

інформаційних технологій навчання [Текст] / І. Семешук // Фізика та астрономія в школі : Науково-методичний журнал. – 2003. – №5. – С. 17-21

9. Сиротюк В. Д. Фізика [Текст]: підручник для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стандарту) / В. Д. Сиротюк, В. І. Баштовий. – К.: Освіта, 2010. – 303 с.

10. Фізика [Текст] : 7-9 кл. : навч. прогн. для загальноосвіт. навч. закладів / О. І. Ляшенко [та ін.] // Фізика та астрономія в сучасній школі. – 2012. – № 6. – С. 2-13.

11. Фізика: Підручник для 10 класу загальноосвітніх навчальних закладів (профільний рівень) / Т. М. Засекіна, М. В. Головка. – К.: «Педагогічна думка», 2010. – 304 с.

12. Эвенчик Э. Е. Методика преподавания физики в средней школе [Текст] : пособие для учителя. Механика / Э. Е. Эвенчик. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Просвещение, 1986. – 240 с.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА:

**Пасько Ольга Олександрівна** - кандидат педагогічних наук, викладач кафедри фізики та методики навчання фізики Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка.

*Коло наукових інтересів:* мультимедійні технології навчання фізики.

## ВИВЧЕННЯ СПІВВІДНОШЕНЬ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ НА ЗАСАДАХ МОДЕЛЬНОГО ТА РЕАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТІВ

*Наталія ПОДОПРИГОРА, Анна ТКАЧЕНКО*

*У статті презентується варіант вивчення співвідношень невизначеностей у представленні Гейзенберга на засадах принципу циклічності, реалізований через модельний і реальний навчальні експерименти. Для виконання лабораторної роботи з експериментальної перевірки співвідношення невизначеностей для фотонів, що дифрагують на вузькій щілині, в якості джерела випромінювання фотонів пропонується використати лазерний діод.*

*The paper offers the option of studying uncertainties relationships in the Heisenberg representation based on the principle of cycling, implemented through the model and the actual learning experiments. To perform laboratory work with experimental verification of uncertainty relation for photons that diffract on narrow gap, as a light source of photons the usage a laser diode is suggested by the author.*

**Постановка проблеми.** Варіативність математичних методів отримання співвідношень невизначеностей у теоретичній фізиці та практична спрямованість їх застосування у навчальних курсах квантової фізики робить цей елемент знань дуже привабливим для дидактики фізики. Вивчення співвідношень невизначеностей уможливорює яскраве представлення не лише генезису розвитку уявлень фізики з прояву корпускулярно-хвильового дуалізму матерії на різних її рівнях (як мікро-, так і макроскопічному), а також виконувати напівкількісні оцінки явищ мікросвіту та встановлювати критерії застосовності до них понять класичної механіки. Разом з тим, співвідношення невизначеностей як змістовий компонент курсу квантової механіки вимагає експериментального підтвердження теоретичних результатів щодо їх узгодженості з реальними умовами, адекватно реалізованих засобами навчального фізичного експерименту. Виходячи із зазначеного, у підготовці майбутніх вчителів фізики дидактика вимагає забезпечити наступність та міждисциплінарну інтеграцію навчальних курсів, в яких теоретичні і експериментальні методи фізики є провідними. Разом з тим, завжди залишається актуальною проблема адаптації фізичних знань у площину шкільних умов. Такий підхід вимагає удосконалення та реформування методів і засобів навчання, змісту і структури подання навчального матеріалу, форм і способів організації навчальної діяльності, самостійної роботи тощо.

**Аналіз публікацій.** У фундаментальних наукових дослідженнях отримання співвідношень невизначеностей є варіативним. Зокрема, В. Гейзенберг (1927)

отримує співвідношення невизначеностей в узагальнених координатах  $pq - qp = -i\hbar$ , застосовуючи основи аналітичної механіки та відповідні рівняння Гамільтона, спираючись на роботи Н. Бора, У. Паулі, П. Дірака і ін. та іменує їх як новий принцип невизначеностей у змісті квантово-теоретичної кінематики і динаміки [21]. Найбільш загальну математичну форму  $[\hat{A}, \hat{B}] = i\hat{C}$  співвідношенням невизначеностей надає операторна алгебра, яка виявилась найбільш прийнятним математичним інструментарієм для сучасної квантової механіки. В операторній формі *принцип невизначеностей* є одним із фундаментальних положень квантової теорії щодо опису двох самоспряжених операторів, яким ставляться у відповідність дві канонічно спряжені динамічні змінні, які мають одночасно точні значення [19]. Для квантових гамільтоніанових систем В. Тарасов (2001) отримує співвідношення невизначеностей у формі Робертсона-Шредінгера:  $1/4 \left| \langle x | \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A} | x \rangle \right|^2 \leq \|\hat{A}x\|^2 \|\hat{B}x\|^2$  [15]. Існують й інші форми математичного представлення співвідношень невизначеностей у фундаментальній науці, проте їх вивчення у систематичних курсах квантової механіки, на нашу думку, має визначатись цільовим і змістовим компонентами відповідної навчальної програми дисципліни, її міждисциплінарними зв'язками, а також логікою побудови процесуальної складової відповідної методичної системи навчання, яка спрямованої на підготовку фахівця високої кваліфікації.

Зокрема, у курсі квантової механіки Д. Блохінцева пропонується підхід до вивчення співвідношень невизначеностей [1, с. 63-76], який відображає теоретичний і прикладний (практичний) аспекти навчання фізики. Він уможливує ознайомлення студентів не лише із методологією теоретичної фізики, але й торує нову стежину у дидактиці фізики щодо проектування навчальних дій, спроможних адекватно відображати пізнавальні кроки фундаментальної науки: 1. Співвідношення невизначеностей розглядаються як властивість квантових ансамблів і вводяться через статистичний аналіз руху частинки уздовж траєкторії на основі математичної моделі мікрооб'єкта як хвилі де Бройля. Це дозволяє обґрунтувати співвідношення невизначеностей у представленні Гейзенберга для координати та відповідної складової імпульсу частинки у формі  $\Delta x \cdot \Delta p_x = \pi\hbar$ , яка є найбільш поширеною у навчальних курсах. 2. Доводиться співвідношення невизначеностей для довільного стану частинок у загальному представленні  $\overline{\Delta x^2} \cdot \overline{\Delta p_x^2} \geq \hbar^2/4$ , обираючи за міру відхилення окремих результатів вимірювання координати  $x$  і імпульсу  $p_x$  від їх середніх значень  $\bar{x}$  і  $\bar{p}_x$  середньоквадратичні відхилення  $\overline{\Delta x^2}$  і  $\overline{\Delta p_x^2}$ , які відомі не лише у математичній статистиці та теорії ймовірностей, але є застосовними у лабораторному практикумі з фізики під час визначення похибок вимірюваних величин. 3. Ілюструється справжність співвідношень на прикладах дифракції потоку мікрочастинок на щілині; аналізу треків  $\pi$ -мезонів у камері Вільсона з фотографій лабораторії ядерних проблем в м. Дубна. 4. Розв'язується задача з відшукування імпульсу нейтрона у процесі зіткнення його з протоном. Останні дві компоненти є прикладними і мають потенційні можливості щодо їх практичної реалізації у навчальному процесі.

Розв'язуючи проблему комплексного представлення співвідношень невизначеностей у підготовці майбутніх учителів фізики, ми презентуємо варіативні підходи щодо їх отримання, спираючись на інтегративні зв'язки між дисциплінами фундаментальної, науково-природничої, професійної і практичної підготовки на засадах дидактичних принципів наступності і циклічності навчання фізики. На основі аналізу власного педагогічного досвіду нами виявлено, що усе різноманіття

математичних підходів щодо отримання співвідношень невизначеностей не може бути відображено у змісті цих дисциплін. На те є декілька причин. По-перше, галузевий стандарт напряму підготовки «Фізика\*» передбачає формування у майбутніх учителів фізики якісних уявлень про предмет її дослідження, наукового світогляду, ціннісного ставлення до наукових відкриттів, методів наукового пізнання, методів дослідження та методології науки, спрямованих передусім на вироблення навичок практичної та професійної діяльності. По-друге, це обмеженість у засобах навчання щодо перевірки співвідношень невизначеностей в умовах навчального фізичного експерименту. По-третє, це брак навчального часу, що виділяється на вивчення цього питання. І, нарешті, запроваджуючи комплексні підходи до вивчення співвідношень невизначеностей, завжди необхідно дбати про умови посиленості сприйняття студентом навчальної інформації, які ми виявляємо у контрольно-стимулювальному компоненті методичної системи навчання математичних методів фізики у педагогічному університеті, який реалізуємо на етапах об'єктивізації контролю та проектування наступної діяльності [10], що складає четверту основну причину.

**Метою** нашої статті є відшукання можливостей експериментальної перевірки однієї з математичних форм представлення співвідношень невизначеностей в умовах навчального фізичного експерименту, зважаючи на професійну спрямованість навчальної діяльності майбутніх учителів фізики та стрімкий розвиток методів і засобів навчання фізики.

**Виклад основного матеріалу.** Навчаючи майбутніх учителів основам квантової механіки, ми покладаємось на онтологічний базис, перш за все, трьох дисциплін – загальна фізика, теоретична фізика і методика навчання фізики, які мають спільний об'єкт дослідження – реальні фізичні об'єкти. У курсі теоретичної фізики ці об'єкти, на певному етапі її вивчення, замінюються адекватними математичними моделями та досліджуються, з огляду на прояв її властивостей, за допомогою прийнятних математичних методів. Курс загальної фізики знайомить студентів із методами експериментальної фізики і вводить їх у пізнавальну діяльність засобами навчального фізичного експерименту (демонстраційний експеримент, лабораторний практикум). При цьому, на нашу думку, забезпечується інтеграція теоретичних знань студентів у практичну площину навчальних дій, що сприяє підвищенню рівня їх фундаментальної та природничо-наукової підготовки з фізики, формуванню предметної компетентності. Курс методики навчання фізики покликаний навчити студентів адаптувати набуті ними знання до шкільних умов та вимагає сформувати *професійно-педагогічну компетентність* – «узагальнене особистісне утворення фахівця, що включає високий рівень його теоретико-методологічної, психолого-педагогічної, методичної і практичної підготовки і є критерієм становлення педагога-професіонала» [20, с. 129].

Нами виявлено, що однією з методичних особливостей вивчення співвідношень невизначеностей є можливість *узгодження корпускулярно-хвильового дуалізму мікрочастинок* (подвійність властивостей, яка поєднує в одному об'єкті несумісні на перший погляд риси). До того ж саме цю особливість найлегше реалізувати засобами навчального фізичного експерименту [16; 17].

Вивчення співвідношень невизначеностей ми пропонуємо розпочати з планування навчальних дій. Для цього обрали методологічний підхід, який зарекомендував себе у навчальному процесі з фізики загальноосвітньої школи і має ефективну більш ніж сорокалітню практику свого застосування [13; 14] – це *принцип циклічності*. Він представлений наступною логікою організації навчально-пізнавальної діяльності: *«факти, проблема → гіпотеза, модель → наслідок →*

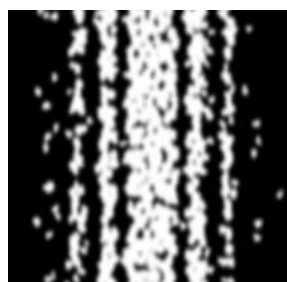
*експеримент, практика»* [13, с.14]. Принцип циклічності у явній і неявній формі є нормою пізнання, що конкретизується для двох провідних видів навчальної діяльності – експериментування та моделювання, що апроксимовані з методів наукового пізнання у методи експериментального і теоретичного навчання, останні у фізики і є рівноправними і взаємодоповнювальними.

Виступаючи проти формалізму у викладанні фізики, В. Майер вважає, що навчання фізики за принципом циклічності є досить ефективним і виділяє кілька ключових моментів [9]: по-перше, перехід від фактів до моделі має здійснюватись у спільній діяльності вчителя з учнем, всіляко заохочуючи їх самостійність до висунення правдивих гіпотез; по-друге, при переході від наслідків теорії до умов експерименту варто ознайомити тих, хто навчається, з сучасними умовами і можливостями експериментування; по-третє, система експериментів, яка обґрунтовує фізичну теорію, має складати як демонстраційні, так і лабораторні форми навчального експерименту та виконання додаткових експериментальних завдань, що забезпечують організацію ефективної самостійної навчально-пізнавальної діяльності, включаючи і науково-дослідну роботу. Оптимальною є ситуація, коли навчальний експеримент тісно пов'язаний із теоретичними основами вивчення досліджуваного фізичного процесу або явища. Такий експеримент носить не ілюстративний, а доказовий характер, і його результат дає вичерпне пояснення, чим загострюється потреба забезпечення достатньої експериментальної підготовки вчителя фізики і наявності відповідної експериментальної бази щодо жорсткої вимоги використання навчальних дослідів практично на кожному уроці.

Спираючись на зазначені дидактичні основи навчання фізики, ми пропонуємо розпочати вивчення співвідношень невизначеностей з дослідження корпускулярно-хвильового дуалізму матерії на її мікрорівні та отримати одну з найвідоміших математичних форм співвідношень у представленні Гейзенберга.

**Факти.** Існують переконливі експерименти, в яких матерія на мікрорівні виявляє свої хвильові властивості, так само як існують досліди, в яких вона поводить ся як потік частинок. Явища інтерференції і дифракції світла його хвильову природу, а фотоефект, ефект Комптона – корпускулярну.

Для пояснення фотоефекту А. Ейнштейн (1905) припустив, що світло складається з окремих порцій – квантів (фотонів), для яких:  $E_\phi = \hbar\omega_\phi$ ;  $\vec{p}_\phi = \hbar\vec{k}_\phi = \hbar\omega_\phi / c$ ;  $m_\phi = \hbar\omega_\phi / c^2$ . Це припущення дозволило пояснити експериментальні факти, зокрема:  $n\hbar\omega_\phi = A_e + m_e v^2 / 2$ , де  $n = 1, 2, \dots$ ,  $n\hbar\omega_\phi$  – енергія падаючих на металеву пластину фотонів,  $A_e$  – робота виходу електрона з металу,  $m_e$  – маса електрона, який вибивається з поверхні металу фотонами.



а



б

Рис. 1. Дифракція Фраунгофера: а – для електронів; б – для фотонів

Разом з тим, дифракційна картина для потоку електронів на прямокутній вертикальній щілині (рис. 1, а) майже нічим не відрізняється від дифракції паралельного пучка світла (рис. 1, б).

Луї де Бройль (1924) висунув гіпотезу про повну симетрію природних об'єктів. Ця гіпотеза передбачала, що корпускулярно-хвильовий дуалізм є рівно притаманним як випромінюванню, так і мікрочастинкам, тобто усім формам матерії. Де Бройль постулював наявність хвильових властивостей у електронів, протонів, атомів, молекул і навіть макротіл, які мають відповідні хвильові характеристики:  $\omega_r = E_r / \hbar$ ,  $\vec{k}_r = \vec{p}_r / \hbar$ ,  $\lambda_r = 2\pi\hbar / p_r$ . Ця ідея була експериментально підтверджена у двох незалежних експериментах Девісона і Гомсона (1927).

Нині демонстрація досліду з дифракції світла на вузькій щілині є рекомендованою для виконання як у курсі загальної фізики вищого навчального закладу [3], так і в курсі фізики загальноосвітньої школи [12].

**Проблема.** Матерія на мікрорівні проявляє одночасно обидві свої властивості – хвильові та корпускулярні (рис. 1), що з точки зору класичних уявлень не піддається обґрунтуванню.

**Гіпотеза:** квантово-механічні співвідношення невизначеностей Гейзенберга дозволяють узгодити корпускулярно-хвильовий дуалізм для фотонів.

Перевіряємо гіпотезу на *засадах моделювання*, спираючись на потенційні можливості його дидактичних функцій [11]: пізнавальну, евристичну, унаочнювальну, інтегративну, діяльнісну, розвивальну.

**Модель.** Уявімо світлову електромагнітну хвилю як потік фотонів і звернемося до *модельного експерименту* з дифракції фотонів на вузькій щілині (рис. 2). Направимо на непрозорий екран з вузькою щілиною  $AB = \Delta x$  (екран розташований у площині  $xOy$ ) потік фотонів. Зліва від екрану кожен з фотонів має імпульс  $\vec{p}$ , спрямований вздовж  $Oy$ , а отже, має точні значення імпульсу  $p_y = p$ , тому  $\Delta p_y = 0$ . Але координати фотонів

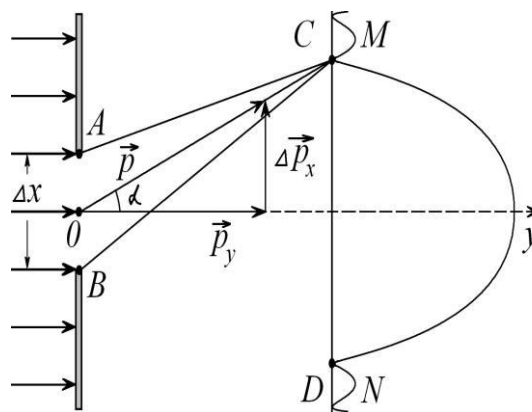


Рис. 2. Дифракція електронів на щілині

можуть бути довільними, тобто  $-\infty < y < +\infty$ . Тоді  $\Delta y = \infty$ , а  $\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar$ .

Інша ситуація відбувається, коли фотон проходить крізь щілину  $AB$  і  $\Delta x = AB$ . Зменшуючи  $AB$ , можна виміряти  $x$  із наперед заданою точністю. Коли розміри щілини будуть порядку дебройлівської довжини хвилі, тобто  $\lambda = 2\pi\hbar / p$ , матиме місце дифракція фотонів: на екрані  $CD$  спостерігається дифракційна картина – симетричний відносно осі  $Oy$  головний максимум і ряд вторинних максимумів; до щілини всі фотони рухались уздовж вісі  $Oy$  і при відхиленні від попереднього напрямку одержують приріст імпульсу  $\Delta p_x$  вздовж  $Ox$ .

Можна вважати, що вся дифракційна картина має ширину від нижнього першого мінімуму до відповідного верхнього. Тому  $\Delta p \approx p \tan \alpha \approx p \sin \alpha$  (за умови, що  $\alpha$  – малий). Отже:  $\Delta p = 2\pi\hbar / \lambda \cdot \sin \alpha$ ;  $\Delta x \sin \alpha = k\lambda$  ( $k=1$ )  $\Rightarrow \Delta x \sin \alpha = \lambda$ . Тоді:  $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx 2\pi\hbar$ . Коли враховувати і вторинні максимуми, тоді  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq 2\pi\hbar$ , тобто одержуємо *співвідношення невизначеностей Гейзенберга* [10, с. 50-51].

**Наслідок.** Співвідношення невизначеностей Гейзенберга  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq 2\pi\hbar$  на мікрорівні підтверджує та уможливорює узгодження одночасного прояву корпускулярних і хвильових властивостей змодельованого потоку фотонів.

**Експеримент.** Розв'язуючи проблему експериментальної перевірки співвідношень невизначеностей у представленні Гейзенберга, нами виявлений найпоширеніший варіант її реалізації у лабораторному практикумі з курсу загальної фізики «Перевірка співвідношень невизначеностей для фотонів» [2; 6; 8]. У більшості варіантів виконання цієї роботи джерелом випромінювання є гелій-неоновий лазер. Оскільки питання про лазери включені в програму з фізики для середньої школи і промисловість випускає лазери, призначені спеціально для шкільних навчальних потреб, цілком поділяємо і підтримуємо думку С. Величка про те, що «... вчитель фізики не тільки може, але й повинен використовувати навчальний лазер для різних дидактичних цілей» [4, с. 3].

Проте гелій-неоновий лазер, як джерело випромінювання, не завжди можна відшукати у звичайному фізичному кабінеті загальноосвітньої школи і тому ми спробували реалізувати варіант лабораторної роботи з експериментальної перевірки співвідношень невизначеностей Гейзенберга у представленні  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$  для дифракції фотонів на вузькій щілині від червоного лазерного діода. Таке джерело випромінювання світла ми запозичили у однієї з найпоширеніших типів лазерних указок, яку легко придбати сьогодні будь-де. У лазерних указках використовуються лазерні діоди з коліматором. Такі діоди випромінюють когерентні монохроматичні електромагнітні хвилі видимого діапазону спектру довжиною 650-670 нм. Їх потужність варіюється від 1 мВт до 1 Вт. Малопотужні указки живляться від маленьких батарейок-«таблеток» і коштують на сьогодні не більше 12-60 грн.

Щоб час від часу не виконувати заміну батарейок для живлення лазерного діода, ми закріплюємо його у спеціально виготовленому корпусі і подаємо на нього стабілізовану напругу 6 В. Саме за такої напруги починає працювати в активному режимі рекомендований нами лазерний діод.

Нами пропонувався варіант стабілізатора напруги для засобів мікроелектроніки, які розраховані на напругу 5 В [18]. Виготовити подібне джерело живлення для лазерного діода вимагає лише заміни у ньому мікросхеми КР142ЕН5А на КР142ЕН5Б (або КР142ЕН5Г), яка розрахована на стабілізацію напруги у 6 В. Принципова схема стабілізованого джерела живлення наведена на рис. 3.

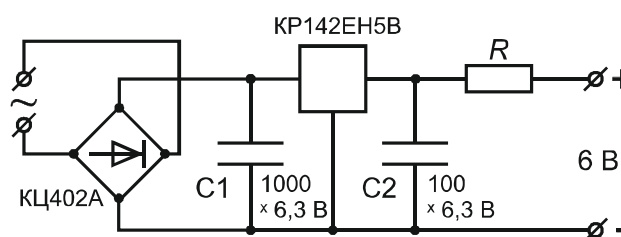


Рис. 3. Принципова схема джерела живлення для лазерного діода

Для його конструювання використовують знижувальний трансформатор напруги (6-10 В), випрямляч КЦ402А, мікросхему КР142ЕН5Б (або КР142ЕН5Г), два електролітичні конденсатори з ємностями 1000 і 100 мкФ, розраховані на напругу не нижчу за 6,3 В, та двоватний резистор на 10 Ом. Вказаний блок живлення зручно збирати на базі трансформатора (ЛІП-90), використавши обидві половини вторинної обмотки [5, с. 53].

Варіант пропонованої лабораторної роботи «Експериментальна перевірка співвідношення невизначеностей Гейзенберга для фотонів» може бути таким.

**Мета роботи:** експериментально перевірити співвідношення  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ .

*Прилади і матеріали:* оптична лава, джерело випромінювання (лазерна указка, або лазерний діод ( $\lambda = 650$  нм) із стабілізованим джерелом живлення), щілина з мікрометричним гвинтом, екран з міліметровим папером, рулетка.

*Завдання:* 1. Під час підготовки до роботи: користуючись рекомендованою літературою [7, с. 277-287], вивчити питання стосовно співвідношень невизначеностей Гейзенберга; у робочий зошит записати мету та завдання роботи, теоретичні відомості та опис установки, накреслити схему досліду. 2. Під час виконання роботи: перевірити співвідношення  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ ; побудувати графік залежності  $D$  від  $\Delta x$ ; виконати аналіз одержаних результатів, оформити звіт і подати його викладачеві.

*Правила техніки безпеки:* бережіть очі від попадання прямого та дзеркально відбитого лазерного випромінювання; слід обережно працювати поблизу нуля мікрометричного гвинта щілини, щоб запобігти її псуванню.

У теоретичних відомостях та описі установки доцільно викласти матеріал, пов'язаний із принципом невизначеності Гейзенберга. Робочу формулу пропонуємо отримати із таких міркувань.

У квантовій механіці має місце *корпускулярно-хвильовий дуалізм* – кожній мікрочастинці приписується певна хвиля, довжина якої визначається з формули де Бройля, як  $\lambda = 2\pi\hbar/p$ , де  $p$  – імпульс частинки. Тоді визначення місця знаходження мікрочастинки в будь-який момент часу втрачає фізичний зміст, оскільки хвиля, як протяжний об'єкт, не може бути зосереджена в одній точці з певною координатою. У свою чергу, імпульс визначається через довжину хвилі, як  $p = 2\pi\hbar/\lambda$ , тому координата з певним імпульсом цілком невизначена. З іншого боку, якщо координата частинки точно відома, то її імпульс повністю невизначений. Між невизначеністю координати  $\Delta x$  і невизначеністю відповідної проекції імпульсу  $\Delta p_x$  існує співвідношення  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ . Тобто, чим точніше визначати координату, чим меншим буде значення  $\Delta x$ , тим більшою буде невизначеність за імпульсом  $\Delta p_x$  і, навпаки, чим точніше визначено імпульс, чим меншим буде  $\Delta p_x$ , тим більшою виявляється невизначеність за координатою. Це, в свою чергу, означає, що поняття координати і імпульсу в класичному розумінні не можуть бути застосовані до опису мікроскопічних об'єктів.

Розглянемо з позицій вище викладеного дифракцію фотонів на щілині шириною  $\Delta x$  (рис. 4).

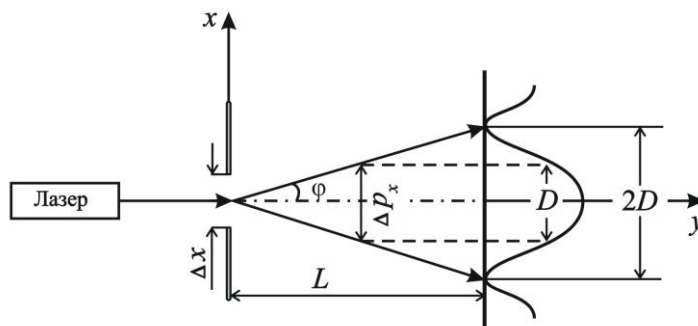


Рис. 4. Дифракція фотонів на щілині

Фотони падають на щілину паралельно вісі  $y$ . До щілини певний фотон мав імпульс  $\vec{p}$ , вектор якого точно співпадає з віссю  $y$ . Тобто проекція імпульсу цього фотона на вісь  $x$   $p_x = 0$ , а отже і  $\Delta p_x = 0$ . Відмітимо також, що до щілини значення

імпульсу було цілком визначеним – воно становило  $p = 2\pi\hbar/\lambda$ , проте координата фотона мала повну невизначеність. За допомогою щілини невизначеність координати можна зменшити, тепер вона має конкретну величину, яка дорівнює ширині щілини, тобто  $\Delta x$ . Натомість імпульс фотона при проходженні ним щілини набуває невизначеності, що становить щонайменше  $\Delta p_x$ . Причиною цього є явище дифракції – після проходження щілини фотони відхиляються від вісі  $y$  на певні кути. Найбільша їх кількість (приблизно 80%) потрапляє у сектор, обмежений кутом  $2\varphi$ , і утворює центральний дифракційний максимум. Значення цього кута визначається умовою мінімуму при дифракції на щілині  $\Delta x \sin \varphi = \lambda$ . Звідки  $\sin \varphi = \lambda/\Delta x$ . Із рис. 4 видно, що  $\Delta p_x = p \sin \varphi$ , або  $\Delta p_x = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} \sin \varphi = \frac{2\pi\hbar}{\Delta x}$ . Тобто, маємо  $\Delta p_x \cdot \Delta x = 2\pi\hbar$ . Якщо врахувати, що частина фотонів відхиляється від вісі  $y$  і на більші кути, ніж  $\varphi$ , утворюючи максимуми вищих порядків, тоді невизначеність  $\Delta p_x$  буде ще більшою. Отже, остання рівність перетворюється у нерівність  $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq 2\pi\hbar$ . Враховуючи, що  $h = 2\pi\hbar$ , остаточно одержимо  $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h$ . З нерівності випливає, що при звуженні щілини зростає невизначеність  $\Delta p_x$ , що зумовлює розширення дифракційного максимуму, збільшення  $D$ , і, навпаки, збільшення  $\Delta x$  спричинює зменшення  $D$ . Тому *робочу формулу* для експериментальної перевірки співвідношення невизначеностей Гейзенберга можна записати як  $\Delta x \cdot D > \text{const}$ .

*Послідовність виконання роботи передбачає такі дії:*

1. На оптичній лаві розташувати лазерну указку і щілину. Екран розмістити на відстані 2-3 м від щілини (рис. 5).

2. Змінювати ширину щілини через 0,02-0,04 мм і для кожного її значення вимірювати на екрані з міліметровою сіткою ширину  $2D$  центрального дифракційного максимуму. Вимірювання виконати тричі, спочатку розкриваючи щілину, а потім зменшуючи її ширину. Для кожного значення  $\Delta x$  усереднити  $D$ .

3. Побудувати графік залежності  $D$  від  $\Delta x$  і проаналізувати його.

4. Дії пунктів 2 і 3 виконати для віддалей  $L$ , рівних 2; 2,5 і 3 м.

5. Виконати порівняльний аналіз одержаних результатів. Переконатися, що для різних  $L$  добутки  $L \cdot \lambda$  дорівнює добутку  $\Delta x \cdot D$ .

*Результати виконаного експерименту подані в таблиці 1.*

*Запитання для самоконтролю:* Які співвідношення невизначеностей Вам відомі? Що є причиною існування співвідношень невизначеностей? Які фізичні явища знаходять своє пояснення на основі співвідношень невизначеностей? Чому для виконання даної роботи доцільно використовувати лазер? Світло якої довжини хвилі

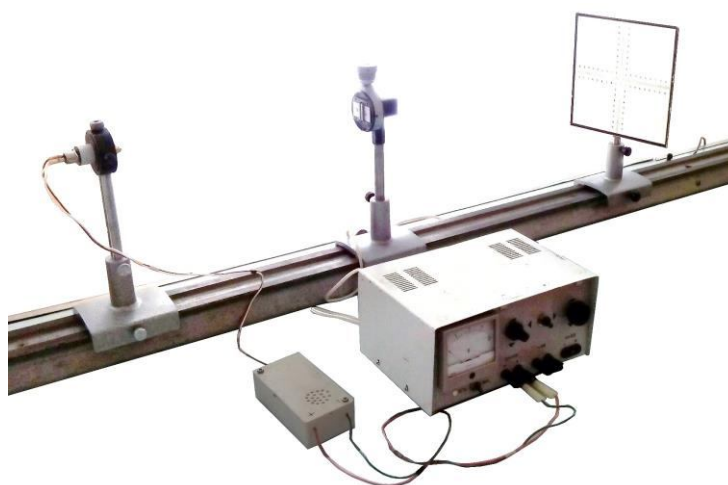
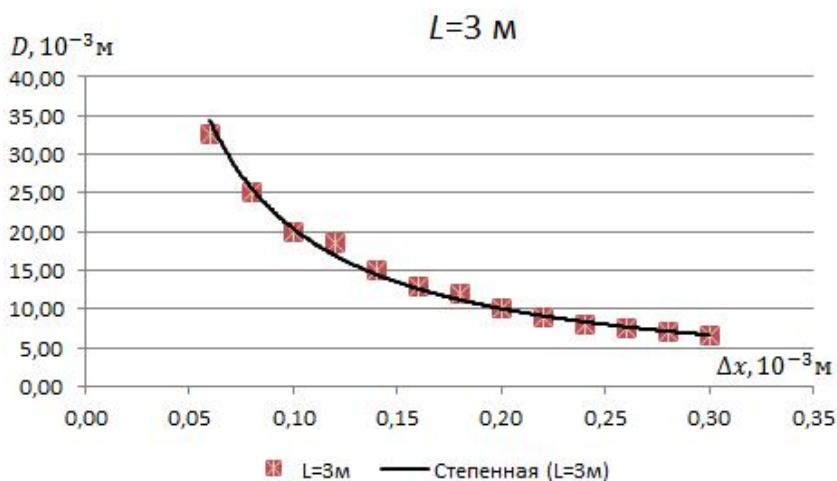


Рис. 5. Експериментальна установка з перевірки співвідношення невизначеностей Гейзенберга



Таблиця 1

$L=3\text{ м}$		$\lambda = 650 \cdot 10^{-9}\text{ м}$						
№ досліду	$\Delta x, 10^{-3}\text{ м}$	$D, 10^{-3}\text{ м}$	$2D, 10^{-3}\text{ м}$	$\Delta x \cdot D, 10^{-6}\text{ м}$	$\Delta_1, 10^{-6}\text{ м}$	$L \cdot \lambda, 10^{-6}\text{ м}$	$\Delta, 10^{-6}\text{ м}$	$\varepsilon, \%$
1	0,06	32,50	65	1,95	0,07		$\Delta =  \Delta x \cdot D - L \cdot \lambda  + \Delta_1$	$\varepsilon = \frac{\Delta}{\Delta x \cdot D} \cdot 100\%$
2	0,08	25,00	50	2,00	0,02			
3	0,10	20,00	40	2,00	0,02			
4	0,12	18,50	37	2,22	0,20			
5	0,14	15,00	30	2,10	0,08			
6	0,16	13,00	26	2,08	0,06			
7	0,18	12,00	24	2,16	0,14			
8	0,20	10,00	20	2,00	0,02			
9	0,22	9,00	18	1,98	0,04			
10	0,24	8,00	16	1,92	0,10			
11	0,26	7,50	15	1,95	0,07			
12	0,28	7,00	14	1,96	0,06			
13	0,30	6,50	13	1,95	0,07			
ср				2,02	0,07	1,95	0,14	7,13



$$L \cdot \lambda = \Delta x \cdot D \approx (2,02 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}\text{ м}; \quad \varepsilon = 7,13\%$$

Рис. 6 Графічна інтерпретація результатів експерименту.

випромінює лазерний діод? На основі співвідношення невизначеностей оцініть енергію електрона в атомі водню в основному стані. Порівняйте її з тим, що дає теорія Бора. З якою точністю вимірюється ширина щілини у даній роботі? Чому у даній роботі обмежуються вимірюванням ширини лише центрального максимуму? Яким світлом при виконанні цієї роботи – червоним чи синім – слід освітлювати щілину, щоб одержати точніші результати?

Пропонований варіант експериментальної перевірки співвідношень невизначеностей є доступним і доцільним не лише у лабораторному практикумі з курсу загальної фізики щодо вивчення студентами корпускулярно-хвильового дуалізму у квантовій фізиці, а й має потенційні можливості своєї реалізації під час вивчення основ квантової фізики у загальноосвітній школі з огляду на простоту і доступність використаних засобів експериментування.

**Висновки.** Наведений варіант організації навчальної діяльності студентів з вивчення співвідношень невизначеностей Гейзенберга на засадах принципу циклічності, постановка і виконання експериментального завдання, виконаного на підтвердження наслідків відповідного модельного експерименту є прикладом забезпечення якості наукового пізнання майбутніх вчителів фізики з визначення фізичної сутності світла на мікрорівні. Разом з тим, цей приклад переконує в доцільності його реалізації та впровадження до системи навчального фізичного експерименту, яка обґрунтовує теоретичні відомості та уможливорює постановку проблемних і цікавих дослідів у вигляді самостійних чи індивідуальних експериментальних завдань згідно профільних програм для курсу фізики загальноосвітньої школи.

**Перспективи подальших розвідок.** Оскільки математичні основи квантової механіки для загальноосвітньої школи є недоступними через неможливість відповідної математичної підготовки учнів, то використання співвідношення невизначеностей уможливорює виконання якісних розрахунків щодо допустимості використання понять класичної механіки до деяких задач з дослідження поведінки мікрооб'єктів (в камері Вільсона, в електронно-променевої трубці і ін.). Виявлення таких умов на засадах співвідношень невизначеностей представляється можливим у відповідній системі задач, що є перспективним напрямком подальших досліджень.

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики / Блохинцев Д.И. – М. : Наука, 1976. – 664 с.
2. Богатирьов О.І. Фізичний практикум з фізики атома: [навч-метод. посіб. для студ. вищ. закл. освіти] / О.І. Богатирьов. – Черкаси: Видавничий відділ ЧНУ ім. Б. Хмельницького. – 2010. – 58 с.
3. Бушок Г.Ф. Методика преподавания общей физики в высшей школе / Г.Ф. Бушок, Е.Ф. Венгер. – К.: Наукова думка, 2000. – 415 с.
4. Величко С.П. Лабораторний практикум зі спецкурсу «Лазер у викладанні шкільного курсу фізики»: [Посіб. для студ. 5 курсу ф.-м. факультету] / Величко С.П., Забара О.А., Сірик П.В. / За ред. С.П. Величка. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2014. – 118 с.
5. Вовкотруб В.П. Вступ до навчального фізичного експерименту: [навч. посіб для студ. вищ. пед. навч. закладів] / Вовкотруб В.П., Ментова Н.О., Подопрігора Н.В. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2007. – 155 с.
6. Горбачук І.Т. Загальна фізика. Лабораторний практикум / Горбачук І.Т. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
7. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: [у 3 т.] / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. – К. : Техніка, 2006. – Т. 3 : Оптика. Квантова фізика. – 2006. – 518 с.
8. Лабораторний практикум з фізики. Ч.3. (Оптика та атомна фізика). Лабораторія оптична: навчальний посібник. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 364 с.
9. Майер В.В. Против формализма в преподавании физики / Физика в школе. – 2011, № 7. – С. 51-60.
10. Подопрігора Н.В. Комплексне представлення співвідношень невизначеностей у процесі підготовки майбутніх учителів фізики / Н.В. Подопрігора // Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology. – 2014. – II (13), Issue: 26. – P. 48-54.
11. Подопрігора Н.В. Навчання математичних методів фізики майбутніх учителів фізики на основі методу моделювання / Н.В. Подопрігора // Актуальні проблеми природничо-математичної освіти в середній і вищій школі: міжнар. наук.-практ. конф., 26-28 черв. 2014 р.: тези доп. – Херсон, 2014. – С. 70-71.
12. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика 10-11 класи. Рівень стандарту. Академічний рівень. Профільний рівень. – К. : “Перун”, 2010. – 64 с.
13. Разумовский В.Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1975. – 272 с.
14. Соколова Н.В. Теория и опыт использования принципа цикличности при обучении физике в старшей школе: дис. ... кандидата пед. наук : 13.00.02 / Соколова Наталья Вячеславовна. – Киров, 2005. – 192 с.
15. Тарасов В.Е. Вывод соотношения неопределенностей для квантовых гамильтоновых систем / В.Е. Тарасов // Московское научное образование – 2001. – № 10. – С. 3-6.

16. Ткаченко А.В. Взаємозв'язок теоретичного і емпіричного методів при навчанні фізиці / А.В. Ткаченко, О.І. Богатирьов // Вісник Черкаського університету. Серія : педагогічні науки. – 2007. – Вип. 111. – С. 135-139.
17. Ткаченко А.В. Моделювання квантових властивостей світла на подвійній щілині / А.В. Ткаченко, В.Г. Гриценко // Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. – 2009. – Вип. 82. – Ч. 1. – С. 319-324. – (КДПУ ім. В. Винниченка).
18. Федішова Н.В. Комплект для вивчення фізичних основ роботи електронно-обчислювальної техніки // Фізика та астрономія в школі. – № 2. – 1999. – С. 23-27.
19. Фон Нейман Дж. Математические основы квантовой механики / Джон фон Нейман. – М. : Наука, 1964. – 367 с.
20. Шарко В.Д. Методична підготовка вчителя фізики в умовах неперервної освіти: Монографія / Шарко В.Д. – Херсон: Вид-во ХДУ, 2006. – 400 с.
21. Heisenberg, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik // Zeitschrift für Physik. – 1927. – Vol. 43, Issue 3-4. – P. 172-198.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Подопрігора Наталія Володимирівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, докторант кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського держаного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

*Коло наукових інтересів:* методична система навчання математичних методів фізики в педагогічних університетах.

**Ткаченко Анна Валеріївна** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького.

*Коло наукових інтересів:* навчальний фізичний експеримент як засіб активізації пізнавальної діяльності студентів.

## АБСТРАГУВАННЯ В ПІЗНАВАЛЬНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ЯК ОДИН ІЗ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ МЕТОДИЧНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ

**Оксана СЕМЕРНЯ, Уляна МАКОГОНЮК**

*У статті описаний метод абстрагування в пізнавальній діяльності майбутнього вчителя фізики. Проілюстрований метод є одним з методів формування методичної компетентності фахівця. Абстрагування в пізнавальній діяльності майбутнього вчителя фізики реалізує дієвість здобувача вищої фізичної освіти через виконання спеціальних навчально-методичних завдань на практичних заняттях з дисципліни "Методика навчання фізики". Основна ідея статті полягає в методичних аспектах використання одного з вимірників результативності знань студентів такого як дієвість.*

*This article describes a method of abstraction in the cognitive activities of the Future Teachers Of Physics. Illustrated method is a method of forming methodical competence of the expert. Abstraction in the cognitive activity of a Future Physics Teacher effectiveness applicant implements higher physical education through the implementation of specific instructional objectives for practical training in the topic on "Methods of Teaching Physics." The main idea of the article is methodological aspects of the use of a measuring effectiveness of student learning such as effectiveness.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді, зв'язок із науковими і практичними завданнями.** Абстрагування в пізнавальній діяльності майбутніх фахівців це є специфічний процес дієвості, який складається з аналізування та моделювання.

Застосування процесу дієвості в підпорядкуванні абстрагуванню пізнавальної діяльності студентів виявляє етапи формування методичних компетентностей майбутнього вчителя фізики.

Так, абстракції у шкільному курсі фізики являють собою ідеї елементарності, збереження, симетрії, співвіднесення, додатковості, спостережливості, єдності