

УДК 378.147

Школа О.В.

**ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАННЯ
КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ У ВИЩІЙ ШКОЛІ**

Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова,

Київ, Пирогова 9, 01601

Shkola O.V.

**WAYS OF INCREASING THE EFFECTIVENESS OF TRAINING
QUANTUM MECHANICS IN HIGH SCHOOL**

National pedagogical University after M. P. Dragomanov,

Kyiv, Pirogova 9, 01601

Анотація. У статті розглядаються методичні особливості вивчення деяких квантово-механічних явищ у курсі теоретичної фізики вищої школи на основі використання оптичних аналогій. Пропонується відповідна педагогічна модель навчання основ квантової механіки, що сприятиме підвищенню якості фундаментальної підготовки майбутніх фахівців.

Ключові слова: *фундаменталізація освіти, методична система навчання, хвильова оптика, квантова механіка, оптичні аналогії.*

Abstract. The article deals with the methodological features of teaching some quantum-mechanical phenomena in the university course of theoretical physics on the basis of optical analogies. The author offers a corresponding pedagogical model of learning the basics of quantum mechanics, which will help to improve the quality of basic training of future specialists.

Key words: *fundamentalization of education, teaching system, quantum mechanics, optical analogy.*

Організація навчального процесу у вищій школі вимагає від викладачів постійної роботи з удосконалення методики викладання навчальних дисциплін, запровадження нових педагогічних технологій, форм, методів і засобів навчання,

що сприяють поліпшенню якості освіти, підготовці компетентних всебічно розвинених творчих особистостей. Останнє зумовлено не лише трансформацією вітчизняної освіти в контексті європейських вимог в аспекті забезпечення її наступності, безперервності й прагматичності, але й посиленням уваги до фундаментальності та професійної спрямованості підготовки майбутніх фахівців, створення умов для їх всебічного розвитку, самореалізації і самовдосконалення.

Аналіз дисертаційних праць, періодичних фахових видань, матеріалів науково-практичних конференцій дозволяє констатувати зниження рівня професійної підготовки студентів фізичних спеціальностей педагогічних вишів. Переважна більшість з них має труднощі із самостійним здобуттям нових знань, під час їх застосування у поясненні фізичних явищ і процесів, розв'язуванні задач, роботі з навчальним обладнанням. Залишають кращого й мотивація студентів у виборі фізики в якості майбутньої професійної діяльності, орієнтація на цей предмет як основу сучасних технологій виробництва та чинник розвитку творчого потенціалу особистості. Останнє означає, що сучасна фізична освіта в педагогічних університетах вимагає оновлення й фундаменталізації, розробки таких підходів до її організації та проведення, за яких буде відбуватись цілеспрямоване, системне й послідовне формування наукового світогляду, культури мислення та належних професійних орієнтацій випускників.

Загальновідомо, що основу професіоналізму майбутніх учителів фізики складають фундаментальні наукові знання. Останні, зокрема, формуються під час вивчення ними курсу теоретичної фізики, що є завершальним етапом їх фундаментальної підготовки. Одним з його головних завдань є всебічний розвиток особистості майбутнього педагога та набуття ним предметної компетентності, що передбачає створення найповніших і цілісних уявлень про сучасну фізичну картину світу на основі глибокого оволодіння ідейним змістом фундаментальних фізичних теорій, методами наукового пізнання та способами продуктивної діяльності із застосування знань на практиці.

Реалізація зазначених вище освітніх завдань навчального курсу неможливо без оволодіння студентами основами квантової механіки – фундаментальної

фізичної теорії, що визначає будову та сутність переважної більшості природних явищ. Надзвичайно важливо вже з перших етапів її навчання розвивати “квантову” інтуїцію і “квантове” мислення студентів. Необхідність цього диктується не лише потребою формування найповніших уявлень про сучасну природничо-наукову картину світу, але й швидким розвитком самого перспективного напрямку світового науково-виробничого комплексу – нанотехнологій і наноелектроніки, в основі яких лежать квантові властивості речовини. Варто зазначити, що курс квантової механіки викликає чималі труднощі у студентів, що пов’язано не тільки з використанням складного понятійного і математичного апаратів, але й, головним чином, з відсутністю відповідної наочності, яка б полегшувала сприйняття й розуміння ними квантових явищ. З цієї причини для багатьох студентів останні є незрозумілими та відірваними від загальної фізичної картини світу. Виникає питання: як поліпшити викладання цього розділу теоретичної фізики, відобразивши квантові ефекти більш наочно? Чи можна зробити їх зрозумілими, враховуючи специфіку майбутнього фаху студентів?

Шукаючи відповіді на ці питання, приходимо до висновку, що найбільш доцільним і практично необхідним для майбутніх педагогів є реалізація у навчанні теоретичної фізики історичного підходу, а саме відповідності процесу навчання логіці розвитку науки, а також тим методам пізнання, які стали в ній вирішальними. Історія науки свідчить, що процес здобуття нових знань тісно пов’язаний з використанням такого методологічного прийому як аналогія, яким широко та успішно користувалися А. Ампер, Дж. Максвелл, І. Мандельштам, І. Ньютон, Г. Ом, М. Умов, М. Фарадей, Е. Фермі та ін. Фундаментальними роботами щодо використання аналогій у навчанні фізики є праці О. Бугайова, С. Гончаренка, С. Каменецького, Л. Калапуші, Р. Редька, О. Сергєєва, І. Тичини, М. Шута та ін. Цікавими для педагогічної практики є відповідні напрацювання Л. Вовк, М. Солодухіна, А. Сохора, Ю. Сенька та ін. Однак більшість з цих робіт стосується шкільного курсу фізики, досліджень з використанням методу аналогії у практиці навчання фізики вищої школи вкрай мало. Згідно з діючими кваліфікаційними вимогами випускник педагогічного вишу повинен мати не

тільки фундаментальні знання, але й оволодіти методологією і методами наукового пізнання, набути досвід творчої пізнавальної діяльності. Тому, з нашої точки зору, більш широке застосування методу аналогії у навчанні теоретичної фізики, який завдяки своїй евристичній функції неодноразово відігравав суттєву роль в історії науки, сприятиме розвитку пізнавальної активності, інтелекту, творчих здібностей та якості знань майбутніх фахівців.

Як свідчить історія науки, становлення квантової механіки пов'язано з використанням оптичних уявлень та оптико-механічних аналогій, зумовлених хвильовою природою світла і мікрочастинок. Цей історичний аспект нам видається дуже важливим і корисним у навчанні. Психологічний бар'єр несприйняття студентами квантових явищ значною мірою знизиться, якщо останні поєднувати не з класичною механікою, а хвильової оптикою. На цій підставі пропонується систематично використовувати у навчанні аналогічні пари явищ квантової, а точніше, хвильової механіки і хвильової оптики.

Оптичні аналогії обрані не випадково. Хвильові ефекти в оптиці добре відомі з повсякденного досвіду та мають наочну інтерпретацію, наприклад, явища відбиття/заломлення світла на межі поділу двох середовищ, інтерференційне забарвлення тонких плівок, дзеркальні властивості металевих поверхонь та ін. Важливим методичним аспектом виступає також і те, що оптика передувє вивченню основ квантової механіки. Але головним аргументом на користь такого вибору стала реальна “взаємодія” хвильової оптики і квантової механіки у розвитку фізичної науки. Остання формувалася в 20-х рр. минулого століття як такий додаток до класичної механіки, яке доповнювало б її подібно до того, як хвильова оптика співіснує з геометричною. Згодом в кінці ХХ ст. в природознавстві і техніці відбувся не менш дивовижний зворотний процес. Результати квантової механіки, отримані у вирішенні завдань про поведінку електронів у складних потенціалах, у першу чергу при побудові одноелектронної теорії твердих тіл, були перенесені в оптику і багато в чому стимулювали розвиток нанофотоніки та розробку цілої гами оптичних мікро- і нанопристріїв. Така плідна взаємодія двох розділів фізичної науки і людської практики відображає гармонію нашого світу, особливості розвитку фізичної теорії, а

також демонструє нетривіальні шляхи зародження нових технологій на основі виключно фундаментальних теоретичних досліджень. На жаль, відображення взаємозв'язку квантової механіки та оптики на ранніх етапах її зародження не тільки не ввійшло в педагогічну практику, але, на наш погляд, не отримало належної уваги і в історико-науковій літературі. У зв'язку з цим нагадаємо деякі історичні факти.

Аналіз наукових першоджерел свідчить, що на першому етапі становлення квантової механіки оптичні уявлення та оптико-механічні аналогії мали визначальне значення для інтуїтивного формування нових понять та ідей. Про це свідчать наукові праці Л. де Бройля, Е. Шредінгера, М. Планка, В. Гейзенберга, А. Зоммерфельда. Так, зокрема, у 1923-1924 рр. Луї де Бройль уперше звернув увагу на схожість рівнянь хвильової оптики і кінематики мікрочастинок і знайшов у теорії Гамільтона-Якобі “теорію союзу хвиль і частинок”. Керуючись ідеєю глибокої тотожності між принципом найменшої дії (у механіці) і принципом Ферма (в оптиці), учений сформулював одне з фундаментальних положень фізичної науки – принцип корпускулярно-хвильового дуалізму, що має універсальну природу.

У першій частині статті Е. Шредінгера “Квантування як задача про власні значення” (1926 р.), що містить підзаголовок “Оптико-механічна аналогія Гамільтона”, зазначено: “... подібність принципів Гамільтона і Ферма не є математичною випадковістю, а має глибоку фізичну причину”. На думку Шредінгера, нова, хвильова механіка повинна співвідноситися з класичною, як хвильова оптика – з геометричною, підкреслюючи, що така побудова фізичної теорії є відображенням внутрішньої гармонії світу. У 1927 році, через рік після відкриття рівняння Шредінгера, один із творців квантової теорії Макс Планк у книзі “Теорія світла” коротко і ясно оцінив роль оптичних уявлень у розвитку ідей хвильової механіки, зазначивши: “Закони нової механіки встановлено шляхом детального аналізу й застосування аналогії між механікою та оптикою”.

Протягом усієї історії розвитку квантової механіки різні вчені інтуїтивно передбачали можливі оптичні аналогії квантових ефектів. Так, В. Гейзенберг у 1932 р. уперше вказав на можливість проведення аналогії між явищем квантового тунелювання та прозорістю тонких металевих плівок. У 1951 році А. Зоммерфельд

звернув увагу на цікавий факт: уведення поняття відносного показника заломлення для задач квантової механіки дозволяє привести до однакового вигляду вирази для коефіцієнтів відбиття/проходження з відповідними виразами в оптиці: $n = \sqrt{\frac{E_k - U}{U}}$, де E_k – кінетична енергія електрона, U – висота потенціального бар'єру. Ученим також було продемонстровано збіг формул для випадків відбиття мікрочастинки від потенціального бар'єру та електромагнітної хвилі на межі поділу двох середовищ. На існування аналогії між резонансним тунелюванням у квантовій механіці та прозорістю інтерферометра Фабрі-Перо в оптиці вказував Л. Есакі, який отримав Нобелівську премію з фізики 1973 р. за експериментальні праці з відкриття тунельних явищ у напівпровідниках.

Розглянемо зазначене питання більш детально. Оптична аналогія квантових ефектів є фізично коректною, оскільки зумовлена хвильовими властивостями мікрочастинок і електромагнітного випромінювання та має чітку математичну основу, оскільки пов'язана з розв'язанням математично ідентичних рівнянь: основного рівняння квантової механіки (рівняння Шредінгера: $\nabla^2\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}E\Psi = 0$), що описує стаціонарні стани мікрочастинки, та основного рівняння хвильової оптики (рівняння Гельмгольца: $\nabla^2 A + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} A = 0$), що описує електромагнітну хвилю. У цих рівняннях: Ψ – хвильова функція мікрочастинки, ($\hbar = 2\pi\hbar$) – стала Планка, m і E – маса та енергія частинки; A і ω – амплітуда і частота електромагнітної хвилі, n – показник заломлення середовища, c – швидкість світла у вакуумі. Різниця цих рівнянь полягає лише в тому, що в першому випадку маємо справу з хвильовою функцією, квадрат якої визначає ймовірність перебування частинки в певній області простору, в іншому – з амплітудою електромагнітної хвилі, квадрат якої визначає інтенсивність світла в даній точці. Аналогія стає ще більш повною, якщо порівнювати випромінювання не з одиничним електроном, а з потоком, що містить статистично велику кількість частинок (у цьому випадку квадрат хвильової функції визначає число частинок потоку у даній області простору).

Основою нашого підходу складають дві аналогії. Перша – між відбиттям/проходженням світла на межі двох діелектриків і квантової частинки над потенціальним бар'єром (у цьому випадку коефіцієнту прозорості бар'єру відповідає коефіцієнт пропускання оптичного середовища, зміна висоти бар'єру – зміні показника заломлення на межі поділу середовищ). Друга – між тунелюванням мікрочастинки під бар'єром та поширенням електромагнітної хвилі крізь тонку металеву пластинку або крізь тонкий шар діелектрика за умови порушення повного внутрішнього відбиття. При цьому говорять, що електромагнітна хвиля “тунелює” з одного середовища в інше так само, як електрон з одного потенційного поля (ями) в інше. В обох випадках маємо проходження хвилі до “забороненої зони” та її подальше експоненційне згасання. Використання базових аналогій у поєднанні з явищем інтерференції хвиль дозволяє запропонувати цілу серію аналогічних ефектів (табл. 1).

Таблиця 1

Аналогія властивостей поширення електронів та електромагнітних хвиль

<i>№ з/п</i>	<i>Профіль потенціалу</i>	<i>Електрон</i>	<i>Електромагнітна хвиля</i>
1.	Потенціальна яма кінцевої ширини	відбиття/проходження над ямою	відбиття/проходження та моди Фабрі-Перо у повітряному зазорі між діелектриками
2.	Бар'єр кінцевої ширини	відбиття/проходження над бар'єром	відбиття/заломлення та моди Фабрі-Перо для тонких діелектричних пластинок
		тунелювання під бар'єром	прозорість тонких металевих плівок, порушення повного внутрішнього відбиття світла
3.	Яма між двома бар'єрами	резонансне тунелювання	прозорість інтерферометрів Фабрі-Перо
4.	Послідовність однакових бар'єрів або ям	багатократне розщеплення стаціонарних рівнів енергії	багатократне розщеплення резонансних полос пропускання у пов'язаних мікрорезонаторах

Так, зокрема, квантове резонансне тунелювання (проходження мікрочастинки крізь два потенціальних бар'єри за певних співвідношень між її енергією і параметрами бар'єрів) знаходить природне пояснення на прикладі мод Фабрі-Перо в оптичному інтерферометрі, що складається з паралельних металевих дзеркал.

Моди Фабрі-Перо тонкого шару повітря між двома діелектриками відразу вказують на поширення частинки за відсутності відбиття не тільки над бар'єром, але й над ямою. У всіх випадках квантове явище виявляється наслідком інтерференції хвиль, що відбиваються або проходять крізь перешкоди. Значимо, що ці квантово-механічні ефекти традиційно вважають яскравим проявом відсутності наочності квантової механіки, у зв'язку з чим є досить складними для розуміння навіть студентами фізичних спеціальностей університетів, не кажучи вже про технічні й педагогічні виші. Таким чином, наведені вище аналогії можуть підвищити ефективність навчання квантової механіки у вищій школі. Історичний аспект зробить відповідний навчальний матеріал різноманітнішим, дозволить ознайомити студентів з історією фізичної науки, першоджерелами, особистостями її видатних представників. На нашу думку, застосування методу аналогій у даному випадку є не тільки оптимальним, але й дозволяє вирішити відразу кілька освітніх завдань: надати наочності квантовим явищам, поліпшити якість їх сприйняття й розуміння, поглибити знання студентів, розвинути їх творче мислення.

Систематизація та узагальнення відповідної науково-методичної інформації дозволило представити їх у вигляді педагогічної моделі (рис. 1). Розроблена педагогічна модель містить три блоки: теоретичний, змістовно-процесуальний та діагностичний. Теоретичний блок моделі визначальний, системотвірний, оскільки зумовлює функції усіх інших. Його зміст складають методологічні підходи, організаційно-педагогічні умови, загальнодидактичні та специфічні принципи навчання. У ньому закладена загальна мета реалізації моделі – всебічний розвиток особистості майбутнього вчителя фізики засобами навчальної дисципліни та набуття ним предметної компетентності.

Змістовно-процесуальний блок моделі складає модульна навчальна програма курсу квантової механіки у вищій школі. У ньому обов'язково розглядаються задачі про рух мікрочастинки крізь потенціальний бар'єр, над ямою, процес тунелювання, резонансного тунелювання та їх оптичні аналогії. Математичне розв'язання цих задач з використанням оптичних аналогій складає “ядро” змістового компоненту моделі та виступає її відмінною особливістю.

Процесуальний компонент утворюють етапи діяльності з проведення аналогій: структурування навчального матеріалу квантової механіки з метою виявлення відповідних тем, де можливо застосування методу аналогій, виділення елементів повторення програмного матеріалу з оптики, формування проблемної ситуації, що може виходити з математичного розв'язання задачі та її графічного представлення.

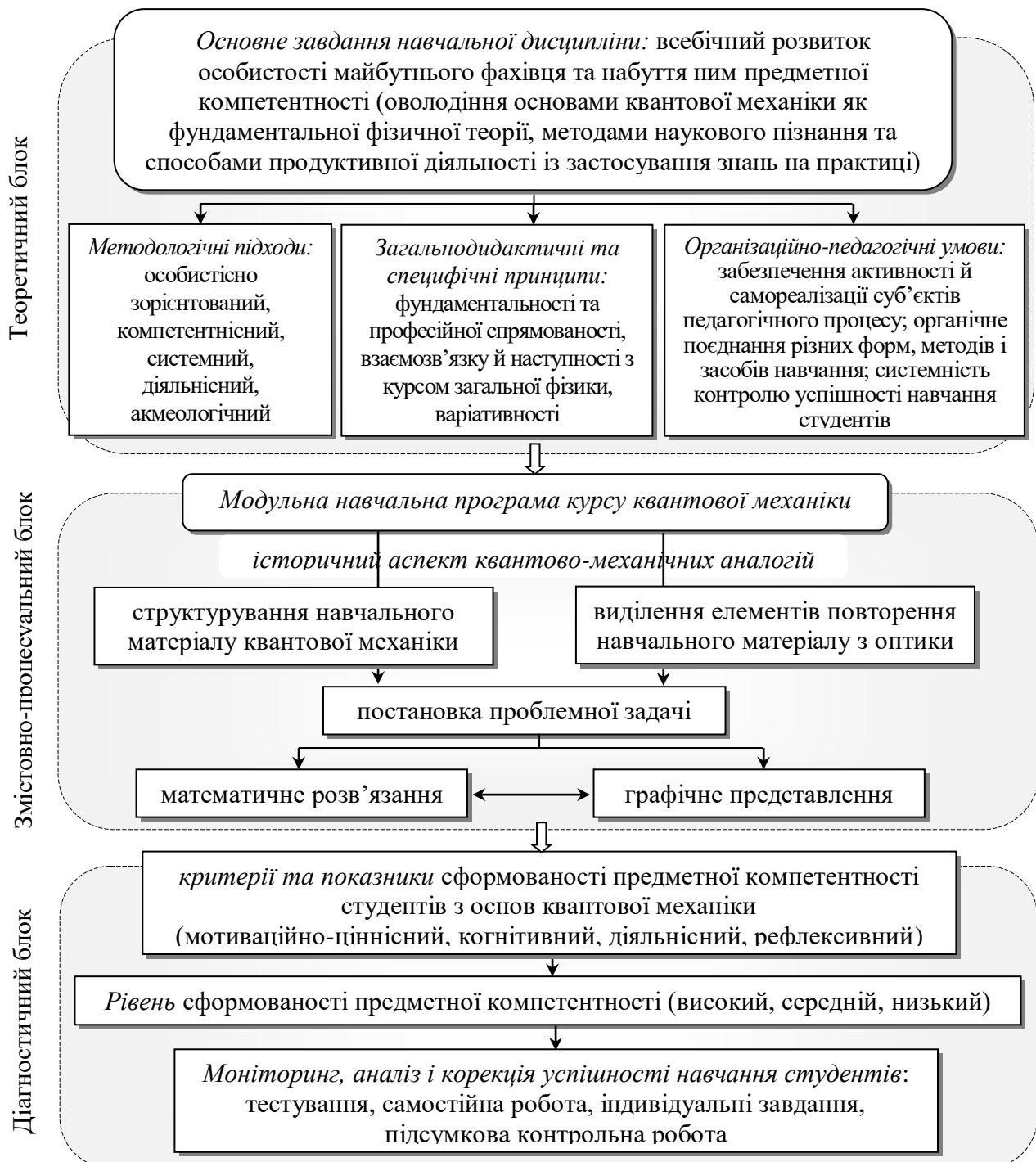


Рис. 1. Педагогічна модель навчання квантової механіки з використанням оптичних аналогій

Діагностичний блок представлений критеріями, показниками і рівнями сформованості окремих компонентів предметної компетентності студентів щодо засвоєння ними основ квантової механіки з використанням оптичних аналогій. Він містить систему засобів контролю та управління навчально-пізнавальної діяльності студентів з її обов'язковою рефлексійною оцінкою та аналізом. Розроблену педагогічну модель можна використовувати в класичних, технічних і педагогічних ВНЗ; під час викладання спецкурсів фахівцям у галузі фізики напівпровідників, мікро- та наноелектроніки. У спрощеному вигляді її можна також адаптувати для студентів гуманітарних спеціальностей вищої школи, які вивчають концепції сучасного природознавства.

Література:

1. Вакарчук І.О. Квантова механіка : підручник. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2004. – 784 с.
2. Величко С.П., Костенко Л.Д. Вивчення основ квантової фізики : навч. посібник. – Кіровоград : РВЦ КДПУ ім. В.Винниченка, 2002. – 274 с.
3. Вовк Л. І. Застосування методу аналогії у навчанні фізики студентів нефізичних спеціальностей вищих закладів освіти : автореф. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : 13.00.02 – Теорія і методика навчання фізики / Л. І. Вовк. – К. : НПУ імені М.П.Драгоманова, 2004. – 18 с.
4. Гапоненко С.В., Жуковский С.В., Хильманович В.Н. Квантовая механика и оптика: 1. Математическое обоснование оптических аналогий некоторых квантовых явлений / Физическое образование в вузах. – 2010. – Т.16. – № 4. – С.11 – 25.
5. Іваницький О.І., Ткаченко С.П. Технології навчання фізики : теоретико-методичні засади : навч. посібник. – Запоріжжя : ЗНУ, 2010. – 254 с.