

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

І.Ф.СКИЦЬКО, Н.М.БРУКВА

**Вивчення спектру випромінювання
водню**

Навчальний посібник
(інструкція до лабораторної роботи)

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Безпека державних інформаційних ресурсів» за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації», освітньою програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 539.1

C42

Укладачі: Скіцько Іван Федорович, канд.фіз.-мат. наук, доцент,
Бруква Наталія Миколаївна, старший викладач.

Рецензент: Савченко Д. В. д-р фіз.-мат. наук, доцент, в.о. зав. кафедри ЗФ та моделювання фізичних процесів КПП ім. Ігоря Сікорського.

Відповідальний редактор: Лінчевський І. В. д.ф.-м. н., професор, професор кафедри загальної фізики КПП ім.Ігоря Сікорського.

Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 5 від 06.03.2025 р.) за поданням вченої ради фізико-математичного факультету (протокол № 3 від 04.02.2025 р.)

C42 Скіцько І.Ф. Бруква Н.М. «Вивчення спектру випромінювання водню»: Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Безпека державних інформаційних ресурсів» за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації» та освітньою програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»./ КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1119 КБ). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025 . – 32 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73270>

Посібник забезпечує проведення лабораторної роботи: «Вивчення спектру випромінювання водню» за програмою навчальної дисципліни “Фізика”. Детально розглядається теорія лабораторної роботи, методика проведення дослідження і обробки результатів вимірювань.

Призначений для студентів-здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 125 «Кібербезпека та захист інформації» та спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» буде корисним і для студентів інших технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 539.1

Реєстр. № НП 24/25–287. Обсяг 2,02 авт. арк.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056 <https://kpi.ua>.

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© І.Ф.Скіцько, Н.М.Бруква, 2025

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025

Вивчення спектру випромінювання водню

Мета роботи

1. Вивчити борівську теорію будови атома водню.

2. Ознайомитися з таблицею спектральних ліній випромінювання атома ртуті.

3. Ознайомитися з принципом роботи універсального монохроматора УМ-2.

4. За допомогою відомих значень довжин хвилі спектральних ліній атома ртуті побудувати градувальний графік монохроматора.

5. За допомогою монохроматора спостерігати за спектром випромінювання атомів водню і визначити довжини хвиль трьох спектральних ліній в поділках барабана монохроматора.

6. За допомогою градуального графіка перевести значення довжин хвиль спектральних ліній водню в поділках барабана монохроматора в числові значення в прийнятих одиницях вимірюван-

ня довжин хвиль видимого діапазону спектру.

7. За допомогою формул теорії Бора розрахувати теоретичні значення довжин хвиль цих спектральних ліній атома водню.

8. Порівняти експериментальні і теоретичні значення довжин хвиль спектральних ліній спектру водню.

9. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості

Електричний розряд в трубці, яка містить одноатомний газ під низьким тиском, є джерелом світла, аналіз якого за допомогою дифракційної решітки або спектрографа з призмою, дозволяють виявити серію дуже чітких ліній випромінювання. Ці лінії, які характеризують газ, що використовується в трубці, називають лінійчастим спектром даного газу. Якщо в розрядній трубці ви-

користовується азот, то отримається так званий смугастий спектр, який містить дискретні групи тісно розташованих ліній. Цей смугастий спектр характеризує двохатомні молекули N_2 і має інше походження порівняно з лінійчастими спектрами. Біле світло від джерела випромінювання з ниткою розжарення характеризується суцільним спектром і містить неперервний набір довжин хвиль. Якщо таке світло пропускати через одноатомний газ, наприклад водень, то виникає спектр поглинання. При цьому на спектрограмі отримується спектр з темними лініями на світлому фоні. Положення цих ліній відповідає довжинам хвиль яскравих спектральних ліній випромінювання водню, тобто газ поглинає падаюче випромінювання саме з такими довжинами хвиль.

Дослідження атомних спектрів започаткували ще 1860 року, коли була опублікована праця Г. Кірхгофа і Р. Бунзена «Хімічний аналіз за допомогою спостереження спектра». У наступні роки такі дослідження здійснювались доволі інтенсивно. Було встановлено характерну ознаку атомних спектрів – їхню дискретність. Спектри складаються з набору вузьких смуг (ліній) певної частоти. Так, наприклад, у видимій ділянці спектра найпростішого хімічного елемента атомарного водню попадає лише чотири лінії, які прийнято позначати $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$.

Упродовж двох десятиріч років інтенсивних досліджень атомних спектрів було накопичено величезну кількість експериментального матеріалу, складені

докладні таблиці. Проте у великому масиві даних не вдавалося встановити якусь закономірність, хоча було зрозуміло всім дослідникам, що в цих таблицях захована повна інформація про будову атома.

Перші вагомі успіхи у класифікації атомних спектрів, зокрема водню, були отримані 1885 року. Як це не дивно, але певне значення тут мали ідеї античної філософської піфагорійської школи. Послідовники цієї школи стверджували, що гармонія Всесвіту завдячує містичній ролі цілих чисел у природі. Під впливом ідей піфагорійців перебував з юних років і Й.Бальмер (1825 – 1898) – учитель фізики жіночої гімназії м.Базеля (Швейцарія). Впродовж багатьох років він шукав закономірності у сукупності атомних спектрів, вважаючи, що

цілі числа мають тут мати не останнє значення.

Докладно аналізуючи спектральні лінії $\{H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}, H_{\delta}\}$ атома водню у видимій ділянці, Й.Бальмер зауважив, що вони розташовані не випадково, а утворюють серію довжин хвиль, яку можна описати єдиною формулою.

$$\lambda = \lambda_0 \frac{k^2}{k^2 - 4}, \quad (1)$$

де $\lambda_0 = 3645,6 \text{ \AA}$ – емпірично визначена постійна, а $k = 3, 4, 5, \dots$ – цілі числа.

Формула (1) настільки точно описувала довжини хвиль ліній у видимій ділянці спектра атома водню, що на неї відразу звернули увагу. Стало зрозумілим, що за цією простою емпіричною формулою криється глибокий фізичний зміст. По суті, з формули Й. Бальмера починається

ся справжня наука про атоми та їхню внутрішню електронну будову.

Незабаром було звернута увага на те, що формула (1) стає прозорішою і змістовнішою, якщо її переписати не для довжин хвиль, а через частоти, використовуючи співвідношення між частотою і довжиною електромагнітної хвилі $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$, тоді

$$\omega = R_{\omega} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (2)$$

або

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (3)$$

де $R_{\omega} = \frac{8\pi c}{\lambda_0} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$, а $R_{\lambda} = \frac{4}{\lambda_0} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Постійні величини R_{ω} і R_{λ} називають *сталими Рідберга*. За формулою (3) можна розрахувати довжини хвиль спектральних ліній в серії Бальмера. Для $k=3$ $\lambda=6,563 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

(червона лінія H_{α}), для $k=4$ $\lambda=4,861 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (голуба лінія H_{β}), для $k=5$ $\lambda=4,339 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (голуба лінія H_{γ}), для $k=6$ $\lambda=4,101 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ (фіолетова лінія H_{δ}). При $k=\infty$ ми отримуємо границю серії, наприклад, для серії Бальмера $\lambda = 4/R_{\lambda} = 3,645 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Спектральні серії водню
Табл.1

Серія	Область спектру	Формула серії	Границя серії ($k=\infty$), $\lambda: 10^6 \text{ м}$
Лаймана	Ультрафіолетова	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=2,3,4 \dots$	0,91127
Бальмера	Видима	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=3,4,5 \dots$	3,6456
Пашена	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=4,5,6 \dots$	8,2014
Брекетта	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=5,6,7 \dots$	14,580
Пфунда	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=6,7,8 \dots$	22,782
Хемфрі	Інфрачервона	$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ $k=7,8,9 \dots$	32,806

Пізніше подібна аналітична залежність спостерігалась в інших, ультрафіолетовій та інфрачервоній, ділянках спектра ато-

марного водню. Всіх їх можна об'єднати в так звану *узагальнену формулу Бальмера*.

$$\omega_{nk} = R_{\omega} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (5)$$

де $n=1,2,3,4,\dots$ визначає серію, а $k=n+1, n+2, n+3, \dots$ визначає окремі лінії серії (Табл.1).

Якщо ввести у формулі (4) позначення $T_n = R_{\omega}/n^2$, яке називається термом, то частоту будь-якої лінії спектра водню можна подати як різницю між двома термами, а саме

$$\omega_{nk} = T(n) - T(k). \quad (6)$$

На перший погляд може здатися, що введення поняття терма є тривіальним, не більше ніж перепозначення. Насправді це не так. Подання частоти як різниці двох термів мало вагомі наслідки для подальшого розвитку теорії атомних спектрів. Важ-

ливо, що емпірична формула (4) записана для атома водню. Проте залишалося нез'ясованим питання про принципову можливість написання подібної простої формули для класифікації спектральних ліній складніших атомів. Враховуючи запис частоти спектральної лінії атома водню у формі (6), Й.Рідберг надав спектральним лініям різних елементів форму комбінації термів, застосувавши для терма емпіричну формулу.

$$T(n) = \frac{R}{(n + \alpha + \frac{\beta}{n^2})^2}.$$

Тут α, β – дійсні числа, які мають значення емпірично підібраних параметрів. На підставі такої формули вдалося здійснити класифікацію спектральних ліній багатьох елементів хімічної таблиці.

Продовжуючи дослідження Й. Рідберга, в 1905р. В. Рітц сформулював комбінаційний принцип, за яким будь-яку спектральну лінію будь-якого атома можна подати як різницю термів. Неважливо чи відомі аналітичні вирази для термів. Набір спектральних ліній атомів, виглядаючи на перший погляд хаотичною сукупністю, розпався на цілком визначені серії із чіткими закономірностями їх розташування. Замість великої кількості спектральних ліній достатньо знати набагато меншу кількість термів. Правда, комбінуючи терми, можна передбачувати спектральні лінії, які насправді не спостерігалися. Згодом з'ясувалося, що у спектрі відсутні окремі спектральні лінії через так звані правила відбору, які чітко були встанов-

лені та обґрунтовані квантовою теорією.

В результаті виконаної класифікації спектрів стало зрозуміло, що спектральні закономірності мають фундаментальний характер і визначаються внутрішньою будовою атома. Однак встановити зв'язок структури спектра з будовою атома та фізичними процесами на атомному рівні не вдавалося впродовж багатьох років. Лише 1913 року у цій проблемі було досягнуто ясності.

Постулати Бора. Теорія атома водню

Як вже зазначалося, планетарна модель атома не узгоджувалася із законами класичної електродинаміки. Рух електрона по замкнутих орбітах навколо ядра є прискореним. За законами класичної електродинаміки пришвидшений рух заряду завжди супро-

воджується випромінюванням електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі переносять енергію, тому електрон, втрачаючи енергію на випромінювання, має впасти на ядро. Ніхто не міг спростувати цей важливий наслідок законів електродинаміки. Проте існування стабільних атомів також є незаперечним фактом. Данський фізик Нільс Бор перший дійшов висновку, що протиріччя моделі Резерфорда з класичною електродинамікою можна усунути лише тоді, коли відмовитися від класичного (ньютонівського) опису руху електрона по замкнутих орбітах у планетарній моделі атома.

На початку лютого 1913р. суто випадково Н.Бор зустрів студентського приятеля Ханса Хансена, який розказав йому про спектральні формули Бальмера,

Рідберга, Рітца. Н.Бор згадував: «Як тільки я побачив формулу Бальмера, мені все одразу ж стало ясно» Приймаючи гіпотезу Планка про кванти енергії, формулу (4) помножимо на сталу планка $\hbar$. Тоді вона переписеться так:

$$\hbar\omega_{nk} = \frac{\hbar R_{\omega}}{n^2} - \frac{\hbar R_{\omega}}{k^2},$$

або

$$\hbar\omega_{nk} = |W_n| - |W_k|, \quad (7)$$

де $\hbar\omega_{nk}$ – квант енергії випромінювання дорівнює різниці двох значень енергії атома водню (W_k – енергія до випромінювання, W_n – енергія після випромінювання).

Для усунення протиріччя планетарної моделі атома із законами класичної електродинаміки Нільс Бор припустив, що, рухаючись по орбіті, електрон не випромінює електромагнітні хвилі,

а залишається на орбіті достатньо тривалий час. Упродовж 1913 року Н.Бор опублікував три праці, в яких він сформулював свої знамениті постулати.

З цього приводу американський фізик (один із творців теорії надпровідності) Леон Купер сказав: «Звичайно, було дещо самонадіяно висувати припущення, які протирічили електродинаміці Максвелла і механіці Ньютона, але Бор був молодим».

ПОСТУЛАТ 1 (Про стаціонарні стани).

Атоми можуть перебувати тільки у визначених станах, в яких, попри рухи електронів по замкнутих дискретних орбітах, вони не випромінюють енергію. У цих станах атоми мають енергію, яка утворює дискретний ряд: $W_1, W_2, \dots, W_n, \dots$. Ці стани характеризуються стійкістю:

будь-яка зміна енергії W_n завдяки випромінюванню чи поглинанню електромагнітного випромінювання або інших форм обміну атома енергією може відбуватися у разі повного переходу із одного стану в інший.

За цим постулатом електрони під час руху навколо ядра майже весь час перебувають на стабільних, незалежних від часу орбітах, які мають цілком визначену енергію. Такі орбіти називають *стаціонарними*.

Далі, для пояснення спектральних закономірностей, зумовлених процесами поглинання і випромінювання електромагнітних хвиль пропонується такий постулат.

ПОСТУЛАТ 2 (Правило частот).

У разі переходу з одного стаціонарного стану в інший

атоми випромінюють чи поглинають електромагнітні хвилі визначеної частоти. Випромінювання, що висилається або поглинається у разі переходу із стаціонарного стану W_k у стаціонарний стан W_n , є монохроматичним і його частота визначається співвідношенням:

$$\omega_{nk} = \frac{|W_n| - |W_k|}{\hbar}. \quad (8)$$

Теорія Бора, побудована на сформульованих постулатах, блискуче пояснила структуру спектральних ліній атома водню. Власне, Н. Бор і брав за основу ці експериментальні дані під час формулювання своїх постулатів. Тому відразу постало питання про безпосередні, незалежні підтвердження постулатів Бора, про наявність стаціонарних станів та правил переходу між ними.

Покажемо, слідом за Бором, до яких наслідків призводять сформульовані постулати для атома водню. Рівняння (17.3)[1]

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

руху електрона в атомі водню допускає безмежну кількість замкнутих колових орбіт. Постає питання про існування стаціонарних орбіт серед безмежної кількості можливих. Перший постулат Н. Бора стверджує, що стаціонарні орбіти існують. Тоді відразу таке запитання: «А як стаціонарні орбіти вирізнити з поміж безмежної кількості всіх можливих, що задовольняють співвідношенню (17.3) [1]». Ось тут Н. Бор зрозумів, а можливо і вгадав, як відповісти на це запитання. І ця відповідь була простою, тому і геніальною.

Уже від 1905 року в науці утвердилися і завоювали визнання квантові ідеї, про що йшлося у попередньому розділі. Нагадаємо, що стала Планка h має розмірність дії і на початку названа Планком квантом дії. Але ж поняття дії у класичній механіці відоме ще з часів Гамільтона і Лагранжа. Розмірність дії має орбітальний момент імпульсу $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$.

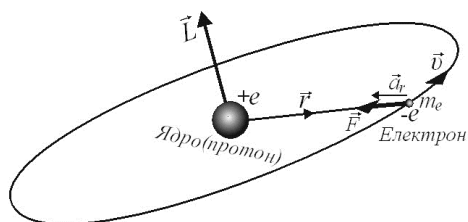


Рис.1.

$\vec{L}$ ще називають моментом кількості руху. Він перпендикулярний як радіусу-вектору $\vec{r}$ так і вектору кількості руху $m\vec{v}$ (рис.1). Величина орбітального моменту імпульсу для колового

руху електрона навколо силового центру (ядра) є $L = m_e r v$ (рис.1).

Бор відчував, що є глибинний зв'язок між двома "мінімальностями" в природі:

— існуванням найменшої величини для розмірів "електронного рою" в атомі. Меншою ця величина бути не може;

— існуванням найменшої величини для фізичної дії, менше якої не буває.

Весною 1912р. Бор дійшов висновку, що будова "електронного рою" в резерфордовському атомі управляється квантом дії — сталою Планка " $\hbar$ ".

Отже, коли фізична величина має розмірність дії, то найменше числове значення, яке вона може набувати дорівнює сталій Планка, а більші значення —

кратні сталій Планка. Після тривалих міркувань і розрахунків Н.Бор дійшов висновку, що стаціонарні можуть бути лише ті колові орбіти, для яких орбітальний момент імпульсу кратний $\hbar$:

$$m_e r v = n \hbar . \quad (9)$$

Ціле число n називається квантовим числом.

Рівняння (6) і (9) утворюють систему двох рівнянь з двома невідомими r і v . Розв'язок цієї системи дає, що:

$$v_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar n} , \quad (10)$$

а

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} n^2 , \quad (11)$$

де $n=1,2,3, \dots$.

Тут у позначені радіуса орбіти введений індекс n , щоб підкреслити залежність радіуса від цього квантового числа.

Радіус r_1 , найменшої колової орбіти для атома водню, позначається як a_0 :

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,53 \text{ \AA} . \quad (12)$$

і називається *радіусом Бора*. У певному розумінні радіус Бора a_0 визначає розміри атома водню. Задовго до створення теорії Бора розміри атома водню були оцінені експериментально. Теоретичне значення радіуса Бора (12) виявилось доволі близьким до експериментального значення радіуса атома водню. Це було ще одним аргументом на користь теорії Бора.

Енергію електрона у кулонівському полі ядра, заряд якого $|e|$, отримаємо, підставивши значення радіусів орбіт (11) у формулу (17.6) [1]. Тоді

$$W_n = -\frac{e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV.} \quad (13)$$

Стан атома із найменшим значенням енергії ($n=1$) називається основним. Для атома водню основному стану згідно (13) відповідає енергія $W_1 = -13,6 \text{ eV}$. Відповідно до другого постулату (8) для атома водню частоти переходу із стану W_k у стан W_n будуть:

$$\begin{aligned} \omega_{kn} &= \frac{1}{\hbar} (|W_n| - |W_k|) = \\ &= \frac{e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Порівняння останнього виразу з узагальненою формулою Бальмера (4) засвідчує, що вони повністю збігаються, якщо стали Рідберга вибрати такою, що дорівнює

$$R_\omega = \frac{e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}. \quad (15)$$

Отримане значення R_ω співпадає з експериментальним значенням. Це був успіх теорії Бора.

Зобразимо енергетичні рівні (рис.2), що описуються формулою (13), у вигляді ліній, на яких цифри визначають квантові стани n . За початок відліку прийнятий

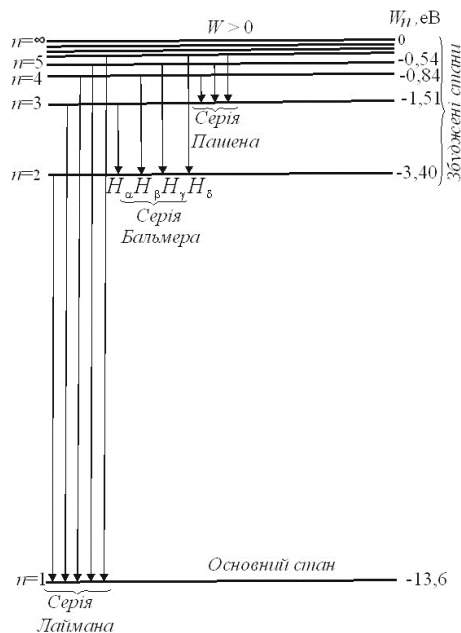


Рис.2.

стан з $n \rightarrow \infty$, який позначимо $W=0$. Електрон з енергією $W > 0$ здійснює необмежений (інфініт-

ний) рух у полі атомного ядра за гіперболічними траєкторіями. За такого руху електрон може мати довільне додатне значення енергії. Коли $W < 0$, то електрон здійснює обмежений (фінітний) рух по замкнених орбітах, а його енергії можуть мати тільки дискретні значення (13).

Стан $n=1$ відповідає основному (нормальному) стану електрона, а всі стани з $n \geq 2$ – відповідають збудженим його станам. Вертикальні стрілки, спрямовані догори, відповідають переходам між відповідними станами з поглинанням атомом енергії, а в зворотньому напрямку (рис.2) – з випромінюванням енергії за другим постулатом Бора.

Із формули (13) і рис.2 видно, що якщо атом знаходиться в основному стані ($n=1$), то для

видалення електрона із атома необхідна енергія 13,6 еВ. Отже, енергія зв'язку і енергія іонізації для атома водню, який знаходиться в основному стані, дорівнюють $W_{зв} = W_{іон} = 13,6 \text{ еВ}$. За допомогою схеми на рис.2 легко пояснити виникнення серіальних спектральних ліній в табл.1.

Воднеподібні атоми

Теорію Бора можна з успіхом використати і при розгляді воднеподібних атомів, тобто атомів, які складаються із ядра з зарядом Ze і одного електрона. До таких атомів належать один раз іонізований атом гелію He^+ ($Z=2$), два рази іонізований атом літію Li^{2+} ($Z=3$) і т.д.

Для воднеподібних атомів радіуси дозволених орбіт електрона визначаються за формулою

$$r_n = a_0 n^2 / Z, \quad (16)$$

яка подібна до формули (11). Енергія електрона на орбіті визначається за формулою

$$W_n = -\frac{13,6Z^2}{n^2} \text{ eV}, \quad (17)$$

яка отримується із формули (13).

Таким чином, теорія Бора пояснила зміст відомих на той час (1913р.) серіальних формул і передбачила ще серії в інфрачервоній області спектра, які пізніше були виявлені експериментально. Стала Рідберга, яку отримали з теорії Бора, дивовижно добре узгоджується з експериментальним значенням цієї величини. Це говорить про те, що теорія Бора правильно описує будову атома водню.

Теорія Бора була важливим кроком в розвитку теорії атома. Вона показала непридатність класичної фізики для пояснення внутрішньотамних явищ і голов-

ну роль квантових законів у мікросвіті. Разом з тим теорія Бора опиралась на класичну механіку і не була ні послідовно класичною, ні послідовно квантовою і могла бути тільки перехідним станом на шляху створення послідовної теорії атомних явищ. Н.Бор у своїй теорії об'єднав резерфордовську модель атома, емпірично встановлені закономірності в атомних спектрах і квантові уявлення про випромінювання.

Робота Бора – одне з гідних подиву явищ в історії науки. Тільки геніальним просвітленням можна пояснити появу цієї теорії до того, як з'ясувались хвильові властивості частинок. Саме з цього приводу Ейнштейн сказав: *«...вища музикальність в області теоретичної думки».*

Опис експерименту

У даній роботі експериментально визначаються довжини хвиль декількох ліній балъмерівської серії в спектрі випромінювання атомарного водню, що спостерігаються у видимій області спектру.

З формули (5) при $n = 2$ отримаємо, що:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\lambda_{2n} R \lambda}}} \quad (18)$$

Визначивши з цієї формули значення k для кожної вимірної лінії випромінювання λ_{2n} , можна віднести її до відповідного електронного переходу в атомі водню, тобто, встановити, з якого рівня k переходить електрон на рівень $n = 2$.

Установка лабораторної роботи показана на рис.3. Для дослідження спектру атомарного

водню в роботі використовується газорозрядна воднева лампа. Це скляний балон з впаяними в нього електродами, який заповнений воднем при низькому тиску. На електроди подається напруга, достатня для часткової іонізації газу, тобто, для появи заряджених частинок – електронів та іонів. Прискорені полем електрони та іони при зіткненні з

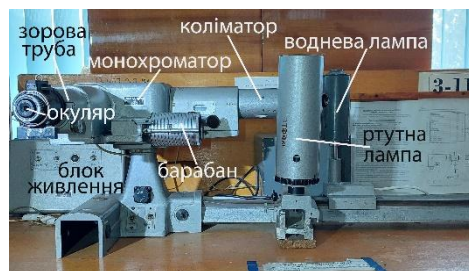


Рис.3. Установка лабораторної роботи.

молекулами H_2 передають їм свою енергію. При цьому молекули або переходять у збуджений стан, або дисоціюють, тобто, розпадаються на окремі атоми. Утворені атоми водню або в процесі розпаду молекул, або внаслі-

док зіткнень теж опиняються у збуджених станах, тобто – на енергетичних рівнях із $k > 1$. При поверненні в незбуджений стан у видимій області випромінюють і атоми H , і молекули H_2 . Тому спектральні лінії атомів H спостерігаються на тлі молекулярного спектра H_2 , який має вигляд

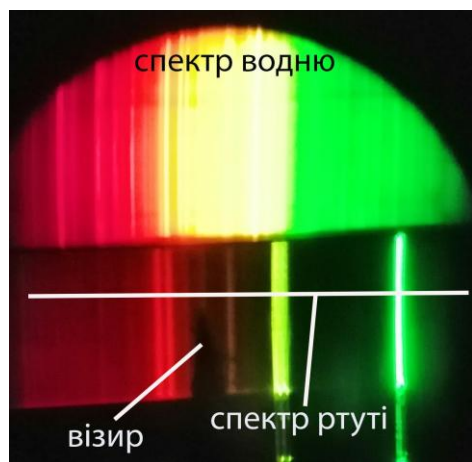


Рис.4. Спектри водню і ртуті в окулярі монохроматора.

широких смуг із великої кількості близько розміщених і відносно слабких ліній (рис.4). При цьому декілька ліній бальмерівської

серії атомів H легко розрізняються, оскільки вони більш яскраві, ніж лінії молекулярного спектра, й розміщені далеко одна від одної.

Удається спостерігати лінії $\{H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta\}$, але лінію H_δ видно не завжди. Приблизне розташування вказаних ліній на шкалі довжин хвиль в ангстремах показано на рис.5.

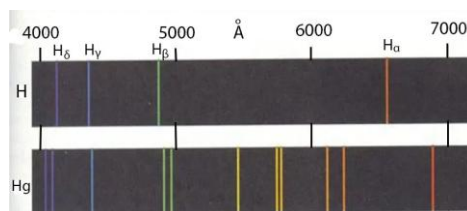


Рис.5. Спектри атомів водню і ртуті.

Для вимірювання довжин хвиль спектральних ліній у даній роботі використовується призмовий монохроматор-спектроскоп УМ-2, призначений для спектральних досліджень у видимій і ближній інфрачервоній областях

спектра в діапазоні довжин хвиль від 3800 Å до 10000 Å ($1\text{Å}=10^{-10}\text{м}$), або від 0,38 мкм до 1 мкм.

Порядок виконання роботи

1. Відповідно до інструкції на робочому місці проградувати монохроматор УМ-2, що означає визначити покази барабана (поділki N) (рис.3), які відповідають яскравим лініям у спектрі випромінювання ртутної лампи (рис.4) з таблиці 2 і скласти таблицю подібну до таблиці 2. (поділki не мають співпадати з наведеними в таблиці 2)

Для градування приладу використовується ртутна лампа ДРШ-250, встановлена під кожухом, який можна переміщати по висоті обертанням накатаного кільця. Лампа ДРШ-250 – потужне джерело світла. Під час робо-

ти в лампі розвивається тиск до 300 Н/см^2 , тому поводитися з нею потрібно обережно.

Таблиця2. Довжини хвиль спектральних ліній атомів ртуті

Довжина хвилі спектральної лінії λ , Å	N , градусні поділki барабана монохроматора
6907	2777
6234	2540
6123	2505
6073	2478
5791	2342
5770	2332
5461	2148
4916	1722
4358	1046
4348	1032
4339	1016
4108	604
4078	548
4046	489
3984	484

2.Визначити покази барабана (поділki N'), що відповідають яскравим лініям у спектрі випромінювання водневої лампи (вони явно виділяються на тлі молекулярного спектру). Знайдені зна-

чення N' для ліній водню занести до таблиці 3.

Таблиця 3

N'				
$\lambda, \text{\AA}$				
k				
k окру- гл.				
$\delta k, \%$				
СИМВОЛ лінії				
$\lambda_{\text{теор}}, \text{\AA}$				
$\delta \lambda, \%$				

Дві відносно слабкі лінії потрібно визначати, спостерігаючи їх одночасно з еталонним спектром ртуті (рис.4). Одна з цих ліній розташована між синіми (середньою та слабкою) лініями спектра ртуті, друга – праворуч, поруч із фіолетовою лінією ртуті.

Обробка експериментальних даних

1.За отриманими даними на аркуші міліметрового паперу по точках побудувати градуювальну криву – графік залежності

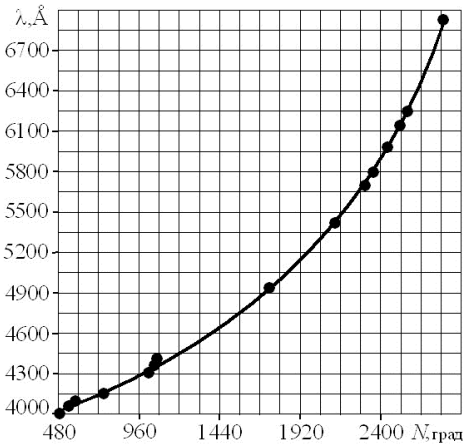


Рис.6. Градувальний графік.

$\lambda = f(N)$. На рис.6 – побудований графік експериментальної залежності $\lambda(N)$. Робоча площа графіка – майже квадратної форми; експериментальні точки займають всю цю площу.

Зуваження. Градувальний графік далі використовується для визначення довжин хвилі

спектру водню. Тому криву $\lambda = f(N)$ треба проводити акуратно, добре загостреним м'яким олівцем і за допомогою лекала, слідкуючи за спряженістю окремих ділянок графіка, або скористатися програмою Excel.

Зауважимо, що початок координат по осі ординат співпадає із значенням $\lambda = 4000\text{\AA}$. Початком осі абсцис (N) є значення показів барабана $N=480$ градусів. Ціна поділки в цьому випадку по осі ординат складає $150\text{\AA}/$ поділку, по осі абсцис 120 град/поділку.

Це означає, що при побудові графіків особливу увагу необхідно звертати на вибір зручного масштабу. В 1мм , 1см або якому-небудь іншому одиничному відрізьку осі графіків, який прийнятий за одиничний, повинно вмі-

щуватись зручне для швидкого підрахунку кругле число одиниць величини, яка досліджується ($0,1$; $0,2$; $0,5$; 1 ; $2,5$; 10 ; 25 ; 50 ; 100 і т.п.). Незручні і неприйнятні такі масштаби при яких в одиничному відрізьку осі містяться числа такі, як, наприклад, $3,17$; $4,23$; $7,465$ і навіть такі числа як 7 ; 9 ; 13 ; 38 ; 593 і т.п. Незручний масштаб приводить до великих втрат часу і може супроводжуватись похибками при нанесенні експериментальних точок при побудові графіка і при його використанні. Вибір зручного масштабу дещо впливає на форму робочого поля графіка, приводить до деякого відхилення від оптимальної квадратної форми, однак цього не варто боятись.

Проте в особливих випадках масштаб і по осі ординат, і по осі абсцис варто вибирати таким,

щоб як можна краще виконати поставлене завдання. В будь-якому випадку вибраний масштаб повинен бути парним числом, щоб його можна було легко поділити по крайній мірі пополювині.

Звертаємо увагу ще на одну корисну властивість графіків. Вони дозволяють швидко виявити помилкові результати, які необхідно відкинути.

2. За допомогою попередньо побудованого грауювального графіка, для кожного значення N' знайти довжину хвилі відповідної лінії випромінювання атомів водню. Результати занести до таблиці 3.

3. За формулою (18) обчислити значення k і занести до таблиці 3, округлити до найближчого цілого та також занести до таблиці.

4. За округленими значеннями k визначити та занести до таблиці також довжини хвиль $\lambda_{\text{теор}}$, які відповідають цим переходам, розрахувавши їх за формулою (5).

5. Зробити висновок про електронні переходи в атомі водню, що відповідають дослідженим лініям випромінювання. Відповідні позначення ліній занести до таблиці 3.

Контрольні питання

1. Схарактеризуйте енергетичний спектр атома водню. В яких станах енергія електрона від'ємна? Додатна?

2. Запишіть формулу для дискретних енергетичних рівнів атома водню, та обчисліть за нею енергію іонізації атома.

3. Чому спектри атомів лінійчаті? Отримайте з формули

для енергетичних рівнів водню узагальнену формулу Бальмера та теоретичний вираз сталої Рідберга.

4. Що таке спектральна серія? Покажіть стрілками на енергетичній діаграмі електронні переходи, що відповідають першим трьом спектральним серіям водню.

5. Запишіть формулу для частот ліній водневого спектра, що утворюють спектральну серію з номером m . Зобразіть характер взаємного розташування ліній однієї спектральної серії у шкалі частот та довжин хвилі (тобто, в полі зору окуляра спектрометра).

6. Запишіть формули для частоти головної лінії та короткохвильової межі спектральної серії з номером m . Розрахуйте ці частоти та відповідні довжини

хвилі для трьох перших серій. Чи перекриваються ці серії?

7. Розрахуйте довжини хвиль головної лінії та межі серії для трьох перших серій спектра атома водню. Лінії якої серії можна спостерігати візуально?

8. Визначте кількість ліній випромінювання атомів водню, які теоретично можна спостерігати візуально, вважаючи видимими лінії в інтервалі $400 \text{ нм} \leq \lambda \leq 750 \text{ нм}$.

Додаток 1. Приклад обробки результатів експерименту.

1. Будуємо градуювальний графік (див. таблиці 4,5,6). Ціна поділки основних ліній горизонтальної осі $N - 100$ поділок барабана, а допоміжних – 20, тому встановити (відмітити) поділки барабана можна з точністю 10 поділок. Такі ж ціни поділок встановлені для вертикальної осі

λ (в ангстремах), тому визначити довжину світлової лінії можна з точністю 10Å.

2. За допомогою градувального графіка, для кожного значення N' визначаємо довжину хвилі відповідної лінії випромінювання атомів водню. Результати заносимо до таблиці 5.

3. За формулою (18) обчислюємо значення k , з врахуванням степенів матимемо:

$$k = 1 / \sqrt{(0,25 - \frac{1000}{6580 \cdot 1,09737})} = 2,99$$

Отримане значення k має бути цілим числом і відрізняється від цілого для $k=3$ на (див. таб.5)

$$\delta_k = \frac{2,99 - 3}{3} 100\% = 0,2\%$$

4. Отримані значення k округлюємо до цілих чисел і за формулою (5) обчислюємо значення $\lambda_{\text{теор.}}$, тоді з врахуванням

степені сталої і розмірності λ отримаємо для $k=3$:

$$\lambda_{\text{теор}} = \frac{1000}{1,09737 \left(0,25 - \frac{1}{9}\right)} = 6561,1\text{Å}$$

Порівняємо отримані значення λ з їх теоретичними значеннями:

$$\delta_\lambda = \frac{6561,1 - 6580}{6561,1} 100\% = 0,3\%$$

Таблиця 4

Значення довжин хвиль спектральних ліній ртутної лампи		Градусні поділки барабана
Спектральна лінія	λ , Å	N
темно-червона	6907	2790
червона-жовтгаряча1	6234	2552
червона-жовтгаряча2	6123	2504
жовтогаряча	6073	2482
жовта1	5791	2346
жовта2	5770	2332
яскраво-зелена	5461	2150
зелено-синя	4916	1722
яскраво-синя	4358	1048
синя, середня	4348	1034
синя, слабка	4339	1019
фіолетова, слабка	4108	618
фіолетова, середня	4078	554
фіолетова, яскрава	4046	490

Таблиця 5.

Назва лінії	H_{α}	H_{β}	H_{γ}
N (градусні поділки барабана)	2680	1664	1026
λ , Å	6580	4870	4340
k	2,99	3,99	5,00
k округл.	3	4	5
δ_k , %	0,2	0,3	<0,1
$\lambda_{\text{теор}}$, Å	6561,1	4860,1	4339,4
δ_{λ} , %	0,3	0,2	<0,1

Висновки:

1. При побудові графіка на міліметровому папері, де в 1 мм міститиметься 20 поділок барабана по горизонтальній осі X , та 20 Å по вертикальній осі Y , якщо прийняти, що можна визначати величини з точністю до 1 мм, то відносні похибки зростуть майже втричі, що все одно буде в межах 5%.

2. Лінії, що візуально спостерігалися в окулярі монохрома-

тора відповідають переходу атома водню:

перша – з третього рівня на другий та позначається – як H_{α} ,

друга – з четвертого рівня на другий та позначається – H_{β} ,

третья – з п'ятого рівня на другий та позначається – H_{γ} .

Додаток 2. Приклад обробки результатів експерименту за допомогою програми Excel.

Відкриваємо програму Excel, або можемо скористатися ексель файлом «Робоча прогр. мет. наймен. квадрат», який окремо додається до завдання, його необхідно *завантажити*, відкрити, створити новий файл для цієї роботи, для цього перейти на вкладку «файл», і натиснути кнопку «запам'ятати як», або відкрити новий файл. Назву файлу обираємо таким чином: номер робо-

ти і ваше прізвище, наприклад: «3-11. Левко».

1. Приступаємо до створення і одночасного заповнення таблиці 2.

Якщо скористалися наданим файлом, то переходимо на другу сторінку, для цього в нижньому лівому кутку натискаємо кнопку «Аркуш 2».

До комірки A9 вписуємо назву таблиці: «таблиця 2».

Стовпчик A міститиме значення довжини хвилі різних спектральних ліній випромінювання ртутної лампи, тому в комірку A10 заносимо літери « λ , Å» – символ довжини хвилі та її розмірність, в комірки A11 – A24, заносимо значення λ з таблиці даних. До комірок B10 заносимо літеру «N » - символ кількості поділок барабана монохроматора, в комірки B11 – B24 – заносимо

відповідні значення з таблиці даних.

2. Приступаємо до побудови градувального графіку $\lambda=f(N)$.

Виділяємо комірки A11 – A24 та B11 – B24, для цього наводимо курсор на комірку A11, затискаємо ліву кнопку миші, зміщуємо курсор на одну комірку вправо та вниз до комірки B24, відпускаємо ліву кнопку миші, натискаємо вгорі кнопки «Вставлення», потім – діаграма «точкова», при цьому появляється вікно з п'ятьма діаграмами і вибрати – «точкова діаграма із гладкими лініями» (при наведенні курсора на кожну з іконок з'являється їхня назва). З'явиться графік на вільних комірках посередині екрану, його варто перенести на комірки E1 – E17 та внести його назву. Для цього на-

тискаємо вгорі кнопку «конструктор», з'являються одинадцять макетів діаграм, для нашого графіка найкраще вибрати перший або восьмий макет. Замість слів «Назва діаграми» пишемо « $\lambda=f(N)$ ». Щоб перенести графік потрібно навести курсор на вільне місце графіку, при цьому він прийме вигляд перехрещених відрізків зі стрілочками на кінцях та появиться віконце з написом «область діаграми», затиснути ліву кнопку миші та встановити на обране місце.

Також можемо змінити розміри графіка; для цього натискаємо на графік, навколо нього з'являється подвійна рамка, яка має вісім активних точок: по кутах і в центрі сторін. Якщо треба збільшити тільки по горизонталі, то наводимо курсор на середину лівої сторони подвійної рамки

(або правої), курсор приймає вигляд горизонтального відрізка зі стрілочками, затискаємо ліву кнопку миші, курсор стає жирним хрестиком, і розтягуємо графік на 3-6 комірок основного поля (або стискуємо). Таким же чином можемо змінювати розмір по висоті, а якщо потягнути за кут, то можемо одночасно змінювати обидва розміри графіка. Оскільки ми будуємо градувальний графік, то його варто збільшити на весь екран монітора та придати більш квадратну форму.

Тепер змінимо масштаб вісі X. Наводимо курсор на будь яке число на осі X, натискаємо праву кнопку миші, з'являється віконце, в якому слід натиснути кнопку «Формат осі», з'являється ще одне віконце, в якому можемо змінити налаштування «автоматично» на «фіксовано»: вибирає-

мо «мінімальне значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найменше округлене значення N з таблиці даних (наприклад 400); вибираємо «максимальне значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найбільше округлене значення N з таблиці даних (наприклад 2800); вибираємо «ціна основних поділок», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо бажану величину (наприклад 100), при цьому автоматично встановлюється «ціна проміжних поділок» - «20», якщо не так, то - прапорець «фіксовано», до віконця записуємо число 20; зліва натискаємо кнопку «тип лінії», натискаємо на віконце справа слів «тип закінчення», та натискаємо на вибрану стрілочку, у

віконечку нижче можемо її збільшити.

Щоб змінити параметри осі Y необхідно навести курсор на любе число цієї осі, натиснути праву кнопку миші, в віконечку, що з'явилося, натиснути кнопку «формат осі», з'явиться ще одне віконце, в якому змінюємо параметри осі Y : «мінімальне значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найменше округлене значення λ з таблиці даних (наприклад 4000); вибираємо «максимальне значення», ставимо прапорець біля «фіксовано» та в комірку записуємо найбільше округлене значення λ з таблиці даних (наприклад 7000); «ціна основних поділок» встановлюємо прапорець «фіксовано», в віконце записуємо число 100; «ціна проміжних поділок» - прапорець «фіксовано», до віконця —

число 20, зліва натискаємо кнопку «тип лінії», вибираємо стрілочку на закінчення лінії та її розмір (такі ж самі як для осі X).

3. Для визначення λ по градувальному графіку необхідно провести ряд побудов: на графіку встановити ряд горизонтальних та вертикальних прямих, для цього натискаємо послідовно кнопки вгорі: «вставлення», «фігури», «лінія», та натискаємо на вільному місці на графіку, з'являється відрізок прямої під кутом $\pi/4$ з двома кільцями на кінцях. Одночасно з'являються засоби креслення, де можна змінити колір цієї лінії (в наведеному прикладі вибрано червоний для синьої основної кривої), наводимо курсор на одне з кілець, курсор при цьому змінює свою форму, натискаємо та встановлюємо на число 1030 (округлене 1026) на осі X,

переводимо курсор на друге кільце, натискаємо та тягнемо його так, щоб лінія стала вертикальною і перетинала градувальну криву.

Добавляємо ще одну лінію як описано в попередньому абзаці, але тепер будемо її встановлювати горизонтально: натискаємо на одне з кілець, при цьому курсор приймає вигляд перехрестя і встановлюємо його в точку перетину вертикальної прямої з кривою, переводимо курсор на друге кільце, натискаємо та тягнемо його так, щоб лінія стала горизонтальною і перетнула вісь Y. Лінія проходить по проміжній лінії сітки, тому беремо ціле число 4340, яке треба занести до таблиці 3.

4. Повторюємо дії описані в пункті 3 для визначення решти ліній.

5. Приступаємо до створення і одночасного заповнення таблиці 3. До комірки A26 вписуємо назву таблиці: «таблиця 3».

В комірку A28 вписуємо літеру «N'», а в решту комірок цього ряду – значення показів барабана (поділки N'), що відповідають яскравим лініям у спектрі випромінювання водневої лампи з таблиці даних.

6. До комірки A29 вписуємо літери « λ , Å» - позначення та розмірність довжини хвилі спектральних ліній випромінювання водневої лампи, а в решту комірок цього ряду – їх значення, які визначаємо по градуовальному графіку.

7. В комірку A30 вписуємо літеру «k», а в комірку B30 - формулу (18), тоді в рядку формул: «=1/(SQRT(0,25-1000/B29/

1,09737)))», яку дублюємо до решти комірок цього ряду.

8. В комірку A31 вписуємо літери «k округ.», а в решту комірок цього ряду – округлені до цілого значення комірок на рядок вище.

9. До комірки A32 записуємо літери « $\lambda_{\text{теор}}$, Å» - позначення та розмірність теоретичного значення довжини хвилі спектральних ліній випромінювання водневої лампи, а в комірку B32 – формулу, тоді в рядку формул буде: «=1000/1,09737/(0,25-1/B31^2)», яку дублюємо до решти комірок цього ряду.

10. До комірки A33 вписуємо літери « δk , %» - позначення та розмірність відносної похибки числа k, а в комірку B33 – формулу, тоді в рядку формул буде: «=IMABS((B30-B31)/B31*100)»,

яку дублюємо до решти комірок цього ряду.

11. В комірку A34 записуємо літери « $\delta\lambda$, %» - позначення та розмірність відносної похибки λ , а в комірку B34 – формулу, тоді в рядку формул будемо мати: «=IMABS((B29-B32)/B32*100)», яку дублюємо до решти комірок цього ряду.

Література

1. І. Ф. Скіцько, О. І. Скіцько. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.–513с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>.

2. Загальна фізика. Квантова фізика : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів денної форми навчання факультету інформатики та обчислювальної техніки / Уклад.: В.П.Бригінець, О.О.Гусева, І.В.

Лінчевський, Н.О.Якуніна. - К.: НТУУ "КПІ", 2009.- 60 с.

3. І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. Загальний курс фізики, т.3, §13.1, «Техніка», К, 1999.

4. Е. С. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук, Б. М Романишин. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.

Таблиця 6

