

Drobin Andrii*The Kirovohrad Regional Institute of Postgraduate Pedagogical Education named after Vasyl Sukhomlynsky*
**GENERALIZATION OF CONTENT OF THE CONCEPT OF CORPUSCULAR WAVE DUALISM IN A
SCHOOL COURSE OF PHYSICS**

The article is devoted to the consideration of one of the most relevant, modern, important and fundamental concepts of physical science and the school course of physics, which has a cross-view worldview character - corpuscular-wave dualism of matter. The article analyzes the state and stages of the development of the concept of the dual nature of matter in physical science at the time of origin, approval, experimental verification and perception of universally recognized quantum scientific theories. The dynamics of development and the level of introduction of the dual nature of matter into the school course of physics by the example of the availability of materials on the duality of matter in modern school textbooks for different levels of studying physics corresponding to the updated curricula and the state standard of basic and complete general secondary education were also analyzed. The fact of the lack of dynamics and progress in the development of the material of the school course of physics in terms of the concept of the dual nature of matter is established. This fact is based on the conclusions that the educational physical material has stopped considering only the dual nature of light, as electromagnetic radiation. In connection with this, the updating and updating of the concept of the dual nature of matter by interpolation to other fundamental physical interactions (weak, strong, gravitational) is not carried out in the school course of physics. The necessity of expanding the educational material on physics in the part of the dual nature of matter for all fundamental physical interactions - strong, weak, gravitational, and not only electromagnetic - is substantiated in the article. In this connection, the methodical principles of the study of the principle of particle-wave duality of matter in the school course of physics of all levels on the basis of universally recognized scientific ideas are proposed: the principle of complementarity, the probabilistic nature of the behavior of microobjects, modern atomism, the concept of a particle as a singular pulsating object. The article also shows the place of the proposed changes in the teaching material of the school course of physics, the likely effect of their application, the corresponding conclusions are drawn and the prospects for further research on this topic are outlined.

Keywords: school physics course, physics teaching technique, corpuscular-wave dualism, dual nature of matter, statistical, singularity.

Дробин Андрей

Кировоградский областной институт последипломного педагогического образования имени Василия Сухомлинского

**ОБОБЩЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОНЯТИЯ КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОГО ДУАЛИЗМА В
ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ**

Статья посвящена рассмотрению одного из важнейших понятий школьного курса физики – корпускулярно-волнового дуализма материи. В статье проанализировано состояние развития данного понятия в физической науке и уровень его внедрения в школьном курсе физики, обоснована необходимость расширения учебного материала по физике в части двойственной природы материи и предложены методические основы обучения принципу корпускулярно-волнового дуализма материи.

Ключевые слова: школьный курс физики, методика обучения физике, корпускулярно-волновой дуализм, двойственная природа материи, статистичность, сингулярность.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА:

Дробін Андрій Анатолійович – кандидат педагогічних наук, методист лабораторії природничо-математичних дисциплін Кіровоградського обласного інституту післядипломної педагогічної освіти імені Василя Сухомлинського.

Коло наукових інтересів: дослідження дидактики фізики та історії фізики.

УДК: 539.1; 621.38

Дьоміна Наталя, Морозов Микола

Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

**МОДЕЛЮВАННЯ КВАНТОРОЗМІРНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР У
ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ З КУРСУ «ФІЗИЧНІ ОСНОВИ
СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»**

Робота присвячена організації імітаційних лабораторних робіт на базі математичного, комп'ютерного моделювання стану електронів у кванторозмірних структурах (у квантових точках) та проходження потенціальних бар'єрів. Лабораторні роботи розроблені для магістрантів спеціальності

«Комп'ютерні науки» з курсу «Фізичні основи сучасних інформаційних технологій», в яких використовують комп'ютерне моделювання за допомогою математичного пакету MathCad. Особливий інтерес представляє моделювання стану електронів у циліндричній квантовій точці (Quantum wire) та розгляд резонансного тунельного ефекту.

Ключові слова: імітаційні лабораторні роботи, наногетероструктури, моделювання MathCad, тунельний ефект, квантова точка.

Постановка проблеми. Наногетероструктури (квантові ями та точки) знаходять все більш широке застосування у квантовій електроніці. Тому розробка математичних комп'ютерних моделей поведінки електронів у кванторозмірних структурах для проведення імітаційних лабораторних робіт з курсу «Фізичні основи сучасних інформаційних технологій» є актуальною задачею [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спеціалізоване математичне середовище програмування Mathcad [3] реалізує три основних редактора: текстовий, формул та графічний, що забезпечує моделювання при проведенні імітаційних, віртуальних лабораторних робіт. Поведінка електронів та їх енергетичні спектри в сферичній та циліндричній квантових точках розглядається у роботах [1, 2, 6].

Мета статті. Розглянути математичні моделі стану електронів у квантових точках та проходження електронів крізь потенціальний бар'єр для організації відповідних робіт з дисципліни «Фізичні основи сучасних інформаційних технологій».

Виклад основного матеріалу. Цикл лабораторних робіт з курсу «Фізичні основи сучасних інформаційних технологій» для магістрів зі спеціальності «Комп'ютерні науки» складається з 15 робіт, 6 з яких є імітаційними. Теми цих лабораторних робіт: «Моделювання енергетичного стану електрона в одновимірній квантовій ямі з нескінченно високими стінками», «Моделювання енергетичного стану електрона в одновимірній квантовій ямі зі стінками кінцевої висоти», «Моделювання стану електрона у сферичній квантовій точці», «Моделювання стану електрона у циліндричній квантовій точці», «Моделювання руху електрона крізь потенціальний бар'єр: тунельний ефект», «Дослідження стану електронів у періодичному полі кристалічної ґратки». Під час виконання імітаційних лабораторних робіт використовують математичне, комп'ютерне моделювання за допомогою пакету MathCad.

1. Розглянемо стан електрона у циліндричній квантовій точці радіусу R та висотою H (рисунок 1а). У першому наближенні потенціальна енергія електрона дорівнює (рисунок 1б):

$$U(r) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } r \leq R \\ \infty, & \text{якщо } r > R \end{cases} \quad (1)$$

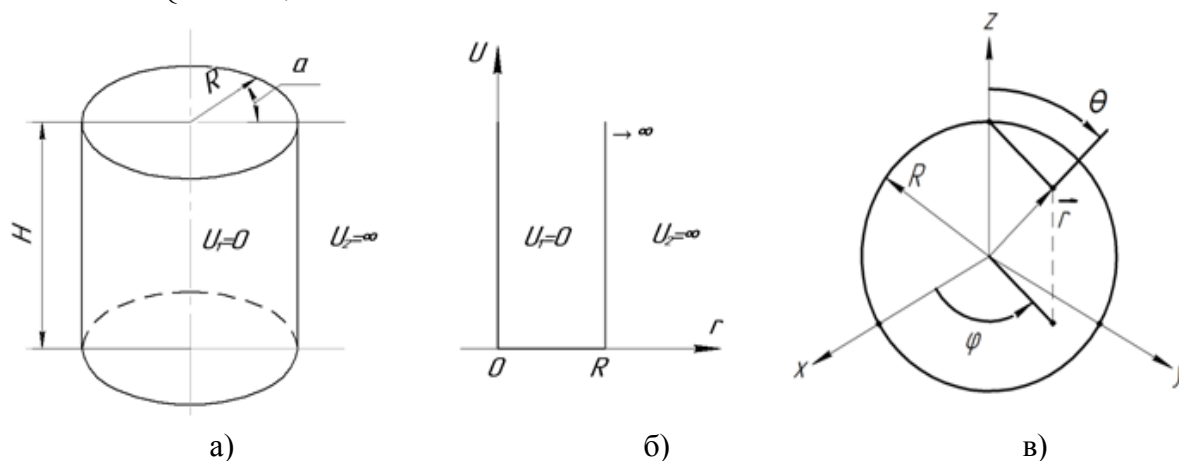


Рисунок 1: а) циліндрична квантова точка; б) потенціальна енергія електрона; в) сферична квантова точка

Використовуємо циліндричну систему координат. Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів хвильової функції $\varphi_1(r)$ для електрона в квантовій точці має вигляд:

$$\varphi_1'' + \frac{1}{r} \varphi_1' + k^2 \cdot \varphi_1 = 0 \quad (2)$$

де $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ – хвильове число; m – ефективна маса електрона, E – власні значення повної енергії електрона.

Диференціальне рівняння (2) є одним з видів рівнянь Бесселя нульового порядку [2] та має наступний розв'язок:

$\varphi_n(r) = c_n \cdot J_0(kr)$ (3), де $J_0(kr)$ – функція Бесселя нульового порядку (циліндрична функція). Використовуємо граничні умови та визначаємо власні дискретні значення енергії електрона:

$$\varphi_n(R) = c_n \cdot J_0(k_n \cdot R) = 0 \quad (4)$$

Тоді:

$k_n \cdot R = b_n$ (5), де b_n – нулі (корні) функції Бесселя $J_0(x)$ нульового порядку першого роду наведені в таблиці 1 [7, с.73].

Таблиця 1

n	1	2	3	4	5
b_n	2,405	5,520	8,654	11,791	14,931

Знаходимо власні значення енергії E_n електрона:

$$k_n^2 = \frac{2mE_n}{\hbar^2} = \frac{b_n^2}{R^2} \quad (6)$$

Звідки:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \cdot b_n^2}{2mR^2} \quad (7)$$

Визначаємо значення E_1 , E_2 та k_1 , k_2 для $n = 1, 2$ першого та другого стану електрона при $m = 0,64 \cdot 10^{-31}$ кг (*GaAs*) та $R = 10$ нм.

Сталу c_n (амплітуду хвильової функції) визначаємо з умови нормування:

$$\int_0^R |\varphi_n(r)|^2 dV = \int_0^R 2\pi r \cdot H \cdot c_n^2 \cdot J_0^2(kr) dr = \pi c_n^2 H \cdot R^2 \cdot J_1^2(k_n R) = 1 \quad (8)$$

Тоді:

$$c_n = \frac{1}{\sqrt{\pi H \cdot R \cdot J_1^2(k_n R)}} \quad (9)$$

де $J_1(k_n R) = J_1(b_n)$ – значення функції Бесселя 1-го порядку при $x = b_n$.

Застосування пакету Mathcad дозволяє побудувати графіки $\varphi_1(r)$ та густини ймовірності $\rho_1(r) = |\varphi_1(r)|^2$ для різних значень квантового числа $n = 1, 2, 3 \dots$ (рисунок 2).

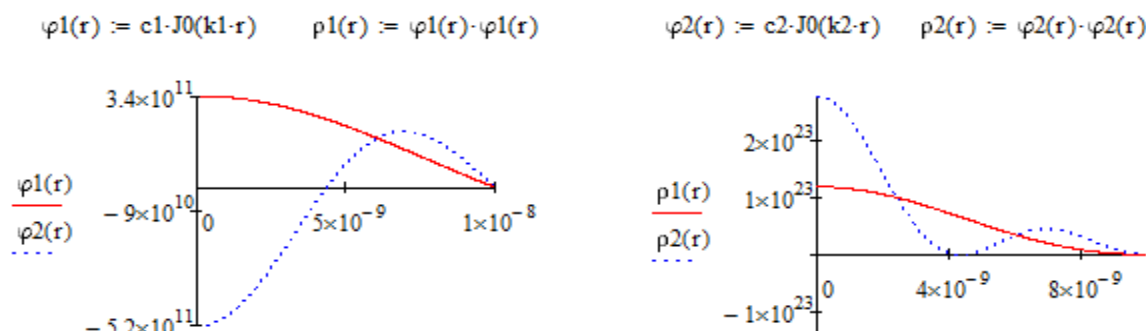


Рисунок 2. Моделювання стану електрона у циліндричній квантовій точці:

а) графік хвильової функції $\varphi_1(r)$ для $n=1,2$;

б) графік густини ймовірності $\rho_1(z)$ для $n = 1, 2$.

2. Розглянемо стан електрона у сферичній квантовій точці радіуса R (рисунок 1в). Це найпростіша модель квантової точки – аналог просторової сферичної потенціальної ями зі стінками нескінченної висоти, якщо $U \gg E$ (рисунок 1б). Квантова точка має сферичну симетрію, тому використовуємо сферичну систему координат.

Тоді рівняння Шредінгера для стаціонарних S -станів електрона має вигляд:

$$\varphi_2'' + \frac{2}{r} \varphi_2' + k_2^2 \varphi_2 = 0 \tag{10}$$

де $k_2 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ – хвильове число.

Рівняння (10) є одним з різновидів рівнянь Бесселя та має наступне рішення:

$$\varphi_2(r) = \frac{c_2}{\sqrt{r}} \cdot J_{\frac{1}{2}}(k_2 \cdot r) = \frac{c_2}{r} \cdot \sin k_2 r \tag{11}$$

де $J_{\frac{1}{2}}(k_2 \cdot r) = \sqrt{\frac{2}{\pi k_2 r}} \cdot \sin k_2 r$ – функція Бесселя першого роду порядку $\frac{1}{2}$.

Використовуємо граничні умови:

$$\varphi_2(R) = \frac{c_2}{R} \cdot \sin k_2 R = 0 \tag{12}$$

тоді $k_2 \cdot R = n\pi$,

$$k_2 = \frac{n \cdot \pi}{R} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \tag{13}$$

Визначаємо власні дискретні значення енергії для електрона у сферичній квантовій точці:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2}{2mR^2} \cdot n^2 = \frac{h^2}{8mR^2} \cdot n^2 \tag{14}$$

де $n = 1, 2, 3 \dots$ квантове число.

Сталу інтегрування c_2 (амплітуду хвильової функції) визначаємо з умови нормування:

$$\int_0^R |\varphi(r)|^2 \cdot dV = \int_0^R 4\pi r^2 \cdot \frac{c_2^2}{r^2} \sin^2 k_2 r \cdot dr = 4\pi c_2^2 \int_0^R \sin^2 k_2 r \cdot dr = 2\pi c_2^2 \cdot R = 1 \tag{15}$$

Тоді:

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi R}} \quad (16)$$

та

$$\varphi_2(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi R}} \cdot \frac{\sin k_2 r}{r} = \frac{1}{\sqrt{2\pi R} \cdot r} \cdot \sin \frac{n\pi}{R} \cdot r \quad (17)$$

Застосування пакету Mathcad дозволяє побудувати графіки залежності $\varphi_2(r)$ та густини ймовірності $\rho_2(r) = |\varphi_2(r)|^2$ для $n=1, 2$ (рисунок 3).

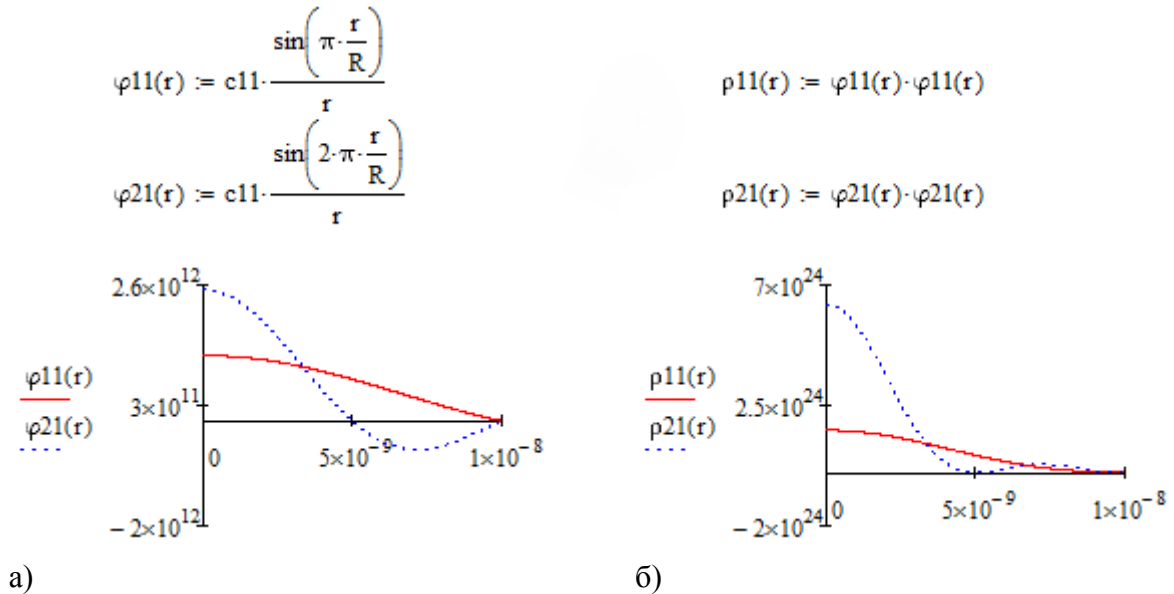


Рисунок 3. Моделювання стану електрона у сферичній квантовій точці:

а) графік для хвильової функції $\varphi_2(r)$ для $n=1,2$;б) графік для густини ймовірності $\rho_2(r)$ для $n=1,2$.

3. Розглянемо проходження частинки крізь потенціальний бар'єр у випадку, коли її повна енергія E менша висоти бар'єра U_0 [5]. Рівняння Шредінгера для електрона має вигляд:

$$\varphi''(x) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \cdot \varphi(x) = 0 \quad (18)$$

Потенціальна енергія для області I: $U_1 = 0$; для області II: $U_2 = U_0$; для області III: $U_3 = 0$ (рисунок 4).

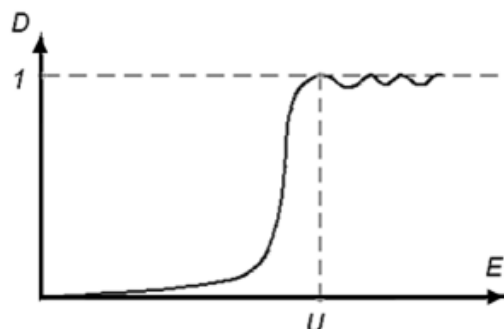
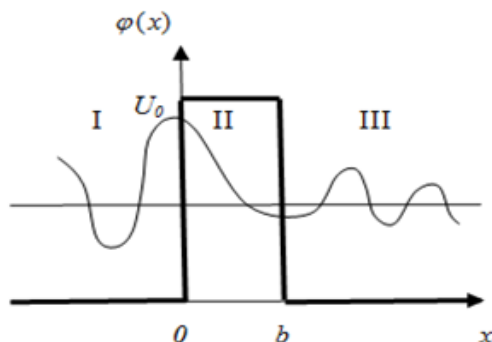
Тоді:

$$\begin{cases} \varphi_1'' + \frac{2mE}{\hbar^2} \cdot \varphi_1 = 0, & \text{для } x < 0 \\ \varphi_2'' + \frac{2m}{\hbar^2} \cdot (E - U_0) \cdot \varphi_2 = 0, & \text{для } 0 \leq x \leq b \\ \varphi_3'' + \frac{2mE}{\hbar^2} \cdot \varphi_3 = 0, & \text{для } x > b \end{cases} \quad (19)$$

Рішення рівняння (18) Шредінгера мають вигляд:

$$\begin{cases} \varphi_1(x) = A_1 \cdot e^{ik_1x} + B_1 \cdot e^{-ik_1x} & \text{для } x < 0 \\ \varphi_2(x) = A_2 \cdot e^{ik_2x} + B_2 \cdot e^{-ik_2x} & \text{для } 0 \leq x \leq b \\ \varphi_3(x) = A_3 \cdot e^{ik_1x} & \text{для } x > b \end{cases} \quad (20)$$

де $k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$, $k_2 = \frac{\sqrt{2m(E-U_0)}}{\hbar}$ – хвильові числа.



а)

б)

Рисунок 4. а) потенціальний бар'єр: b – ширина, U_0 – висота бар'єру; б) коефіцієнт прозорості.

Визначасмо сталі інтегрування: $A_1 = 1$ – амплітуда падаючої хвилі; B_1 – амплітуда відбитої хвилі; A_2, B_2 – амплітуди хвиль для потенціального бар'єру; A_3 – амплітуда хвилі, яка пройшла потенціальний бар'єр. Використовуємо відповідні граничні умови:

$$\begin{cases} \varphi(x=0): A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \\ \varphi'(x=0): k_1(A_1 - B_1) = k_2(A_2 - B_2) \\ \varphi(x=b): A_2 e^{ik_2b} + B_2 \cdot e^{-ik_2b} = A_3 \cdot e^{ik_1b} \\ \varphi'(x=b): k_2(A_2 e^{ik_2b} - B_2 \cdot e^{-ik_2b}) = k_1 A_3 \cdot e^{ik_1b} \end{cases} \quad (21)$$

Тоді

$$A_3 = \frac{4 \cdot k_1 \cdot k_2}{c} \cdot A_1, \quad (22)$$

де $c = (k_1 + k_2)^2 \cdot e^{i(k_1 - k_2)b} - (k_1 - k_2)^2 \cdot e^{i(k_1 + k_2)b}$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right) e^{i(k_1 - k_2)b} \cdot A_3 \quad (23)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) e^{i(k_1 + k_2)b} \cdot A_3 \quad (24)$$

$$B_1 = A_2 + B_2 - A_1 \quad (25)$$

Коефіцієнт проходження (прозорості або пропускання) потенціального бар'єру дорівнює (рисунок 4):

$$D(E) = \frac{|A_3|^2}{|A_1|^2} = \left| \frac{4 k_1 k_2}{c} \right|^2 = \frac{4 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2}{(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2 bk_2 + 4 k_1^2 k_2^2} \quad (26)$$

Аналіз коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру показує: по-перше, у випадку, коли енергія електрона менша висоти бар'єра $E_1 < U_0$ є ймовірність проходження кризь

потенціальний бар'єр з області I у область III. Це явище має назву тунельного ефекту. По-друге, у випадку, коли енергія більша висоти бар'єра $E_2 > U_0$ та електрон «пролітає» над потенціальним бар'єром, є ймовірність його відбиття від бар'єру.

В деяких випадках коефіцієнт проходження крізь багатобар'єрні шарові гетероструктури (наприклад, двобар'єрну систему) буде більший за коефіцієнт проходження для кожного окремого бар'єру. Цей ефект виникає внаслідок інтерференції хвиль де Бройля і має назву резонансного тунельного ефекту. Застосування математичного пакету Mathcad дозволяє провести математичне, комп'ютерне моделювання тунельного ефекту та дослідити залежність коефіцієнту прозорості бар'єру від параметрів бар'єру (b, U_0) та від повної енергії електрона. Для анімації графіка $D(E)$ в залежності від значення ширини в потенціального бар'єру використовується команда «Animation» на панелі інструментів Mathcad та відповідна формула (26) для коефіцієнта прозорості $D(E, b)$. Використовується зміна FRAME q : $b = b_0 \cdot q$, де $b_0 = 5 \text{ нм}$. Діапазон величини FRAME $q = 1 \dots 10$ та частота кадрів задається у діалоговому вікні команди «Animation», у якому і спостерігається зміна відповідного графіку $D(E)$.

Висновки. Розглянуто математичні моделі циліндричної та сферичної квантових точок та процесу проходження електрона крізь потенціальний бар'єр (тунельний ефект). Розроблена програма досліджень цих явищ за допомогою математичного пакету MathCad. Результати досліджень та математичного, комп'ютерного моделювання цих кванторозмірних гетероструктур використовуються при організації та проведенні імітаційних лабораторних робіт з курсу «Фізичні основи сучасних інформаційних технологій».

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Айрапетян Д. Б. Моделирование ограничивающего потенциала для цилиндрической квантовой точки / Д. Б. Айрапетян, Т. В. Котанджян, О. Х. Тевосян. – 2014. – с.410-414. – (Известия НАН Армении, физика, т.49, №6).
2. Балакин А. Б. Три лекции по теории функций Бесселя / Балакин А. Б. – Казань, 2009. – 39с. (Методы математической физики. Специальные функции. Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина. Физический факультет).
3. Дьяконов В. П. MathCad 2001i: энциклопедия / Дьяконов В. П. – СПб.: Питер, 2004. – 832 с.
4. Компьютерное моделирование микро- и нано-структур: Учебное пособие для студентов / [Усанов Д. А. и др.]. – Саратов, 2008. – 100 с.
5. Ландау Л. Д. Квантовая механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1972. – 368с.
6. Смирнов С. Б. Расчет энергетического спектра S-электронов сферической квантовой точки на основе узкозонных полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ в матрице GaP / Смирнов С. Б., Марончук И. Е., Марончук И. И., Петраш А. Н. – Севастополь, 2011. – с.164-168. – (Збірник наукових праць ШУЯЕтаП «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії»).
7. Специальные функции математической физики: Научно-популярное издание / Кафтанов Ю. В. – Харьков: «Новое слово», 2009. – 596с.

Diomina Natalia, Morozov Mukola

Tavria State Agrotechnological University, Melitopol

THE MODELING OF QUANTUM-DIMENSIONAL HETEROSTRUCTURES IN THE ORGANIZATION OF A SIMULATION LABS ON «PHYSICAL BASIS OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES»

The article is devoted to the mathematical, computer models of quantum-dimensional heterostructures (quantum wire, unidimensional potential pit, potential barrier) using the software package MathCad for the study the behavior of electrons in these nanostructures and for the realization of virtual laboratory works on «Physical basis of modern information technologies». Laboratory works are designed for students of the specialty

«Computer Science». Of particular interest is the simulation of the state of electrons in a cylindrical quantum wire and consideration of the resonant tunneling effect.

The mathematical models of cylindrical and spherical quantum wire and the process of electron passage through a potential barrier are considered. The application of mathematical package MathCad allows not only to conduct mathematical, computer modeling of the tunnel effect, but also to construct and investigate dependencies.

Keywords: simulation labs, quantum-dimensional heterostructures, modeling MathCad, tunnel effect, quantum wire.

Демина Наталя, Морозов Николай

Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ КУРСА «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

В работе рассмотрена организация имитационных лабораторных работ на базе математического, компьютерного моделирования с использованием пакета MathCad по курсу «Физические основы современных информационных технологий». Особый интерес представляет моделирование состояния электронов в цилиндрической квантовой точке и рассмотрение резонансного туннельного эффекта.

Ключевые слова: имитационные лабораторные работы, наногетероструктуры, моделирование MathCad, туннельный эффект, квантовая точка.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Дьоміна Наталя Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету.

Коло наукових інтересів: лазерна доплерівська і голографічна інтерферометрія вимірювання швидкості частинок та параметрів коливань шорстких поверхонь), дослідження контактної взаємодії елементів штампів.

Морозов Микола Вікторович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету.

Коло наукових інтересів: лазерна доплерівська і голографічна інтерферометрія вимірювання швидкості частинок та параметрів коливань шорстких поверхонь), дослідження контактної взаємодії елементів штампів.

УДК 539.2(075.8)

Колінько Сергій¹, Бутенко Тетяна¹, Кулик Людмила²

¹Черкаський державний технологічний університет, ²Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ОЗНАЙОМЛЕННЯ З МЕТОДОМ ТРАНСМІСІЙНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ У ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ З ФІЗИКИ

У статті розкрито методичні аспекти формування предметної компетентності майбутніх інженерів під час вивчення навчальної дисципліни «Загальний курс фізики». Запропоновано технологію удосконалення лабораторного практикуму з фізики з метою практичного ознайомлення майбутніх фахівців інженерних спеціальностей з прикладами використання фізичних законів та закономірностей у роботі різноманітних технічних пристроїв. Розглянуто переваги трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) над оптичною мікроскопією у дослідженні структури та фазового складу тонких плівок. Виокремлено найважливіші завдання, що вирішуються плівковим матеріалознавством – отримання плівкових матеріалів з широким спектром властивостей (електрофізичних, механічних, оптичних), розвиток методів синтезування плівкових систем з наперед заданими властивостями. Представлено методичку організації і проведення лабораторної роботи з вивчення фізичних основ трансмісійної електронної мікроскопії. Використання пропонованої лабораторної роботи під час вивчення загального курсу фізики сприятиме підвищенню рівня фахової підготовки студентів інженерних спеціальностей.

Ключові слова: фізика, лабораторний практикум, трансмісійна електронна мікроскопія, фахова підготовка, інженерні спеціальності.

Постановка проблеми. Важливим аспектом викладання курсу загальної фізики студентам інженерних спеціальностей є практичне ознайомлення майбутніх фахівців з