

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ СТУДЕНТОВ И ШКОЛЬНИКОВ

Elements of Nanostructure Physics for Students and Pupils

Marina Ivanova

Pskov State University, Russian Federation

Nikolai Puchkov

Pskov State University, Russian Federation

Vladimir Solovyev

Pskov State University, Russian Federation

Abstract. *Physics of nanostructures is the scientific basis of modern nanotechnologies that use the special properties of small particles with a size of about 1–100 nm, making it possible to design various novel materials with unique physical properties. Today a training of future professionals to work in this technological area is very important. Moreover, this training is desirable not only at universities, but also at schools in order to introduce nanotechnologies to the young generation. The purpose of this work is an analysis of possibilities for familiarization of students and pupils in Pskov (Russia) with the elements of nanostructure physics, as well as subsequent development and testing of didactic materials on this topic. As a part of this work, a study of the current state of nanostructure physics has been conducted. As a result, the authors have developed overview lectures on modern nanotechnology and educational nanotechnological laboratory experiments for students and pupils.*

Keywords: *nanostructure physics, pupils, students, teaching.*

Введение

Introduction

Физика наноструктур является научным фундаментом нанотехнологий, использующих особые свойства вещества, отдельные элементы которого имеют размеры порядка 1–100 нанометров. Активное развитие современных нанотехнологий, изменяющих облик мира уже в начале XXI века, широкие перспективы их использования при производстве различных продуктов и новых материалов с недостижимыми ранее свойствами, а также междисциплинарность научных основ нанотехнологий ставят перед современным обществом определённые вызовы. Необходимо организовать как подготовку будущих кадров для работы в данной области, так и повышение научной грамотности населения. Эту работу необходимо

проводить не только со студентами, но и со школьниками, которые, как показывают проведённые опросы (Bun'kova & Evtjuhina, 2017; Razumovskaja, 2015), недостаточно осведомлены о сфере нанотехнологий.

Преподавание основ нанотехнологии в школе необходимо не только с точки зрения знакомства с современной наукой и не только как начальная подготовка будущих специалистов в этой области. Это необходимо для подготовки любого члена общества к сознательному восприятию государственной политики в области нанотехнологии. Таким образом, знакомство учащихся школ с основами нанотехнологии — важнейшая социальная задача. В настоящее время социальная потребность знакомства учащихся общеобразовательной школы с основами нанотехнологий не удовлетворяется, так как системная подготовка учителя в этой области не разработана (Razumovskaja, 2015).

Цель данной статьи - обобщить многолетний опыт ознакомления студентов (будущих учителей) и школьников с элементами физики наноструктур и нанотехнологий, накопленный в Псковском государственном университете и других учебных заведениях города Пскова (Российская Федерация).

В ходе работы был проведен анализ научно-методической литературы по проблеме исследования, на практике реализованы различные подходы к методике обучения основам физики наноструктур студентов и школьников.

Опыт ознакомления студентов и школьников с элементами физики наноструктур и нанотехнологий

Experience of the familiarization of students and pupils with the elements of nanostructure physics and nanotechnology

В последние два десятилетия, когда термины «наночастицы», «наноструктуры», «нанотехнологии» и т. п. утвердились в языке научной литературы, в России опубликованы многочисленные научно-популярные и учебные издания по данной тематике (Abramchuk et al., 2010; Azarenkov, Beresnev, Pogrebnjak, Malikov, & Turbin, 2009; Bulygina, Makarchuk, Panfilov, Oja, & Shahnov, 2006; Fedorov et al., 2014; Golovin, 2015; Gubina, Morzunova, & Tihonova, 2010; Ivanova, 2001; Ostroumova, Solov'ev, Khanin, & Janikov, 2015; Rybalkina, 2005; Sergeev, 2007; Svetuhin et al., 2008; Vartanjan & Vashhenko, 2012 и другие). Одновременно в научно-педагогической литературе разрабатывались методические подходы к изучению физики наноструктур и нанотехнологий в высших и средних учебных заведениях (Anisimova, Solomin, Pronin, & Hinich, 2010; Bun'kova & Evtjuhina, 2017; Dashina, Ivanova, Solov'ev, Khanin, & Janikov, 2009; Ivanova, Solov'ev, & Shchesnjak, 2009; Janikov, Romanov, & Solov'ev, 2013; Pavlova &

Jakusheva, 2016; Razumovskaja, 2015; Razumovskij, 2007; Zajceva & Moiseeva, 2012 и др.). При этом отмечалось, что изучение нанотехнологий может вводиться в учебный процесс через **дополнительный материал** или специальные тематические уроки, лекции, семинары, лабораторные работы и экскурсии, предлагаться в виде **элективных курсов** или включаться в содержание **проектной и научно-исследовательской деятельности** студентов и учащихся. Важно подчеркнуть, что разные формы реализации нанотехнологического содержания, осуществляя системно-деятельностный подход к обучению, способствуют установлению межпредметных связей и развитию всех видов универсальных учебных действий: познавательных коммуникативных и регулятивных (Pavlova & Jakusheva, 2016).

Все указанные формы работы успешно апробированы в Псковском государственном университете (ПсковГУ) и других учебных заведениях города Пскова (Российская Федерация) на протяжении последних десятилетий; конкретные примеры организации этой работы и результаты педагогических экспериментов приведены ниже.

Учитывая ограниченность возможностей обычной школы по обучению основам физики наноструктур, одним из авторов была подготовлена специальная **дополнительная обзорная лекция** по современным нанотехнологиям для учеников 10 класса, прочитанная в Свято-Тихоновской православной гимназии г. Пскова. Далее в качестве примера приведен план этой лекции.

Обзорная лекция «Нанотехнологии сегодня»

Цели: познакомить учеников с областью современных нанотехнологий и заинтересовать ею, подчеркнув соответствующие межпредметные связи.

Задачи:

- ввести основные понятия и описать особенности нанотехнологий;
- заинтересовать школьников данной областью знаний;
- привести примеры источников дополнительной информации для дальнейшего углубления знаний в данной области.

План обзорной лекции

1. Введение. Основные понятия, используемые при описании наномира: нанометр, наночастицы, нанотехнологии.
2. Методы исследования наночастиц. Продукты, произведенные с использованием нанотехнологий. Безопасность при использовании современных технологий.
3. Углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки, графен).
4. Влияние поверхностных атомов и молекул на физические свойства наночастиц. Размерные эффекты.

5. Интегрирующая роль нанотехнологий. Учебные предметы, позволяющие разбираться в нанотехнологиях: физика, химия, биология, математика, информатика.
6. Дополнительные сведения в этой области: сайты «Nanotechnology News Network», «Нанометр», образовательная онлайн-платформа «Стемфорд», сеть детских технопарков «Кванториум» по направлению «Наноквантум».

Школьники в рамках обзорной лекции получают, таким образом, первые сведения об особых свойствах наноструктур, доступных для понимания на начальных этапах изучения, нанотехнологиях и их возможностях в современном мире, которые могут стать основой последующего изучения соответствующих разделов в вузе.

Примерами *элективных курсов*, читаемых на протяжении ряда лет студентам ПсковГУ, могут служить такие дисциплины по выбору, как «Физика наноструктур», «Основы сканирующей зондовой микроскопии», «Основы наноплазмоники» и др. Один из них - авторский курс «Нанотехнологии» - в рамках международного сотрудничества был прочитан в осеннем семестре 2016 / 2017 учебного года в двух странах: России - для магистрантов ПсковГУ и Латвии - для магистрантов Резекненской технологической академии. В ходе преподавания курса использовались презентации на трёх языках (русском, английском и немецком), а также многочисленные наглядные пособия: модели углеродных наноструктур (фуллеренов и нанотрубок), фотонных кристаллов (яблоновит) и др. После завершения курса появилась возможность провести интересный педагогический эксперимент: в январе 2017 одновременно в двух странах был проведен экзамен в тестовой форме по прочитанному курсу. Тест содержал 25 тестовых заданий (на соответствие, а также закрытого и открытого типов - в последнем случае студенты, обучающиеся в стране Евросоюза, могли вписывать ответы на одном из трех языков: русском, английском или немецком). Примеры четырёх тестовых заданий закрытого типа представлены ниже:

1. Автором посвященного наномиру известного высказывания “There’s plenty of room at the bottom!” («Там внизу много места!») является
1) Р. Фейнман; 2) И. Ньютон; 3) Л. Ландау; 4) М. Планк
2. Оцените радиус сферической наночастицы из 3600 молекул воды:
1) $R = 1$ нм; 2) $R = 3$ нм; 3) $R = 10$ нм; 4) $R = 30$ нм; 5) $R = 100$ нм
3. При уменьшении размеров наночастицы ее температура плавления
1) не изменяется; 2) увеличивается; 3) уменьшается

4. При уменьшении размеров наночастицы край ее оптического поглощения
 1) не изменяется; 2) сдвигается в «синюю» область; 3) сдвигается в «красную» область

Таблица 1. *Результаты выполнения теста по дисциплине «Нанотехнологии»*
 Table 1 *Results of the test in the discipline “Nanotechnology”*

№№ п/п	Магистрант РТА (Латвия)	Результат выполнения теста	Магистрант ПсковГУ (Россия)	Результат выполнения теста
1.	V. D.	84%	Е. А.	92%
2.	A. I.	80%	В. Е.	96%
3.	J. K.	88%	И. М.	76%
4.	A. K.	84%	Д. М.	52%
5.	J. R.	88%	А. С.	84%
6.	A. S.	88%	А. Ц.	92%
7.	N. T.	84%	К. Ч.	92%
8.	J. V.	88%		
	Среднее значение	85.5%	Среднее значение	83.4%

Экзамен сдавали 15 магистрантов (8 в Латвии и 7 в России). Следует отметить, что магистранты обеих стран показали сопоставимые результаты (табл. 1): хотя ни один из них не смог полностью выполнить все задания, не было и неудовлетворительных оценок, а средние баллы магистрантов России и Латвии в пределах статистических погрешностей совпали и соответствовали оценке *C* (хорошо) Болонской системы.

Следует особо подчеркнуть, что учебная работа кафедры физики ПсковГУ в области физики наноструктур основана на прочном и надёжном фундаменте - многолетнем опыте научных исследований в этом же направлении. С целью интеграции вузовской и академической науки в 2006 г. в университете создана совместная с Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург) научно-учебная лаборатория физики наноконпозиционных материалов. Основные направления деятельности лаборатории - экспериментальное и теоретическое исследование наноконпозиционных материалов на основе регулярных пористых диэлектрических матриц цеолитов и опалов, совершенствование подготовки специалистов в области физики конденсированного состояния и физики наноструктур.

В 2008 г. университет принял участие во всероссийском Отборе пилотных учреждений высшего профессионального образования - получателей оборудования и методического обеспечения в рамках

реализации проекта «Поставка и ввод в эксплуатацию учебных лабораторий по нанотехнологии для кабинетов физики, химии и биологии базовых общеобразовательных учреждений профильных вузов». По результатам этого конкурса университет получил и ввел в эксплуатацию оборудование и методическое обеспечение новой **нанотехнологической лаборатории**, включающей в себя сканирующие зондовые микроскопы “NanoEducator”, которые используются как в научных исследованиях, так и в учебном процессе. Особый успех имеют **учебные экскурсии** ознакомительного характера, проводимые в нанотехнологической лаборатории для учащихся Университетских и Кикоинских классов, для будущих абитуриентов в рамках «Дня открытых дверей», «Ночи науки» и других подобных мероприятий, знакомящих школьников с элементами физики наноструктур и нанотехнологий.

Опыт освоения содержания перспективных направлений научно-технического развития (в том числе - нанотехнологий) на основе фундаментальных физических знаний весьма успешно формируется во время **исследовательской и проектной** деятельности студентов и учащихся (Ostroumova et al., 2015). Освоение методики и техники лабораторного и демонстрационного эксперимента (особенно - на современном оборудовании и с учетом последних достижений научно-технического прогресса (Evdokimov et al., 2010) в настоящее время относится к важнейшим направлениям практической подготовки студентов - не только специалистов по нанотехнологиям, но и будущих учителей. К сожалению, во многих школах современной России почти отсутствуют демонстрационные опыты и лабораторные работы, а в преподавании физики царит меловой метод репродуктивного обучения (Razumovskij, 2007). Именно исчезновение из практики преподавания учебного физического эксперимента - одна из основных причин низкого качества знаний по физике и снижения интереса к этому предмету (Majer, 2011). Однако, проблемы с материально-технической базой не должны полностью исключать ознакомление обучающихся с элементами физики наноструктур: в проектной деятельности студентов и учащихся Псковского региона используются не только сложные физические приборы научных и учебных лабораторий Псков ГУ или Детского Технопарка «Кванториум Псков». В некоторых случаях (изготовление моделей фуллеренов, нанотрубок, регулярных пористых диэлектрических матриц цеолитов и опалов, моделирование фотонных кристаллов, демонстрация влияния углеродных нанотрубок на механические свойства полимерных композитов и др.) для этого достаточно несложного школьного оборудования и доступных материалов.

Например, в рамках элективного курса «Физика наноструктур», проводимого для студентов Псков ГУ, в качестве практических заданий для проверки уровня сформированности компетенций предлагалась групповая работа с моделями углеродных нанотрубок различных размеров, структур (в зависимости от способа сворачивания), изготовленными студентами в рамках выполнения курсовых работ соответствующей тематики. Эта групповая работа состояла из двух частей:

Часть I. Используя изображение графитовой плоскости с обозначенными индексами хиральности m , n , получите формулу $D = \sqrt{m^2 + n^2 - mn} \frac{d_0 \sqrt{3}}{\pi}$ для расчета диаметра D нанотрубки.

Часть II. Определите индексы хиральности предложенной модели нанотрубки. Рассчитайте диаметр нанотрубки с такими же индексами хиральности, учитывая, что расстояние между соседними атомами углерода $d_0 = 0,142$ нм.

Результаты и их обсуждение *Results and discussion*

Таким образом, в практике экспериментального преподавания подтверждена возможность успешного формирования у студентов и школьников основных представлений физики наноструктур и нанотехнологий. Полученные нами результаты обучения позволяют сделать вывод о том, что предлагаемые формы и методы ознакомления студентов и школьников с элементами физики наноструктур и нанотехнологий позволяют расширить кругозор обучающихся и повысить их заинтересованность в изучении соответствующих учебных дисциплин. Вместе с тем, учитывая общую проблему, связанную со слабой мотивационной стороной процесса обучения, нужно продолжать поиск новых инновационных методик обучения, способствующих активизации познавательной деятельности студентов и школьников.

Выводы *Conclusions*

Комплексный подход к реализации преподавания учебных дисциплин в области физики наноструктур, несомненно, способствует повышению как уровня подготовки будущих кадров для работы в данной области, так и уровня научной грамотности населения. Этот подход на протяжении последних десятилетий последовательно осуществляется в Псковском

государственном университете, начинает использоваться в других учебных заведениях региона и даёт положительные результаты.

Summary

Training people with knowledge of the basic principles of nanotechnology is an important task of modern education. This research analyses some practical teaching forms and methods applied in the educational process when students and pupils in Pskov (Russian Federation) familiarize with the elements of nanostructure physics and nanotechnologies. Some examples of lectures, tests, educational laboratory tasks for students and pupils are described.

According to our experience, the suggested teaching forms and methods are rather effective and useful.

Литература References

- Abramchuk, N.S., Avdoshenko, N.S., Baranov, A.N., Baranchikov, A.E. et al. (2010). *Nanotehnologii. Azbuka dlja vseh*. Red. Ju. D. Tret'jakov. Moskva: FIZMATLIT.
- Anisimova, N.I., Solomin, V.P., Pronin, V.P., & Hinich, I.I. (2010). Prepodavanie kursa "Osnovy nanotehnologij" studentam estestvennonauchnyh fakul'tetov i uchashhimsja starshih klassov. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzah*, 16(3), 3-9.
- Azarenkov, N.A., Beresnev, V.M., Pogrebnjak, A.D., Malikov, L.V., & Turbin, P.V. (2009). *Nanomaterialy, nanopokrytija, nanotehnologii: Uchebnoe posobie*. Har'kov: Har'kovskij nacional'nyj universitet imeni V.N. Karazina.
- Bulygina, E.V., Makarchuk, V.V., Panfilov, J.V., Oja, D.R., & Shahnov, V.A. (2006). *Nanorazmernye struktury: klassifikacija, formirovanie i issledovanie: Uchebnoe posobie dlja Vuzov*. Moskva: SAJNS-PRESS.
- Bun'kova, E.A., & Evtjuhina, I.S. (2017). Nanotehnologii v shkol'nom obrazovanii. *Nauchnyj zhurnal «Studencheskij forum»*, 5(1), 16-19. Retrieved from [https://nauchforum.ru/archive/studjournal/5\(5_1\).pdf#page=17](https://nauchforum.ru/archive/studjournal/5(5_1).pdf#page=17)
- Dashina, A.J., Ivanova, M.S., Solov'ev, V.G., Khanin, S.D., & Janikov, M.V. (2009). Jelementy fiziki nizkorazmernyh sistem v podgotovke pedagogicheskikh kadrov. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzah*, 15(4), 30-38.
- Evdokimov, A.A., Mishina, E., Val'dner, V., Dolgova, T.V. et al. (2010). *Poluchenie i issledovanie nanostruktur. Laboratornyj praktikum po nanotehnologijam*. Red. A.S. Sigov. Moskva: BINOM. Laboratorija znaniy.
- Fedorov, A.V., Baranov, A.V., Maslov, V.G., Orlova, A.O., Ushakova, E.V., Leonov, M.J., & Golubev, V.G. (2014). *Fizika nanostruktur: Uchebnoe posobie*. Sankt-Peterburg: Universitet ITMO.
- Golovin, J.I. (2015). *Vvedenie v nanotehnologiju*. Moskva: Nauka.
- Gubina, N.V., Morzunova I.B., & Tihonova, E.N. (2010). *Problemy sovremennoj nanotehnologii: uchebno-metodicheskoe posobie*. Moskva: Drofa.
- Ivanova, M.S. (2001). *Nanostruktury: Uchebnoe posobie*. Pskov: PGPI.
- Ivanova, M.S., Solov'ev, V.G., & Shchesnjak, G.N. (2009). Modelirovanie fotonnyh kristallov. *Uchebnaja fizika*, 2, 29-34.
- Janikov, M.V., Romanov, S.G., & Solov'jov, V.G. (2013). Izuchenie opticheskikh svojstv fotonnyh kristallov i osnov nanoplazmoniki v universitetskom kurse fiziki. *Vestnik*

- Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija "Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki"*, 2, 205-213. Retrieved from http://fmf.pskgu.ru/projects/pgu/storage/we6137/wepgu02/wepgu02_23.pdf
- Majer, V.V. (2011). Protiv formalizma v prepodavanii fiziki. *Fizika v shkole*, 7, 51-60.
- Ostroumova, J.S., Solov'ev, V.G., Kanin, S.D., & Janikov, M.V. (2015). *Formirovanie opyta osvoenija sodержaniya perspektivnyh napravlenij nauchno-tehnicheskogo razvitiya na osnove fundamental'nyh znaniy v obuchenii fizike: Uchebnoe posobie*. Pskov: Izdatel'stvo PskovGU. Retrieved from <https://fmf1.pskgu.ru/page/db7439d0-fa6d-486f-9888-a9f126c11c82>
- Pavlova, E.S., & Jakusheva, G.I. (2016). Mesto nanotehnologij v shkol'nom kurse himii. *Sovremennaja vysshaja shkola: innovacionnyj aspekt*, 8(3), 102-110. Retrieved from http://journal.rbiu.ru/upload/3_2016.10.pdf
- Razumovskaja, I.V. (2015). Social'naja znachimost' izuchenija osnov nanotehnologii v obshheobrazovatel'noj shkole. *Molodoj uchjonyj*, 14(1), 22-27. Retrieved from <https://moluch.ru/archive/94/21049>
- Razumovskij, V.G. (2007). Nanotehnologii i obshheobrazovatel'naja shkola. *Uchebnaja fizika*, 2, 161-165.
- Rybalkina, M. (2005). *Nanotehnologii dlja vseh. Bol'shoe – v malom*. Moskva: Nanotechnology News Network.
- Sergeev, G.B. (2007). *Nanohimija: uchebnoe posobie*. Moskva: Izd-vo KDU (Knizhnyj dom. Universitet).
- Svetuhin, V.V., Razumovskaja, I.V., Buljarskij, S.V., Zolotovskij, I.O., Nagornov, J.S., Novikov, S.G., L'vov, P.E., Kadochkin, A.S., Kozlov, D.V., & Zhukov, A.V. (2008). *Vvedenie v nanotehnologii. Modul' «Fizika». Jelektivnyj kurs: uchebnoe posobie dlja 10-11 klassov srednej obshheobrazovatel'noj shkoly*. Red. B.M. Kostishko, V.N. Golovanov. Ul'janovsk: UIGU.
- Vartanjan, T.A., & Vashhenko, E.V. (2012). *Vvedenie v nanoplazmoniku. Uchebnoe posobie*. Sankt-Peterburg: NIUITMO.
- Zajceva, O.P., & Moiseeva, L.V. (2012). Propedevtika nanotehnologij v shkole s ispol'zovaniem metoda proektov. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii*, 1, 33-36.