

Лабораторна робота № 3-6

**ВИВЧЕННЯ ДИСПЕРСІЇ СВІТЛА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГРУПОВОЇ ШВИДКОСТІ  
СВІТЛА В СКЛІ**

Виконав \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_

**Мета роботи**

1. Вивчити явище дисперсії світла при проходженні його через середовища, для яких показник заломлення  $n$  залежить від частоти  $\nu$  (довжини хвилі  $\lambda$ ) хвиль.

2. Визначити показник заломлення скла для різних довжин хвиль світла видимого діапазону.

3. Визначити графічним способом групову швидкість розповсюдження видимого світла в склі і перевірити отримане значення швидкості за допомогою математичної обробки даних.

**Теоретична частина**

**Дисперсія світла. Области нормальної і аномальної дисперсії**

*Дисперсією світла називається залежність показника заломлення  $n$  речовини від частоти  $\nu$  (довжина хвилі  $\lambda$ ) світла або залежність фазової швидкості  $v$  світла в середовищі від його частоти  $\nu$ .*

Дисперсію світла представляють у вигляді залежності  $n = f(\lambda)$ .

Наслідком дисперсії є розклад у спектр пучка білого світла при проходженні його через скляну призму. Розклад білого світла в призмі відбувається за значеннями показника заломлення, тому для визначення довжини хвилі світла треба знати залежність

$$n = f(\lambda).$$

У дифракційному спектрі кольори розміщуються за порядком зростання довжини хвилі, а в дисперсійному – навпаки. Дифракційною решіткою червоні промені, що мають більшу довжину хвилі, ніж фіолетові, відхиляються сильніше.

На рис.1 наведена залежність показника заломлення  $n$  від довжини хвилі  $\lambda$  для скла.

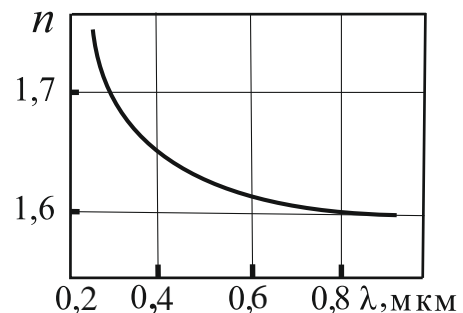


Рис.1.

Як видно з рис.1, показник заломлення  $n$  монотонно зростає із зменшенням довжини хвилі  $\lambda$ . Отже, червоні промені, що мають менший показник заломлення порівняно з фіолетовими променями, відхиляються призмою на менший кут.

Дисперсія світла в середовищі називається **нормальною**, якщо із зростанням частоти  $\nu$  світла абсолютний показник заломлення  $n$  середовища також зростає:

$$\frac{dn}{d\nu} > 0, \left(\frac{dn}{d\lambda} < 0\right).$$

Така залежність показника заломлення  $n$  від  $\nu$  буде в тих областях частот, для яких середовище прозоре. Наприклад, звичайне скло прозоре для видимого світла і в цьому інтервалі частот має нормальну дисперсію.

Дисперсію світла в середовищі називають **аномальною**, якщо із зростанням частоти світла абсолютний показник заломлення середовища  $n$  зменшується:

$$\frac{dn}{d\nu} < 0, \left(\frac{dn}{d\lambda} > 0\right).$$

Якщо речовина поглинає частину променів, то в області поглинання і біля неї хід дисперсії проявляє аномалію (рис.2). На деяких ділянках

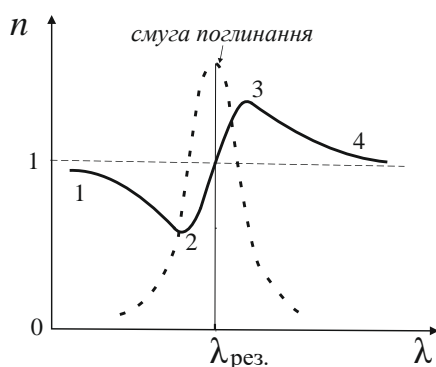


Рис.2.

дисперсія речовини  $dn/d\lambda$  є позитивною. Такий хід залежності  $n$  від  $\lambda$  називається **аномальною дисперсією**. Пунктирна крива на рис.2 зображує хід коефіцієнта поглинання світла речовиною. Ділянка 1-2 і 3-4 відповідають нормальній дисперсії

$dn/d\lambda < 0$ . На ділянці 2-3 дисперсія є аномальною  $dn/d\lambda > 0$ . В області 1-2 показник заломлення менший одиниці.

В різних ділянках спектра дисперсія характеризується тією зміною показника заломлення, яка припадає на одиничний інтервал довжин хвиль. Ця величина  $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$  називається **середньою дисперсією** для ділянки спектра  $\lambda, \lambda + \Delta \lambda$ .

У довідникових таблицях показники заломлення речовини даються для жовтої лінії натрію  $\lambda_D = 0,5893$  мкм і позначаються  $n_D$ . Середня дисперсія визначається за синьою  $\lambda_F = 0,4861$  мкм і червоною  $\lambda_C = 0,6563$  мкм лініями водню і позначається  $n_F - n_C$ . Величина  $(n_F - n_C)/(n_D - 1)$  називається **відносною дисперсією**, обернена їй величина – **коефіцієнтом дисперсії**.

Оскільки показник заломлення, згідно теорії Максвелла, визначається відношенням швидкостей світла у вакуумі і даному середовищі  $n = c/v$ , то, очевидно, в середовищі (згідно рис.1) швидкість червоного світла, яке заломлюється, буде найбільшою, а фіолетового – найменшою. У вакуумі швидкість світла будь-якого кольору однакова.

Зауважимо, що відсутність дисперсії світла у міжзор'яному просторі засвідчує, що цей простір можна вважати вакуумом. Із кількісного боку, дисперсія світла задовільно описується класичною теорією. Суть її зводиться до врахуванні впливу на середовище вимушених коливань електронів, що збуджуються електричним полем світлової хвилі. Йдеться про зовнішні, так звані оптичні електрони атомів; електрони внутрішніх оболонок через великі власні частоти практично не збуджуються

## Визначення показника заломлення скла для різних довжин хвиль видимого світла

В даній роботі визначається залежність  $n(\lambda)$  для скляної призми за допомогою визначення мінімального кута відхилення променя певного кольору при проходженні його через скляну призму. Вибирається така конфігурація падаючого на призму променя і самої призми, щоб кут відхилення був мінімальним. Для такого випадку отримується найбільш зручна формула для визначення показника заломлення певного кольору світла. Цей випадок заломлення променя світла в призмі детально розглянутий в підручнику [3]. Приведемо рисунок цього випадку для призми, в основі якої є правильний трикутник із заломним кутом  $\varphi = 60^\circ$ . Кут відхилення  $\delta$  буде мінімальним, коли кут падіння на грань призми 1 -  $\alpha$  буде дорівнювати куту заломлення на грані 2 призми -  $\psi$ . В цьому випадку промінь всередині призми буде

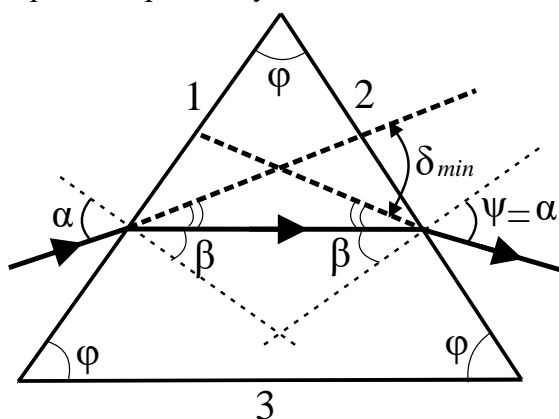


Рис.3.

паралельний грані 3 призми, що показано на рис.3. Саме для такого випадку показник заломлення скла призми можна визначити за формулою:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\varphi + \delta_{min}}{2}\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}}. \quad (1)$$

Так як має місце дисперсія  $n(\lambda)$ , то кут відхилення  $\delta_{min}$  буде залежати від довжини хвилі світла. Тому в даній

лабораторній роботі визначається  $\delta_{min}$  для різного кольору ліній спектра випромінювання ртуті, а за формулою (1) визначається показник заломлення скла призми  $n$  для кожної лінії з заданою довжиною хвилі.

## Метод визначення групової швидкості світла

Зв'язок між фазовою (тобто швидкістю поширення постійної фази, або інакше кажучи швидкістю гармонійної хвилі  $v = \omega/k$ ) і груповою (тобто швидкістю максимальної амплітуди, або інакше кажучи швидкістю перенесення енергії групою хвиль  $v_{гр} = \frac{d\omega}{dk}$ ) швидкостями наступний (див. інструкцію до роботи):

$$v = v_{гр} + \lambda \frac{dv}{d\lambda}, \quad (2)$$

де фазова швидкість

$$v = c/n(\lambda) \quad (3)$$

в дисперсійному середовищі залежить від  $\lambda$ . В (3)  $c$  - швидкість світла у вакуумі однакова для всіх його кольорів. Постараємось отримати експериментально залежність фазової швидкості  $v$  від довжини хвилі в середовищі

$$\lambda = \lambda_0/n(\lambda), \quad (4)$$

де  $\lambda_0$  - довжина хвилі у вакуумі.

Із (2) і (3) видно, що якщо ми визначимо показник заломлення  $n$  середовища (наприклад, скла) для різних довжин хвиль світла, то фазова швидкість  $v$  для кожного кольору світла буде визначатись за формулою (3), а довжина хвилі  $\lambda$  кожного кольору світла за формулою (4).

**Примітка.** Довжини хвиль  $\lambda_0$  кожного кольору світла у вакуумі (повітрі) відомі з довідникових даних.

Вважаємо, що ми експериментально визначили фазову швидкість для кожного кольору видимого світла. Згідно формули (2) вона повинна бути лінійною (в

прийнятому для хвильового пакету наближенні, що  $v_{гр}$  є стала величина для даного пакету хвиль). За експериментальними значеннями  $v$  і  $\lambda$  побудуємо графік  $v(\lambda)$ , який схематично показаний на рис.4. (**Примітка.** Початок координат по осі довжин хвиль  $\lambda$  обов'язково повинен починатись з 0.) Чорні точки - це експериментальні дані. Згідно формули (13) ця залежність повинна бути лінійною. Тому поміж точками проводимо пряму лінію, щоб з однієї сторони прямої лінії і з другої, по можливості, була однакова кількість експериментальних точок. Екстраполюємо цю пряму лінію до перетину з віссю фазової швидкості  $v$  (пунктирна лінія на рис.4). Пунктирна лінія перетинає вісь

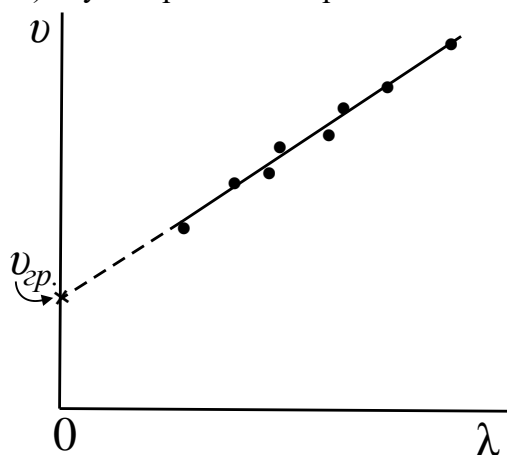


Рис.4.

фазової швидкості  $v$  в точці з координатами  $(\lambda = 0; v = v_{гр})$ . Так графічно визначаємо групову швидкість хвильового пакета видимого світла.

Для перевірки отриманого графічно значення групової швидкості використовується метод найменших квадратів. Для цього можна користуватися програмою Microsoft Excel і файлом, який приводиться в додатках. Ця програма крім значення групової швидкості дозволяє визначити ще і її середню квадратичну похибку середнього арифметичного, яку можемо прийняти за невизначеність типу А.

## Експериментальна частина

### Прилади і приладдя

Ртутна лампа, гоніометр, таблиця значень довжин хвиль спектральних ліній атомів ртуті.

### Експериментальна установка

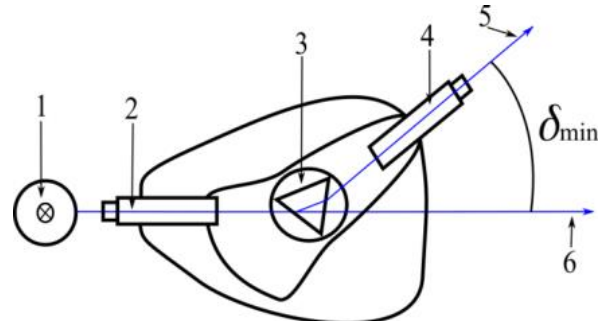


Рис. 5. Схема гоніометра (вид згори). Схематично показано хід променя і його відхилення призмою. Тут  $\delta_{min}$  — кут відхилення променя від його початкового напрямку; 1 - ртутна лампа; 2 - коліатор; 3 - столик з призмою; 4 - зорова труба; 5 - відхилений призмою промінь; 6 - невідхилений промінь.

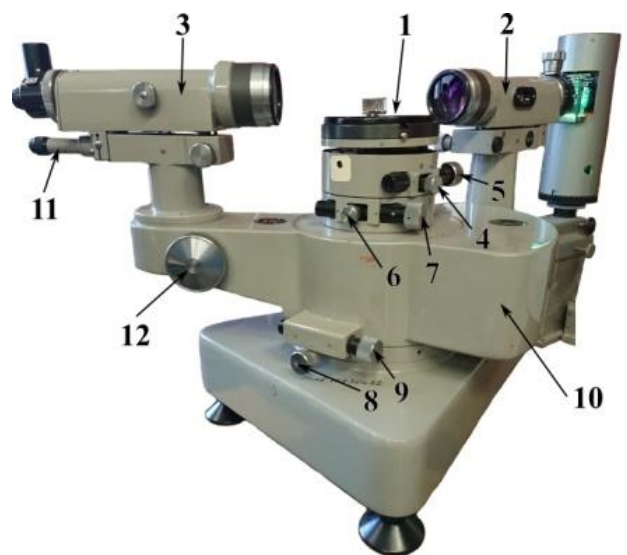


Рис. 6. Гоніометр: 1 — столик; 2 — коліатор; 3 — зорова труба; 4 і 5 — гвинт і мікрогвинт для задання положення столика; 6 і 7 — гвинт і мікрогвинт для встановлення кута початку відліку; 8 і 9 — гвинт і мікрогвинт для повороту аліади з зоровою трубою; 10 — аліада; 11 — окуляр мікроскопа; 12 — маховичок.

### Порядок виконання роботи

1. Увімкнути ртутну лампу.

2. Переміщуючи зорову трубу, спіймати промінь, що йде на пряму від щілини. Сумістити центр перехрестя сітки зорової труби із серединою зображення щілини коліматора. За відліковим мікроскопом згідно інструкції на робочому місці дістати відлік кута  $\delta_0$ .
3. Визначити кут  $\delta_i$  для кожної з вказаних в таблиці на робочому місці ліній випромінювання ртуті. Для цього переміщуючи зорову трубу, сумістити центр перехрестя сітки зорової труби із серединою вимірюваної лінії спектра. За відліковим мікроскопом дістати відлік кута  $\delta_i$ . Повторити вимірювання для інших ліній в спектрі. Визначити кути найменшого відхилення  $\delta_{min}$  для кожної з ліній випромінювання за формулою

$$\delta_{min} = \delta_i - \delta_0,$$

і результати занести до таблиці 1.

**Більш детально методика вимірювання кута найменшого відхилення  $\delta_i$  розглянута в інструкції до роботи (див. літературу б).**

4. Знаючи, що заломлюючий кут призми  $\varphi=60^\circ$ , розрахувати  $n(\lambda)$  за формулою (1),  $\lambda$  за (4) і  $v$  за (3).
5. Нанести на графік експериментальні точки  $v(\lambda_i)$  і провести на ньому пряму як показано на рис.4.
6. Визначити групову швидкість  $v_{гр}$  за методом описаним вище.
7. Оцінити похибку  $v_{гр}$  (використавши дані математичної обробки результатів експерименту).
8. Порівняти отримане значення  $v_{гр}$  із середнім значенням фазової швидкості для розглянутих кольорів світла. Пояснити, чому вони різні за величиною.

**Таблиця даних залежності показника заломлення  $n$  і фазової швидкості  $v$  від довжини хвилі**

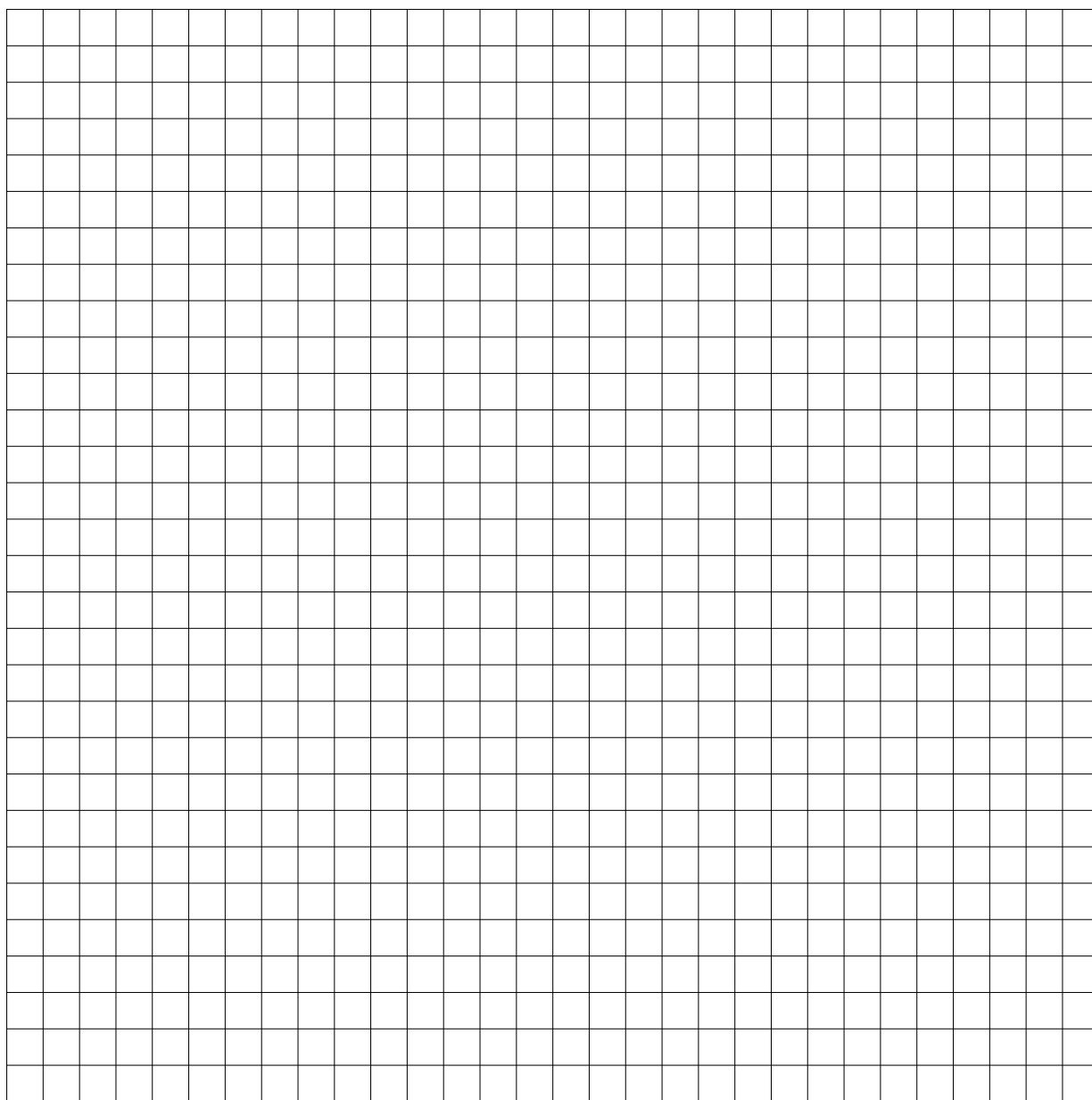
Таблиця 1

№ П/П	$\lambda_0, \text{Å}$	$\delta_{min}$	$n(\lambda)$	$\lambda, \text{Å}$	$v, \text{м/с}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

**Формули та приклад розрахунків:**

**Графік залежності фазової швидкості  $v$  від довжини хвилі  $\lambda$**

$v$



$\lambda$

## Аналіз отриманих результатів та висновки :

### Контрольні питання

1. Дайте визначення фазової швидкості хвиль.
2. Коли має місце дисперсія хвиль?
3. Що називається дисперсією світла? Як вона наочно проявляється?
4. Які види дисперсії світла бувають в середовищі?
5. Що таке кут найменшого відхилення променя призмою  $\delta_{min}$ ?
6. Як визначається показник заломлення скла  $n(\lambda)$  в даній роботі?
7. Як визначається фазова швидкість монохроматичного світла в середовищі?
8. Чому виникає поняття групової швидкості при розповсюдженні хвиль в дисперсійному середовищі?
9. Як визначається теоретично групова швидкість хвиль (світла) в дисперсійному середовищі?
10. Чи завжди групова швидкість світла в дисперсійному середовищі менша фазової швидкості окремих монохроматичних хвиль?
11. Як визначається довжина хвилі монохроматичного світла в середовищі?
12. При якій умові фазова швидкість монохроматичного світла лінійно залежить від її довжини хвилі?
13. Перенесення якої фізичної величини світла в просторі характеризує групова швидкість? Відповідь пояснити.
14. Який метод визначення групової швидкості використовується в даній лабораторній роботі?
15. Як визначається показник заломлення скла для різних довжин хвиль монохроматичного світла в даній лабораторній роботі?
16. В якій області дисперсійної кривої для показника заломлення не можна використовувати поняття групової швидкості? Поясніть чому.
17. Як виводиться робоча формула (1) даної лабораторної роботи?

18. Як проводяться виміри кутів (градусів, хвилин і секунд) на гоніометрі?
19. Для чого в лабораторній роботі використовується ртутна лампа?
20. Для чого в даній лабораторній роботі використовується скляна призма?

### Література

1. Лопатинський Е.С., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. **Підручник**. – Львів: Афіша, 2009.-386с.
2. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): **Підручник** /: Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.513с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. "Наука"-М., 1980г., 752 с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика. - К: Техніка, 1999.
5. Лінчевський І.В. Лабораторний практикум. Навч. посібник для здобувачів третього рівня освіти (доктор філософії) -К.: Вид-во "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2021. - 29 с. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42008/1/Mahnitooptyka\\_LabPrakt.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42008/1/Mahnitooptyka_LabPrakt.pdf)
6. Скіцько І.Ф., Корнієнко Є.Г. Вивчення дисперсії світла та визначення групової швидкості світла в склі: **Інструкція до лабораторної роботи** [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 125 «Кібербезпека», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» /; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ :КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2021.-29 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45713> .
7. Файл Microsoft Excel з методом найменших квадратів для самоперевірки. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1LH8j3OjEdNfLoRY6yzCBLpQ0Tv5gtBao/edit?usp=sharing&ouid=104391245211328772256&rtpof=true&sd=true>
8. **6.** Скіцько І.Ф., Корнієнко Є.Г. Вивчення дисперсії світла та визначення групової швидкості світла в склі: Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 125 «Кібербезпека», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» /; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1файл:1,34Мбайт). – Київ :КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2021.-29 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45713> .

### ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри загальної фізики

Протокол № 2 від 12.10.2021р.

Протокол до даної лабораторної роботи

підготували доцент І.Ф.Скіцько та

канд.фіз.-мат. наук, ст. викладач

Є.Г Корнієнко.