витку;  $S$  – площа, яка обтікається витком.

Це магнітне поле можна розглядати як поле магнітного диполя, магнітний момент якого

$$P_m = I \cdot S \quad (14.9)$$

Таким магнітним диполем являється полосовий магніт, якщо тільки довжина його достатньо мала.

Таким чином, магнітне поле в точці  $B_1$ , створюване розглядаємим магнітом, для якого виконується вищевказана умова,

$$B_{B_1} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{P_m}{r^3}. \quad (14.10)$$

2. Магнітне поле магнітного диполя аналогічне електричному полю електричного диполя.

По аналогії можна заключити, що поле в точці  $A$  вдвічі менше поля в точці  $B_1$ .

Таким чином,

$$B_A = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{P_m}{r^3}. \quad (14.11)$$

Приведенні викладки повністю відповідають розглянутій нами напруженості магнітного поля прямолінійного магніту в лекції 7.

**14.3.** Необхідно визначити магнітний момент стрілки компаса довжиною 8см. і масою  $m = 4$ г; період коливань її в магнітному полі Землі  $T=1$ сек. Горизонтальна складова напруженості магнітного поля Землі  $H = 0,2$  ерга.

Згідно II закону Ньютона для обертального руху

$$P_m B \sin \alpha = - I \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (14.12)$$

де  $\alpha$  – кут, який складає стрілка з горизонтальною складовою магнітного поля Землі.

Так зг кут  $\alpha$  малий, то

$$\sin \alpha \approx \alpha. \quad (14.13)$$

Тоді

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{P_m B}{I} \alpha = 0. \quad (14.14)$$

Звідси

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{j}{P_m B}}, \quad (14.15)$$

але момент інерції  $j$  фізичного маятника

$$j = \frac{1}{12} ml^2. \quad (14.16)$$

Тоді

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{ml^2}{12P_m B}}, \quad (14.17)$$

або

$$T = \pi l \sqrt{\frac{m}{3P_m B}}. \quad (14.18)$$

Звідки

$$P_m = \frac{\pi^2 l^2}{T^2} \cdot \frac{m}{3B}. \quad (14.19)$$

Приймаючи до уваги, що

$$B = \mu_0 H, \quad (14.20)$$

і в нашому випадку, вважаючи, що

1 А/м становить  $4\pi \cdot 10^{-3} e$ ,

а  $X \frac{A}{m}$  становить 0,2 e,

$$\begin{aligned} \text{звідси} \quad : H = X &= \frac{1 \frac{A}{m} \cdot 0,2e}{4\pi \cdot 10^{-3} e} = 15,92 \frac{A}{m}. \\ \ell^2 &= 0,08 \cdot 0,08 = 0,0064 \text{ м}^2; \quad \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}. \end{aligned}$$

При цьому індукція магнітного поля

$$B = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 15,92 \text{ А/м} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ тесла}$$

Таким чином, магнітний момент стрілки компаса складає  $4,21 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №15

**Тема:** Дослідження положення магнітної стрілки в електромагнітному полі струму.

**Ціль роботи:** Дослідити положення магнітної стрілки в електромагнітному полі струму.

**Мета роботи:** Набуття навиків при виконанні пошукової роботи по дослідженні положення магнітної стрілки в електромагнітному полі струму.

**Прилади:** Дротяне кільце, магнітна стрілка, джерело струму, дротини.

**15.1.** Дротяне кільце розташовано у вертикальній площині. В центрі кільця знаходиться горизонтальна магнітна стрілка малих розмірів. Стрілка може обертатися навколо вертикальної осі. До двох точок дротяного кільця підведені ідучі радіально дротини, з'єднанні з джерелом струму (рис.15.1).

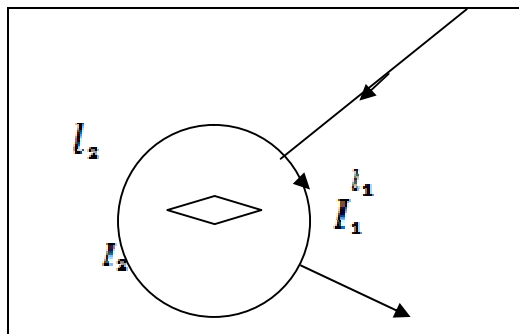


Рис.15.1.Магнітна стрілка в електричному полі струму

Як повинна розташовуватися при цьому магнітна стрілка?  
Магнітна індукція, створена струмом, який протікає по  $I_1$

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_1 l_1}{r^2} \quad (15.1)$$

Магнітна індукція, створена струмом, який протікає по  $I_2$

$$B_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_2 l_2}{r^2} \quad (15.2)$$

Але

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1} \quad (15.3)$$

Тобто

$$B_1 = B_2 \quad (15.4)$$

Ці вектори мають протилежний напрямок.

Тому

$$\vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 0. \quad (15.5)$$

Таким чином, стрілка встановиться у площині магнітного меридіану.

**15.2.** Довгий дрід зігнутий так, як показано на рис.15.2., під прямим кутом. Він розташований в площині магнітного меридіану. В точці О розташована магнітна стрілка, яка може обертатися навколо осі z.

Який кут вона утворить із віссю X, якщо по дротині пропускати струм 20А?

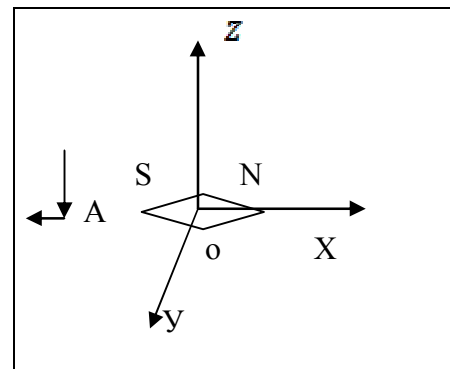


Рис. 15.2. Друге положення магнітної стрілки

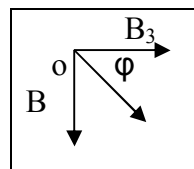
Який кут вона утворить із віссю X, якщо по дротині пропускати струм 20А?

Віддаль OA = 2см. Горизонтальна складова напруженості магнітного поля Землі рівна 0,2e.

Магнітне поле, створене струмом в точці О має індукцію

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{2r} \quad (15.6)$$

Крім того, на стрілку діє магнітне поле Землі (рис.15.3)



$$B_3 = \mu H \quad (15.7)$$

При цьому

$$\operatorname{tg} \varphi = B/B_3, \quad (15.8)$$

Рис.15.3.Вектори індукції

Тобто

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot 2r} \cdot \frac{1}{\mu_0 H} \quad (15.9)$$

Або

$$\varphi = \arctg I / (4\pi rH). \quad (15.10)$$

І в нашому випадку, приймаючи до уваги, що

$$1 \frac{A}{M} = 4\pi \cdot 10^{-3} e, \text{ а } H_3 = 0,2e,$$

Тоді

$$H_3 = \frac{0,2e \cdot 1 \frac{A}{M}}{4\pi \cdot 10^{-3} e} = 15,92 \frac{A}{M}.$$

$$I \quad \varphi = \arctg \frac{20A}{4\pi \cdot 0,02M \cdot 15,92 \frac{A}{M}} = \arctg 4,998585,$$

$$\varphi = \arctg \frac{20A}{A} = \arctg 4,998585,$$

Або

$$\varphi = 78,69^\circ.$$

Таким чином, магнітна стрілка утворить кут  $\varphi = 78,69^\circ$  з віссю X і напрямком магнітного меридіану.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16

**Тема:** Встановлення збільшення зорової труби та оптичної сили тонких збиральних лінз.

**Ціль роботи:** Проведення експериментальних робіт по визначенню збільшення зорової труби і знаходженню оптичної сили тонких збиральних лінз.

**Мета роботи:** Набуття навиків по визначенню одного із основних параметрів – збільшення зорової труби

**Прилади:** Оптична труба з внутрішнім фокусуванням, лінійка, рулетка, мікрокалькулятор,

### 16.1. Оптична схема зорової труби.

В сучасних оптичних приладах застосовують зорові труби з внутрішнім фокусуванням (рис.16.1)

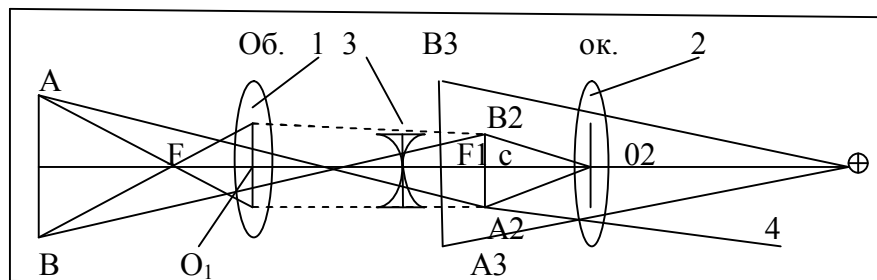


Рис.16.1. Оптична схема труби зорової з внутрішнім фокусуванням 1-об'єктив; 2-окуляр; 3-фокусуєча лінза; 4-сітка ниток;  $O_1F_1$ ;  $O_2F_1$ -фокусні віддалі об'єктива і окуляри відповідно

При виконанні польових робіт звичайно візують на предмети, які значно віддалені від приладу, тому предмет АВ(рис.16.1) завжди знаходиться зовні фокусної віддалі

$O_1F = f_{об}$  об'єктива (1), а зображення  $A_2B_2$  предмета, отримане через об'єктив, буде дійсним і оберненим. Для того, щоб збільшити це зображення, в трубу вводять окуляр(2).

Окуляр встановлюється таким чином, щоб віддаль  $O_2C$  була меншою фокусної віддалі  $O_2 F_1 = f_{ок}$ , яка змінюється при русі лінзи 3.

Тоді зображення  $A_3B_3$  буде уявним, збільшеним і оберненим.

Між об'єктивом і окуляром встановлюється двояко ввігнута лінза (3), яка переміщується всередині труби за допомогою кремальєри.

Змінюючи положення цієї лінзи, змінюється положення фокуса об'єктива, тому вона називається фокусною лінзою.

В окулярній частині зорової труби, в тому місці, де буде дійсне зображення предмету  $A_2B_2$  розміщується діафрагма в отвір якої вмонтовується скляна пластинка з нанесенню на ній сіткою ниток.

Зорова труба має три осі: візирну, оптичну і геометричну.

Пряма, яка з'єднує оптичний центр об'єктива з центром сітки ниток, називається візирною віссю труби.

Пряма, яка з'єднує оптичні центри об'єктива і окуляра, називається оптичною віссю труби.

Пряма, що проходить через центри поперечних перерізів об'єктивної частини труби, називається геометричною віссю труби.

### 16.2.Встановлення зорової труби для спостережень.

Перед наведенням труби на предмет окуляр повинен бути встановлений на око, а зображення предмета суміщено з площиною сітки ниток. Для встановлення окуляра на око трубу наводять на світлий фон і



переміщують окулярну трубочку до тих пір, щоб нитки сітки були видні різко окресленими

Суміщення зображення предмету з площиною сітки ниток, тобто фокусування, виконуємо переміщенням фокусуєчою лінзи в трубі за допомогою кремальєри; при цьому добиваються такого положення, щоб зображення предмету було різко окресленим.

Якщо зображення предмету з площиною сітки ниток не співпадає, то при переміщенні ока відносно окуляра точка перетину сітки ниток буде проектуватися на різні точки зображення. Таке явище називається паралаксом. Паралакс сітки ниток усувається незначним поворотом кремальєри.

### 16.3. Збільшення труби

Збільшенням труби  $\mathcal{V}$  називається відношення кута  $\beta$ , під яким зображення предмета видно в трубу, до кута  $\alpha$ , під яким предмет видно неозброєним оком, тобто

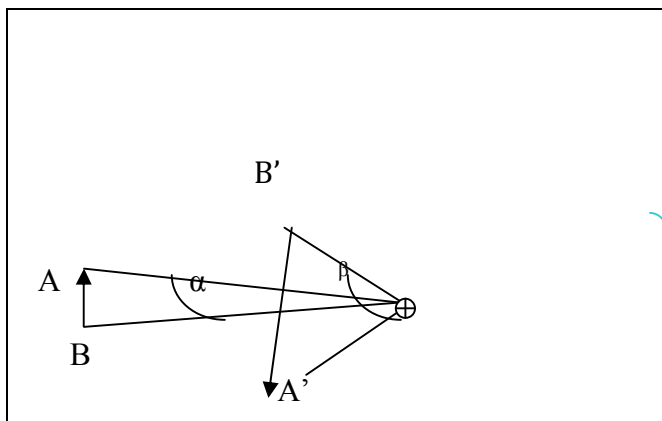


Рис.16.2.Збільшення зорової труби

$$\mathcal{V} = \beta/\alpha \quad (16.1)$$

Практично збільшення труби приймається рівним відношенню фокусної віддалі об'єктива до фокусної віддалі окуляра

$$\mathcal{V} = f_{об}/f_{ок} \quad (16.2)$$

Зорові труби приладів мають збільшення від 15 до 50<sup>x</sup> (крат) і більше.

Якщо на об'єктів падає пучок паралельних променів діаметра D, а через окуляр виходить паралельним пучком діаметра d, то

$$D/d = f_{об}/f_{ок} \quad (16.3)$$

Якщо світловий потік покриває повністю вільний отвір об'єктива, то його діаметр D дорівнює діаметру цього вільного отвору, який називається вхідною зіницею труби. В такому випадку d визначає діаметр вихідної зіниці труби.

Світловий потік діаметра d поступає в око спостерігача, діаметр зіниці у якого позначимо через g. Нормальний випадок, коли d=g.

В такому випадку промені, які пройшли через трубу, повністю використовуються оком. Якщо d<g, то при роботі такою трубою спостерігач використовує своє око не в повній мірі.

Діаметр зіниці ока змінюється від 2мм при дуже хорошому освітленні до 8мм в темноті. В польових роботах на відкритому повітрі слід виходити із того, що g = 2мм

### ЗАВДАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

Для визначення збільшення труби необхідно приблизно в 20м від труби поставити рейку (або лінійку з поділками). На рейку необхідно одночасно дивитися і в трубу (одним оком) і безпосередньо (другим оком). Ділення на рейці будуть здаватися в трубу дуже великими. Необхідно, дивлячись обома очима, визначити, скільком

діленням рейки, видимим простим оком, дорівнює одне видиме ділення труби. Це число і буде збільшенням труби. В нашому випадку  $\nu = 7$ .

Таблиця 16.1. Показники зорових труб заводу «Геодезія»

Прилади	Діаметр об'єктиви, мм	$F_{об}$ мм	$F_{ок}$ мм	$\nu$ х кра т
Теодоліт	27	190	9	21
Кіпрегель великий	40	380	10	38
Кіпрегель малий	33	270	9	30



Рис.16.3. Визначення збільшення труби

Із даних табл.1 видно, що у всіх випадках збільшення відповідає формулі (16.2).

Крім того, корисно відмітити, що  $F_{ок}$  в наших трубах тепер встановлено стандартне біля 10мм. Значить, збільшення такого окуляра біля 25, а збільшення труби приблизно дорівнює числу сантиметрів  $F_{об}$ .

Збільшення сучасних приладів робиться від  $12^x$  до  $70^x$ . Для визначення збільшення труби існують також спеціальні прилади, які називають динаметрами

Таблиця 16.2. Визначення збільшення зорової труби і оцінка точності результатів

№вміру	К-ть поділок, що відповідає 1 $\nu$ х	$\Delta \nu = \nu_i - \nu$	$\Delta \nu^2$	$\frac{m\nu}{\nu} \%$	$\frac{\Delta \nu}{\nu} \%$ сист.	$\frac{\Delta \nu}{\nu} \%$ повн.
2	21,1	+0,1	0,01	$\frac{0,036 \cdot 100\%}{21} = 0,17\%$	$\frac{=21-21}{21} \cdot 100\% = 0\%$	$= 0,17\% + 0\% = 0,17\%$
3	20,9	-0,1	0,01			
4	21	0	0			
5	21,1	+0,1	0,01			
6	20,9	-0,1	0,01			
Серед.	$\nu_c = 21,0$	$\Sigma 0$	$\Sigma 0,04$			

Середня квадратична похибка  $m_\nu$

$$m_\nu = \sqrt{\frac{\sum \Delta \nu^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{0,04}{5}} = 0,09$$

Середня квадратична похибка арифметичної середини

$$M_\nu = \frac{m_\nu}{\sqrt{n}} = \frac{0,09}{\sqrt{6}} = 0,036,$$

$$\frac{m_\nu}{\nu} \cdot 100\% = \frac{0,036}{21} \cdot 100\% = 0,17\%,$$

$$\left(\frac{\Delta \nu}{\nu} \cdot 100\%\right)_{\text{сист.}} = \frac{\nu_c - \nu_{\text{завода}}}{\nu_{\text{завода}}} = \frac{21^x - 21^x}{21^x} \cdot 100\% = 0\%$$

$$\left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)_{\text{повн}} = \frac{M_\nu}{\nu} \% + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)_{\text{сист.}} \% = 0,17\% + 0\% = 0,17\%$$

Величина, яка обернена фокусній відстані, називається оптичною силою лінзи (D)

$$D = \frac{1}{f}. \quad (16.4)$$

Оптична сила лінзи визначає збиральну здатність лінз. Чим сильніше заломлює промені лінза, тим менша фокусна відстань і більша оптична сила. Оптична сила збиральної лінзи є завжди величина додатня і вимірюється в діоптріях. Оптичну силу в 1 діоптрію (ДПТР) має лінза, у якій фокусна відстань дорівнює 1 метру. В нашому випадку  $D_{ок} = 1/0,009 = 111$  дптр;  $D_{об} = 1/0,190 = 5,26$  дптр. Експеримент був проведений добре, про що говорить відсутність систематичної похибки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №17

**Тема:** Встановлення поля зору труби

**Ціль роботи:** Проведення експериментальних робіт по встановленні поля зору оптичних труб

**Мета роботи:** Набуття навиків при встановленні поля зору труби .

**Прилади:** Зорова труба, лінійка, рулетка, мікрокалькулятор

Другою важливою властивістю труби є її можливість при одній установці охопити більший чи менший простір. Простір, який можна спостерігати в трубу при нерухомому її положенні, називається полем зору. Розмір поля зору визначається діаметром ав сіткової діафрагми і кутом  $\varepsilon$ , вершина якого знаходиться в оптичному центрі об'єктива, а сторони опираються на діаметр ав сіткової діафрагми. Діаметр  $d$  діафрагми робиться в межах  $\frac{2}{3}$  ок, щоб зображення біля країв діафрагми не було сильно спотворено. В окулярах більш вдосконаленої конструкції діаметр робиться більших розмірів.

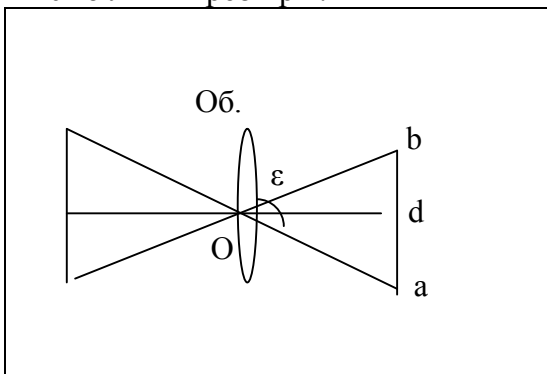


Рис. 17.1. Поле зору труби

Приймаючи

$$d = \frac{2}{3} f_{ок}, \quad (17.1)$$

І вважаючи, що віддаль діафрагми від об'єктива рівною  $f_{об}$ , Можна записати

$$\operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} = \frac{d}{2 f_{об}} = \frac{1}{3} \frac{f_{ок}}{f_{об}}, \quad (17.2)$$

або

$$\operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} = \frac{1}{3\nu}, \quad (17.2)$$

Із отриманої формули видно, що чим більше збільшення труби, тим менше поле зору. Тому збільшення труби приходить враховувати в залежності від цілі, для якої будується даний прилад.

В польових приладах поле зору буває звичайно в межах  $1-2^\circ$ .

Таким чином, величина кута  $\varepsilon$  (епсілон) характеризує поле зору труби. Цей кут тому і прийнято називати полем зору труби.

#### ЗАВДАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Для встановлення величини поля зору труби відраховують по рейці, яка знаходиться на віддалі  $S$  від об'єктива труби, число  $n$  сантиметрових ділень рейки, відділених діафрагмою труби. Тоді

$$\varepsilon = \rho \frac{n}{100S}. \quad (17.5)$$

Таблиця 17.1. Встановлення поля зору труби

	n	S	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon^2$	M / $\varepsilon$	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ %	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ %
1	31,8	10,000	1,822	0	0			
2	31,7	10,000	1,816	-0,006	$3,6 \cdot 10^{-5}$			
3	31,8	10,000	1,822	0	0			
4	31,7	10,000	1,816	-0,006	$3,6 \cdot 10^{-5}$			
5	31,9	10,000	1,828	+0,006	$3,6 \cdot 10^{-5}$			
6	31,9	10,000	1,828	+0,006	$3,6 \cdot 10^{-5}$			
Срд.	$31,8 = \bar{n}$	$\bar{S} =$	1,822	0	$1,44 \cdot 10^{-4}$			

$$\varepsilon_{i=57,3}^0 = \frac{31,8}{100 \cdot 10} = 1,822^\circ;$$

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{срд.}$$

$$\varepsilon_{2=57,3} = \frac{31,7}{100 \cdot 10} = 1,816$$

$$\varepsilon_{3=57,3} = \frac{31,8}{100 \cdot 10} = 1,822$$

$$\varepsilon_{4=57,3} = \frac{31,7}{100 \cdot 10} = 1,816$$

Середня квадратична похибка

$$m_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum \Delta \varepsilon^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,44 \cdot 10^{-4}}{5}} = 0,0054$$

Середня квадратична похибка

$$\varepsilon_{5=57,3}^{\text{ариф.}} = \frac{31,9}{1000} = 1,828$$

$$\varepsilon_{6=57,3}^0 = \frac{31,9}{1000} = 1,828$$

арифметичної середини

$$M_{\varepsilon} = \frac{m_{\varepsilon}}{\sqrt{n}} = \frac{0,0054}{\sqrt{6}} = 0,0022$$

$$\left[ \frac{M_{\varepsilon}}{\varepsilon} \% \right] = \frac{0,0022}{1,822} 100\% = 0,12\%$$

$$\left[ \frac{\Delta_{\varepsilon}}{\varepsilon} \% \right]_{\text{сист.}} = \frac{1,822 - 1,80}{1,80} 100\% = 1,22\%$$

$$\left[ \frac{\Delta_{\varepsilon}}{\varepsilon} \% \right]_{\text{повн.}} = 0,12\% + 1,22\% = 1,34\%$$

**Висновки:** Для виключення систематичної похибки із результатів експерименту необхідно на порядок (тобто до 0,1 мм) підвищити точність вимірів  $n$ .

### ЛІТЕРАТУРА

1. Букеєв Б.О. Дослідження точності апроксимації залежності магнітного моменту Землі від широти методом статистичних випробувань Монте Карло. Модель ПГБ-61 №3. МEGУ, Рівне, 2006, - 36с.

2. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1972, - 255с.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1. – К.: Техніка, 1999, -536с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. – К.: Техніка, 2001, - 452с.
5. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Загальний курс фізики. Т.3. – К.: Техніка, 1999, - 520с.
6. Літнарівч Р.М. Дослідження точності апроксимації залежності магнітного моменту Землі від широти методом статистичних випробувань Монте Карло. Частина 1. МEGУ, Рівне, 2006, - 44с.
7. Літнарівч Р.М. Встановлення зв'язку між географічною і геомагнітною системами координат. Частина 2. МEGУ, Рівне, 2006, - 47с.
8. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Сов. радио, 1976, - 192с.
9. Пастушенко С.М. Формули і закони загальної фізики: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. 2-е вид. : Діал., 2005, - 268с.
10. Розв'язування задач з курсу загальної фізики. Практикум /Остроухова А.А., Стрижевський В.Л., Цвілих М.Г. та інші. К.: Радянська школа, 1966, - 503с.
11. Трохимова Т.И. Курс Физики. Учебн. пособие для вузов.-3-е изд. Испр., - М.: Высш.шк. 1994, - 542с.
12. Фізика з використанням обчислювальної техніки. Практичний курс / В.М. Казанський, В.І. Клапченко, І.Д. Кошелева та інші. – К.: Либідь, 1993, - 224с.

*Ганзюк Юлія Генадіївна  
Бабій Тетяна Іванівна*

Міжнародний Економіко – Гуманітарний Університет  
ім. акад. С Дем'янчука  
Кафедра математичного моделювання  
33027, м.Рівне вул. акад. С. Дем'янчука ,4

**ЛІТНАРОВИЧ РУСЛАН МИКОЛАЙОВИЧ,**  
доцент, кандидат технічних наук

## **ФІЗИКА З ОСНОВАМИ ГЕОФІЗИКИ**

*Лабораторний практикум*

**НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ**

*Комп'ютерний набір, верстка, редагування і  
дизайн у редакторі Microsoft® Office® Word 2003*