

УДК 273.5.016+378.016]:620.3
DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/43-1-29>

Вікторія БОНДАРЕНКО,
orcid.org/0000-0001-5158-4438
аспірантка кафедри фізики та методики навчання фізики
Бердянського державного педагогічного університету
(Бердянськ, Запорізька область, Україна) viktoriabondarenko1995@gmail.com

Артем ЦЬОМКАЛО,
orcid.org/0000-0001-7802-2216
аспірант кафедри фізики та методики навчання фізики
Бердянського державного педагогічного університету
(Бердянськ, Запорізька область, Україна) jfrkoe4321@gmail.com

Геннадій ШИШКІН,
orcid.org/0000-0003-2617-6699
доктор педагогічних наук, професор,
професор кафедри фізики та методики навчання фізики
Бердянського державного педагогічного університету
(Бердянськ, Запорізька область, Україна) ur3qugs@gmail.com

ОСНОВИ НАНОФІЗИКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ У ЗАКЛАДАХ СЕРЕДНЬОЇ ТА ВИЩОЇ ПЕДАГОГІЧНОЇ ОСВІТИ

Сучасне суспільство вимагає від системи освіти формування в молоді системи знань, необхідних для сприйняття сучасних досягнень у галузі науки і техніки. Успіхи в розвитку техніки фахівці пов'язують із сучасними досягненнями нанофізики, дослідженнями наноструктур та розвитком нанотехнологій. Найближчі десятиліття стануть епохою нанотехнологій. Темпи впровадження сучасних технологій будуть визначати рівень розвитку суспільства.

Наше дослідження присвячене аналізу проблеми формування базових знань із нанофізики та сучасних нанотехнологій у здобувачів освіти закладів середньої та вищої освіти. Проведений аналіз навчальних програм та підручників із фізики закладів середньої освіти показав, що менше 2% від загального обсягу навчального матеріалу містить інформацію про нанотехнології. Ураховуючи результати проведеного анкетного опитування вчителів із проблеми дослідження, можна стверджувати про необхідність змін у навчальних програмах із фізики та введення спеціальних курсів із нанофізики в систему підготовки майбутніх учителів.

Упровадження сучасних досягнень фізики в освітній процес закладів середньої освіти необхідно починати з відповідної підготовки майбутніх учителів у педагогічних університетах. Звертається увага на необхідність уведення в освітні програми педагогічних університетів таких питань, як: типи наноструктур та їх властивості; особливості фізичних властивостей наноматеріалів та їх застосування в технологіях; основні галузі застосування наноматеріалів; фізичні ефекти на поверхні наноструктур та методи їх дослідження.

Для підвищення якості організації навчального процесу та враховуючи складність вивчення нанооб'єктів, обґрунтовується необхідність застосування цифрових технологій навчання. Під час вивчення наноструктур у закладах вищої педагогічної освіти доречно використовувати комп'ютерне моделювання, яке дозволяє адекватно відобразити об'єкти наносвіту. Для реалізації такого підходу можуть бути використані пакети програмування з молекулярної динаміки. Як засоби комп'ютерного моделювання нанооб'єктів пропонується методика формування уявних моделей, що сприяє засвоєнню навчального матеріалу на якісному рівні.

Ключові слова: навчання фізики, освітній процес, нанофізика, нанотехнологія, наноструктура, цифрові технології.

Victoria BONDARENKO,

orcid.org/0000-0001-5158-4438

*Graduate Student at the Department of Physics and Methods of Teaching Physics
Berdyansk State Pedagogical University
(Berdyansk, Zaporozhye region, Ukraine) viktoriabondarenko1995@gmail.com*

Artem TSOMKALO,

*Graduate Student at the Department of Physics and Methods of Teaching Physics
Berdyansk State Pedagogical University
(Berdyansk, Zaporozhye region, Ukraine) jfrkoe4321@gmail.com*

Gennadiy SHYSHKIN,

orcid.org/0000-0003-2617-6699

*Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Physics and Methods of Teaching Physics
Berdyansk State Pedagogical University
(Berdyansk, Zaporozhye region, Ukraine) ur3qugs@gmail.com*

FUNDAMENTALS OF NANOPHYSICS AND NANOTECHNOLOGIES IN SECONDARY AND HIGHER PEDAGOGICAL EDUCATION INSTITUTIONS

Modern society requires the education system to form a system of knowledge necessary for the perception of modern advances in science and technology among young people. Experts attribute the success in the development of technology to modern advances in nanophysics, research on nanostructures and the development of nanotechnology. The coming decades will be an era of nanotechnology. The pace of implementation of modern technologies will determine the level of society development.

Our research is devoted to the analysis of the problem of formation of basic knowledge in nanophysics and modern nanotechnologies among students of secondary and higher education. An analysis of curricula and textbooks in physics in secondary schools showed that less than 2% of the total educational material contains information about nanotechnology. Given the results of a questionnaire survey of teachers on the research problem, it can be argued about the need for changes in the curriculum in physics and the introduction of special courses in nanophysics in the system of training future teachers.

The introduction of modern achievements of physics in the educational process of secondary education institutions need to start with the appropriate training of future teachers in pedagogical universities. Attention is drawn to the need to introduce into the educational programs of pedagogical universities such issues as: types of nanostructures and their properties; features of physical properties of nanomaterials and their application in technologies; main areas of application of nanomaterials; physical effects on the surface of nanostructures and methods of their research.

To improve the quality of the educational process and given the complexity of the study of nanoobjects, the need of learning digital technologies is justified. In the studying nanostructures in institutions of higher pedagogical education, it is appropriate to use computer modeling, which allows to adequately reflect the objects of the nanoworld. Molecular dynamics programming packages can be used to implement this approach. The means of computer modeling of nanoobjects offer a method of forming their imaginary models, which promotes the assimilation of educational material at a high quality level.

Key words: *teaching physics, educational process, nanophysics, nanotechnology, nanostructure, digital technologies.*

Постановка проблеми. Сучасна фізика досягла такого рівня, що її здобутки дали можливість впливати на структуру речовини на рівні окремих молекул і атомів. Ці досягнення дозволили здійснювати принципово нові підходи до розробки сучасних технологій, які отримали назву «нанотехнології». Створення та дослідження наноструктур із заданими властивостями входить до найважливіших технологічних проблем сучасної науки і техніки. Це пов'язано з унікальними властивостями матеріалів, що перебувають у наноструктурованому стані. Розробка матеріалів із заданими властивостями призводить до загальної тенденції до мініатюризації виробів, створення принципово нових об'єктів, пристроїв і навіть нових галузей виробництва.

Науковці припускають, що найближчі десятиліття стануть епохою нанотехнологій, яку розглядають як третій етап науково-технічної революції. Досягнення в галузі нанотехнологій буде визначати рівень розвитку суспільства. Нанотехнології – це широкий набір наукових, технологічних і виробничих напрямів, які об'єднуються в єдину технологічну культуру. У цьому разі йдеться не тільки про нові технології, а й про процеси, які можуть змінити сегменти промисловості, економіку, соціальну сферу. Успіхи в цій галузі у XXI столітті будуть визначати економічний статус держави.

Розвиток і впровадження сучасних нанотехнологій вимагає певного перегляду нових підходів до фізичної та інженерної освіти молоді. Одним

з основних завдань навчання фізики у закладах вищої та середньої освіти є формування фізико-технічної картини навколишнього середовища (Шишкін, 2019). Для формування такої сучасної картини та підготовки молоді до сприйняття та розуміння сучасних технологій необхідно вводити і більше уваги приділяти вивченню нанорозмірних об'єктів на основі базових знань із нанофізики. В освітні програми з фізики доцільно вводити навчальний матеріал про фізичні властивості наноматеріалів, їх застосування у сучасних приладах та технологіях.

Досягнення в дослідженні наноструктур формують нові перспективні напрями, які можна використовувати у багатьох сферах діяльності людини та які стають невід'ємною частиною нашого сучасного життя. Успіхи нанотехнологій незаперечні, їх важко переоцінити. З огляду на це, суспільство вимагає від системи освіти формування у молоді уявлень про сучасний рівень розвитку науки, техніки, технологій. Ураховуючи те, що науковою базою розвитку нанотехнологій є знання з нанофізики, то вивчення закономірностей мікро- і наносистем у курсі фізики відповідає принципу професійної спрямованості навчання. Формування в студентів-фізиків педагогічних університетів базових знань із нанофізики, на основі яких формуються уявлення про наноструктури та нанотехнології, є однією з важливих проблем сучасної фізичної освіти.

Аналіз досліджень. Загальноприйнятим є вживання префікса «нано-» щодо матеріалів (природного або штучного походження), які містять частинки у вигляді груп або агломератів, 50 відсотків (як мінімум) із яких мають один із лінійних розмірів у межах від 1 до 100 нанометрів. На можливість створення матеріалів із розмірами зерен менше 100 нм, які повинні відповідати певним вимогам і мати корисні додаткові властивості (порівняно з традиційними мікроструктурними матеріалами), вказав німецький учений Г. Глейтер у 1981 році. Він також увів у науковий обіг терміни «нанокристалічні», «наноструктурні», «нанофазні», «нанокомпозитні матеріали» (Gleiter, 1981; Gleiter, 2000; Birringer, 1984).

Інтерес до нового класу матеріалів постійно зростає (як у галузі фундаментальної та прикладної наук, так і в промисловості) (Алферов та ін., 2003). Це положення зумовлено:

- прагненням до мініатюризації виробів;
- унікальністю властивостей матеріалів у наноструктурованому стані;
- необхідністю розробки та впровадження нових матеріалів із якісно та кількісно новими властивостями;

- розробкою нових підходів і методів у розробку сучасних технологій;

- практичним упровадженням у розробку сучасних приладів для дослідження і контролю наноматеріалів;

- розвитком і впровадженням нових технологій (іонно-плазмові технології обробки поверхні й створення тонких шарів і плівок, LIGA-технології, що становлять послідовність процесів літографії, гальваніки, технологій отримання та формування нанопорошків тощо).

Розвиток фундаментальних і прикладних уявлень про наноматеріали та нанотехнології вже в найближчі роки може привести до кардинальних змін у багатьох сферах діяльності людини: матеріалознавстві, енергетиці, електроніці, інформатиці, машинобудуванні, медицині, сільському господарстві, екології. Поряд із цифровими інформаційними технологіями і біотехнологіями нанотехнології є фундаментом науково-технічного розвитку у XXI столітті (Алферов та ін., 2003). Термін «нанотехнологія» запропонований японським ученим Н. Танігучі у 1974 році (Андрієвський, Рагуля, 2005).

На наш погляд, найбільш повноцінною можна вважати таку термінологію:

наноматеріали – матеріали, що містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм і мають якісно нові властивості;

нанотехнологія – сукупність методів і прийомів, що забезпечують можливість контролювати створення та модифікування об'єктів, дозволяють здійснювати їх інтеграцію в повноцінну систему більшого масштабу;

наносистемна техніка – повністю або частково створена на основі наноматеріалів і нанотехнологій функціонально закінчена система або пристрій, характеристики яких відрізняються від показників систем, створених за традиційними технологіями.

Метою статті є аналіз проблеми формування уявлень про наноструктури та нанотехнології у здобувачів закладів вищої педагогічної освіти на основі базових знань із нанофізики.

Виклад основного матеріалу. Ураховуючи значний вплив нанотехнологій на розвиток суспільства та сучасної промисловості, виникає потреба впровадження базових знань із нанофізики в межах курсу фізики закладів середньої освіти та спеціальних курсів у педагогічних університетах. Підвищення рівня знань здобувачів середньої освіти про наноструктури та нанотехнології необхідно починати з відповідної підго-

товки майбутніх учителів фізики. Із метою виявлення проблем упровадження сучасних знань про наноструктури та нанотехнології в освітній процес із фізики в закладах середньої та вищої освіти проведено педагогічне дослідження.

На початковому етапі дослідження виявлено стан упровадження та рівень знань здобувачів освіти про наноструктури та нанотехнології. У дослідженні взяли участь студенти молодших курсів педагогічного університету та учні старших класів закладів середньої освіти. Проаналізовано сучасну наукову та методичну літературу з проблем підвищення якості фізичної освіти молоді.

Результати анкетного опитування показали, що 3% опитаних мають уявлення про нанотехнології, 12% – тільки загальне уявлення, не розуміють галузі застосування та ролі нанотехнологій у науково-технічному прогресі. Анкетне опитування вчителів фізики закладів середньої освіти свідчить про те, що 72% учителів вважають за необхідне ознайомлювати здобувачів освіти з властивостями наноструктур на основі базових знань із нанофізики на якісному рівні.

Формування знань на якісному рівні найбільш ефективно можна формувати шляхом побудови уявних моделей процесів, що вивчаються (Зикова, Шишкін, 2017). Звертається увага на важливу роль моделей у формуванні практико орієнтованих знань здобувачів освіти. Авторами запропоновано етапи формування різних типів моделей фізичних об'єктів та процесів.

Для формування у здобувачів освіти уявлень про наноструктури необхідно, по-перше, визначитися зі змістом навчального матеріалу та його узгодженням з освітніми програмами; по-друге, розробити методiku формування базових знань основ нанофізики з урахуванням складності навчального матеріалу.

Вивчення складного навчального матеріалу не може відбуватися без збудження інтересу та пізнавальної активності здобувачів освіти. Проведені дослідження довели, що розвиток пізнавального інтересу відбувається одночасно з розвитком пізнавальних здібностей. На формування мотивації до навчання суттєво впливають ті джерела інформації, якими користується сучасна молодь. Дослідження засвідчили, що учні та студенти віддають перевагу сучасним цифровим джерелам інформації (Шишкін, Зикова, 2018).

У науковій та методичній літературі вчені достатньо уваги приділяли застосуванню цифрових технологій під час формування практико орієнтованих та фізико-технічних знань (Косоков, Шишкін, 2017; Зикова, Шишкін, 2020), розвитку

творчих здібностей та дослідженню фізичних явищ (Keller at al., 2006; Gregorcic, Bodin, 2017; Shyshkin, Bandurov, 2014;), методиці проведення віртуальних лабораторних робіт (Піменов та ін., 2014; Finkelstein at al., 2005).

Для впровадження сучасних досягнень нанофізики в освітній процес закладів середньої освіти необхідні відповідні зміни в системі підготовки майбутніх учителів фізики та перепідготовки вчителів фізики. Для підвищення якості навчання фізики в закладах вищої педагогічної освіти виникає потреба в розробленні змісту та методики вивчення основ нанофізики. Зважаючи на складність навчального матеріалу для розуміння, методiku вивчення нового матеріалу необхідно будувати з максимальним залученням цифрових технологій навчання.

Проаналізувавши навчальні програми та підручники з фізики закладів середньої освіти, ми дійшли висновку, що лише у 2% від загального обсягу матеріалу згадується про нанотехнології. Ураховуючи результати аналізу проведеного анкетного опитування та тестування учнів та студентів, можна зробити висновок про необхідність уведення основ нанофізики в освітні програми закладів освіти.

Аналіз освітньо-професійних програм вищих педагогічних закладів освіти свідчить про те, що, як і в закладах середньої освіти, ми маємо лише згадки про нанотехнології. У процесі використання спеціальних курсів та факультативних занять з основ нанофізики кількість навчальних годин досягає 5% від загальної кількості.

Ознайомлення учнів з основами сучасних фізичних теорій і технологій необхідно починати з відповідної підготовки студентів-фізиків педагогічних університетів. Для забезпечення більш глибокого вивчення основ нанофізики та нанотехнологій у закладах середньої та вищої освіти необхідне коригування навчальних програм та освітніх стандартів підготовки майбутніх учителів фізики.

У нанофізиці розроблено методи отримання наноструктур та наноматеріалів, із якими необхідно ознайомити майбутніх учителів фізики. Основні методи отримання наноматеріалів ділять на технологічні групи (рис. 1).



Рис. 1. Методи отримання наноматеріалів

Широке застосування в отриманні наноматеріалів знайшли комплексні методи, які одночасно використовують (послідовно або паралельно) кілька різних технологій. Перспективними є методи, в основу яких покладено отримання аморфних прекурсорів, які становлять мономерні або полімерні сполуки, що містять необхідні елементи. Унаслідок певного технологічного процесу вони перетворюються в кінцевий продукт.

Галузь застосування наноматеріалів визначається специфічними фізичними властивостями наноструктур. Найбільше на зміни властивостей наноматеріалів впливають розміри кристалів у діапазоні від 10 до 100 нм. До основних фізичних чинників, які впливають на властивості наноматеріалів, зараховують:

- частку атомів, які містяться на поверхневому шарі матеріалу, що призводить до суттєвого спотворення кристалічної решітки або навіть зміни її структури;
- збільшення об'ємної частки меж поділу зі зменшенням розмірів (зерен) кристалів у наноматеріалах;
- схильність наноматеріалів до появи кластерів, що призводить до принципів саморегуляції кластерних структур, які широко використовуються, наприклад, в оптиці та електроніці (Андриєвский, 2002; Нащекин, 2003);
- наявність деякої ефективної довжини вільного пробігу носіїв (дифузійна довжина, довжина вільного пробігу дислокації);
- вияв квантових розмірних ефектів у разі розмірів кристалів менше 10 нм (Андриєвский, 2002; Головин, 2003).

На спеціальних курсах із проблем нанотехнологій і наноматеріалів необхідно ознайомити студентів з основними галузями застосування наноматеріалів, як-от конструкційні та інструментальні матеріали; промислові технології; ядерна енергетика; електронна техніка; медицина і біологія; військова справа; приладобудування.

У всіх інваріативних розділах курсу загальної та теоретичної фізики необхідно виділяти теми, які стосуються закономірностей мікро- та наносвіту. На вивчення цих тем необхідно виділяти більше навчального часу із зазначенням можливостей застосування їх у сучасних технологічних процесах. Для варіативних дисциплін необхідним є створення спецкурсів «Нанofізика», «Нанотехнології», які повинні охоплювати такі розділи, як надпровідні наносистеми; магнітні наноструктури; напівпровідникові наноструктури (електронні та оптичні властивості, технології атомарного і нанометрового масштабу на основі зондових,

електронно-променевих та іонно-променевих методів).

На кафедрі фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету ведеться певна робота з удосконалення системи підготовки магістрів-фізиків у галузі нанотехнологій. Розроблено спеціальний курс «Сучасні наноматеріали». Магістри та аспіранти залучаються до наукової та експериментальної роботи кафедри в галузі наноматеріалів. Практичне використання набутих навичок застосування цифрових технологій та моделювання фізичних процесів, що відбуваються в наноструктурах, знайшли своє відображення в спільних публікаціях студентів із викладачами нашого університету (Bandurov at al., 2019; Suchikova at al., 2020, 2021).

Висновки. Система побудови курсів фізики закладів середньої та вищої освіти потребує оновлення сучасними досягненнями в науці, які суттєво впливають на розвиток суспільства. Прогрес у сучасній техніці фахівці пов'язують з успіхами в дослідженні наноструктур та розвитком нанотехнологій. Підсумовуючи вищезазначене, можемо констатувати, що впровадження в освітній процес закладів освіти сучасних досягнень нанofізика є актуальною проблемою методики навчання фізики. Упровадження цих досягнень в освітній процес із фізики необхідно починати з відповідної підготовки майбутніх учителів фізики в педагогічних університетах. В освітньо-професійні програми педагогічних університетів необхідно ввести такі питання, як: типи наноструктур та їх властивості; особливості фізичних властивостей наноматеріалів та їх застосування в технологіях; основні галузі застосування наноматеріалів; фізичні ефекти на поверхні наноструктур; методи дослідження наноструктур. Наші дослідження довели, що підвищення рівня знань студентів у галузі нанofізика та нанотехнологій найбільш ефективно відбувається за рахунок міждисциплінарної інтеграції дисциплін природничої підготовки та використання цифрових технологій навчання. Методика формування знань орієнтується на формування якісних фізичних моделей нанооб'єктів та наноструктур засобами комп'ютерного моделювання та застосування цифрових приладів під час навчального експерименту.

Подальших досліджень потребує розробка методики отримання здобувачами освіти наноструктур у межах освітнього процесу та експериментального дослідження властивостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алферов Ж. И., Копьев П. С., Сурис Р. А. и др. Наноматериалы и нанотехнологии. *Нано- и микросистемная техника*. 2003. № 8. С. 3–13.
2. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. Наноструктурные материалы : уч. пособие. Москва : Академия, 2005. 117 с.
3. Андриевский Р. А. Наноматериалы : концепция и современные проблемы. *Рос. хим. ж.*, 2002, т. XLVI. № 5, С. 50–56.
4. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию. Москва : Машиностроение–1, 2003. 112 с.
5. Зикова К. М., Шишкін Г. О. Фізичні моделі та їх формування в системі профільного навчання. *Наукові записки. РВВ КДПУ ім. В. Винниченка*. Частина 1. Кропивницький, 2017. Вип. 12. С. 67–73.
6. Зикова К. М., Шишкін Г. О. Формування предметної компетентності при вивченні газових законів з використанням ІКТ. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка*. Кам'янець-Подільський, 2020. Вип. 26. С. 60–63. URL: <https://doi.org/10.326626/2307-4507.2020-26.60-63>
7. Косоогов І. Г., Шишкін Г. О. Практико орієнтовані задачі з фізики в навчальному процесі загальноосвітньої школи. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету*. Чернігів, 2017. Вип. 146. С. 144–147.
8. Информационный анализ наноструктурных особенностей композитных фуллереноосновных пленок С60-СdTe / А. В. Нашекин, А. Г. Колмаков, С. О. Когновицкий и др., *Перспективные материалы*, 2003. № 1. С. 36–45.
9. Піменов Д. О., Сосницька Н. Л. Дослідження стану термодинамічної системи на основі імітаційного комп'ютерного моделювання. *Наукові записки*. Кіровоград : РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка, 2014. Вип. 5. ч. 2. С. 160–165.
10. Шишкін Г. О., Зикова К. М. Аналіз джерел здобуття інформації учнями при вивченні фізики. *Наукові записки: РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка*. Кропивницький, 2018. Вип. 168. С. 292–294.
11. Шишкін Г. О. Формування фізико-технічної картини навколишнього середовища при вивченні фізики. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка*. Кам'янець-Подільський, 2019. Випуск 25. С. 46–49.
12. S. O. Bandurov, R. S. Lozhkin, G. O. Shishkin. Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration"*, 2019, № 4, p. 169–173.
13. Finkelstein N. D., Adams W. K., Keller C. J., Kohl P. B., Perkins K. K., Podolefsky N. S. and LeMaster R. When learning about the real world is better done virtually: a study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Phys. Rev. Spec. Top. – Phys. Educ. Res.* 2005 1 1–8.
14. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta mater.*, 2000. V. 48. P. 1–29.
15. Gleiter H. In: Deformation of Polycrystals. Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science (Eds. N. Hansen, T. Leffers, H. Lithold). Roskilde, RISO Nat. Lab., 1981, p. 15–21.
16. Gregorcic B, Bodin M. Algodoo: a tool for encouraging creativity in physics teaching and learning. *Phys. Teach*, 2017. 55 25–8. DOI: 10.1119 / 1.4972493
17. Keller C. J., Finkelstein N. D., Perkins K. K. and Pollock S. J. Assessing the effectiveness of a computer simulation in conjunction with tutorials in introductory physics in undergraduate physics recitations. *AIP Conf. Proc.* 2006. 818 109–12. doi.org/10.1063/1.2177035
18. Y. Suchikova, N. Kosach, V. Bolshakov, G. Shishkin. Synthesized nanostructures formation time effect on their morphological quality indicators – pore diameter increase in nanostructured coatings. *Ukrainian Metrologica Journal*, 2020. № 4. p. 43–49. doi.org/10.24027/2306-7039.4.2020.224294
19. Y. O. Suchikova, S. S. Kovachov, G. O. Shishkin, D. O. Pimenov, A. S. Lazarenko, V. V. Bondarenko, I. T. Bogdanov. Functional model for the synthesis of nanostructures of the given quality level. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2021; 2 (107): 72-84. DOI: 10.5604/01.3001.0015.0244/
20. Shyshkin G. A., Bandurov S. O. Digital electronics in an educational experiment in physics. *European science review*, Vienna. September-October, 2014. № 9–10. pp. 84–87.

REFERENCES

1. Alferov Zh. I., Kopev P. S., Suris R. A. i dr. Nanomaterialy i nanotekhnologii. [Nanomaterials and nanotechnology] *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*. 2003. #8. S. 3-13. [in Russian].
2. Andrievskiy R. A., Ragulya A. V. Nanostrukturnye materialy [Nanostructured materials]: uch. posobie. M.: Akademiya, 2005. 117 s. [in Russian].
3. Andrievskiy R. A. Nanomaterialy : kontseptsiya i sovremennyye problemy [Nanomaterials: Concept and Contemporary Problems]. *Ros. him. zh.*, 2002, t. XLVI. #5, s. 50-56. [in Russian].
4. Golovin Yu. I. Vvedenie v nanotekhnologiyu [Introduction to nanotechnology]. M.: Mashinostroenie–1, 2003. 112 s. [in Russian].
5. Zykova K. M., Shyshkin H. O. Fizychni modeli ta yikh formuvannia v systemi profilnoho navchannia [Physical models and their formation in the system of specialized training]. *Naukovi zapysky. RVV KDPU im. V. Vynnychenka*. Chastyina 1. Kropyvnytskyi, 2017. vyp. 12. S. 67-73.
6. Zykova K. M., Shyshkin H. O. Formuvannia predmetnoi kompetentnosti pry vyvchenni hazovykh zakoniv z vykorystanniam IKT [Formation of subject competence in the study of gas laws using ICT]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnogo universytetu imeni Ivana Ohiiienka*. Kamianets-Podilskyi, 2020. vyp. 26. S. 60-63. <https://doi.org/10.326626/2307-4507.2020-26.60-63>

7. Kosohov I. H., Shyshkin H. O. Praktyko-oriientovani zadachi z fizyky v navchalnomu protsesi zahalnoosvitnoi shkoly [Practice-oriented problems in physics in the educational process of secondary school [Investigation of the state of a thermodynamic system based on simulation computer modeling]. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu*. Chernihiv, 2017. vyp. 146. S. 144-147.
8. Nashchekin A. V., Kolmakov A. G., Kognovitskiy S. O. i dr. Informatsionnyy analiz nanostrukturnykh osobennostey kompozitnykh fullerenoosnovnykh plenok S60-CdTe [Informational analysis of nanostructural features of composite fullerene-base films C60-CdTe]. *Perspektivnyye materialy*. 2003. № 1. S. 36-45. [in Russian].
9. Pimenov D. O., Sosnytska N. L. Doslidzhennia stanu termodynamichnoi systemy na osnovi imitatsiinoho kompiuternoho modeliuвання [Investigation of the state of a thermodynamic system based on simulation computer modeling]. *Naukovi zapysky*. Kirovohrad: RVTs KDPU im. V. Vynnychenka, 2014. Vyp. 5. ch. 2. S. 160–165.
10. Shyshkin H. O., Zykova K. M. Analiz dzhherel zdobuttia informatsii uchniamy pry vyvchenni fizyky [Analysis of sources of information by students in the study of physics]. *Naukovi zapysky: RVV TsDPU im. V. Vynnychenka*. Krapivnytskyi, 2018. vyp. 168. S. 292-294.
11. Shyshkin H. O. Formuvannya fizyko-tekhnichnoi kartyny navkolyshnoho seredovyshcha pry vyvchenni fizyky [Formation of a physical and technical picture of the environment in the study of physics]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka*. Kamianets-Podilskiy : 2019. – Vypusk 25.: S 46-49.
12. S. O. Bandurov, R. S. Lozhkin, G. O. Shishkin. Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil. *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Methods of Acceleration»*, 2019, № 4, p. 169-173.
13. Finkelstein N. D., Adams W. K., Keller C. J., Kohl P. B., Perkins K. K., Podolefsky N. S. and LeMaster R. When learning about the real world is better done virtually: a study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Phys. Rev. Spec. Top. – Phys. Educ. Res.* 20051 1–8.
14. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta mater.*, 2000. V. 48. P. 1-29.
15. Gleiter H. In: *Deformation of Polycrystals. Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science* (Eds. N. Hansen, T. Leffers, H. Lithold). Roskilde, RISO Nat. Lab., 1981, p. 15–21.
16. Gregorcic B, Bodin M. Algodoo: a tool for encouraging creativity in physics teaching and learning. *Phys. Teach*, 2017. 55 25–8. DOI: 10.1119 / 1.4972493
17. Keller C. J., Finkelstein N. D., Perkins K. K. and Pollock S. J. Assessing the effectiveness of a computer simulation in conjunction with tutorials in introductory physics in undergraduate physics recitations. *AIP Conf. Proc.* 2006. 818 109–12. doi.org//10.1063/1.2177035
18. Y. Suchikova, N. Kosach, V. Bolshakov, G. Shishkin. Synthesized nanostructures formation time effect on their morphological quality indicators – pore diameter increase in nanostructured coatings. *Ukrainian Metrologica Journal*, 2020. № 4. p. 43-49. doi.org/10.24027/2306-7039.4.2020.224294
19. Y. O. Suchikova, S. S. Kovachov, G. O. Shishkin, D. O. Pimenov, A. S. Lazarenko, V. V. Bondarenko, I. T. Bogdanov. Functional model for the synthesis of nanostructures of the given quality level. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2021; 2 (107): 72-84. DOI: 10.5604/01.3001.0015.0244/
20. Shyshkin G. A., Bandurov S. O. Digital electronics in an educational experiment in physics. *European science review*, Vienna. September-October, 2014. № 9-10. pp. 84-87.