

ОБУЧЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ЭТОМ НАУЧНОГО НАСЛЕДИЯ

Н.А. Азаренков*, В.Д. Орлов*, Н.И. Слипенченко**,
В.Г. Удовицкий***, В.И. Фареник***,*

*Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина

**Харьковский национальный университет радиотехники

***Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины

Поступила в редакцию 23.07.2009

Обсуждаются вопросы, касающиеся обучения и подготовки кадров для нанотехнологий и наноматериалов, что является одной из главных и приоритетных задач на начальном этапе развития этого нового научно-технического направления. Отмечается, что систему обучения и подготовки кадров следует выстраивать таким образом, чтобы в ней органично сочетались актуальность, прежние традиции и достижения отечественной научной школы (научное наследие) и новые достижения мировой науки. Рассмотрен ряд важных научных результатов, относящихся к актуальной сейчас области создания и исследования наноматериалов. Они подтверждают ценность нашего научного наследия, которое должно изучаться и использоваться в процессе обучения и подготовки кадров для развития нанотехнологий и наноматериалов в Украине.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноматериалы, обучение и подготовка кадров, научное наследие.

Обговорюються питання стосовно навчання та підготовки кадрів для нанотехнологій та наноматеріалів, що зараз є одним з головних і пріоритетних завдань на початковому етапі розвитку цього нового науково-технічного напрямку. Відмічається, що систему навчання та підготовки кадрів слід вибудовувати таким чином, щоб в ній органічно поєднувались актуальність, попередні традиції і досягнення вітчизняної наукової школи (науковий спадок) та нові досягнення світової науки. Розглянуто ряд важливих наукових результатів, що відносяться до актуального зараз напрямку створення і дослідження наноматеріалів. Вони підтверджують цінність нашого наукового спадку, який потрібно вивчати і використовувати в процесі навчання та підготовки кадрів для розвитку нанотехнологій та наноматеріалів в Україні.

Ключові слова: нанотехнології, наноматеріали, навчання та підготовка кадрів, науковий спадок.

Several questions concerning education and professional training of specialists in the fields of Nanotechnologies and Nanomaterials are discussed. This training is one of the main priority goals at the initial stage of the development of this new scientific and technical field. The educational system should be build to organically integrate the achievements of contemporary international science as well as traditions and past discoveries of national science school (science heritage). Several important scientific results in the field of creation and research of nanomaterials are studied in depth. Those achievements reconfirm the value of our scientific heritage which should be carefully studied and used in the process of professional training of specialists that are going to promote and develop nanotechnology and nanomaterials fields in Ukraine.

Keywords: nanotechnologies, nanomaterials, education and professional training, scientific heritage.

ВВЕДЕНИЕ

Научный и социально-экономический прогресс развитых стран в XXI веке согласно практически единодушным прогнозам авторитетных организаций и компетентных специалистов в значительной мере будет определяться их успехами в развитии нанонаук и нанотехнологий [1, 2]. Понимая это, и желая сохранить лидирующие позиции в мире, высокоразвитые страны уделяют данному вопросу большое внимание, даже сейчас, в усло-

виях экономического кризиса, приведшего к сокращению многих программ. Это подтверждает анализ Национальной нанотехнологической инициативы (НИИ) США, являющихся одним из лидеров в развитии нанотехнологий. Именно после принятия в 2000 г. НИИ США многие другие страны также начали активно развивать нанотехнологии. На финансирование данной программы в 2006 г. израсходовано 1,351 млрд. долл., в 2007 – 1,424; в 2008 – 1,491, а в 2009 и 2010 годах

запланировано израсходовать, соответственно, 1,527 и 1,600 млрд. долл. [3, 4].

Одной из главных и приоритетных задач на начальном этапе развития любого нового научно-технического направления является создание системы обучения и подготовки высокопрофессиональных кадров для этого направления, которым необходимо будет решать новые задачи и воспроизводить кадровый потенциал. Поскольку нанотехнологии развиваются на базе многих наук, то для их развития на определенном историческом этапе важно знать основные, наиболее актуальные на данный момент, направления развития конкретных наук. При этом систему обучения и подготовки кадров следует выстраивать таким образом, чтобы в ней органично сочетались актуальность, прежние традиции и достижения отечественной научной школы (научное наследие) и новые достижения мировой науки.

Целью настоящей работы является изучение и анализ научного наследия ученых бывшего СССР в области некоторых наиболее актуальных и резонансных сейчас направлений физики для его использования в процессе обучения и подготовки кадров в области различных нанонаук и нанотехнологий (наноп физика, нанохимия, наноэлектроника, нанотехнологии и т.д.).

ОБУЧЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ – КЛЮЧЕВОЕ ЗВЕНО В УСПЕШНОМ РАЗВИТИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

Проблема обучения и подготовки кадров в развитии нанотехнологий и наноматериалов на данный момент имеет первостепенный приоритет во всех странах, активно их развивающих. В США, к примеру, для решения задач нанообразования создан национальный образовательный центр и даже разработан и находится на рассмотрении специальный закон о развитии нанообразования [5, 6]. Значительное внимание нанообразованию уделяется и в других странах, которые сейчас активно развивают нанотехнологии – Китае, Японии, Корее, Германии, Великобритании, Франции, а в последнее время – и в России.

В Украине сейчас уже одобрена Концепция Государственной целевой научно-технической

программы “Нанотехнологии и наноматериалы” на 2010 – 2014 г. Сейчас идет процесс создания самой Программы и нет сомнения, что она будет создана и утверждена. В Национальной академии наук Украины с 2004 года реализуется комплексная программа фундаментальных исследований “Наноструктурные системы, наноматериалы, нанотехнологии”, а также утвержден перечень 10 наиболее важных направлений научных исследований и разработок в Украине, среди которых развитие нанотехнологий и наноматериалов указано на первом месте.

Проблема обучения и подготовки кадров сейчас в разных странах решается со своими особенностями, но все эти особенности вписываются в две основные стратегии – обучение и подготовка собственных кадров по различным учебным системам и программам, а также привлечение уже подготовленных специалистов из-за границы. Второй путь приемлем для высокоразвитых богатых стран (США, ряд стран Евросоюза), которые им успешно пользуются, поскольку могут предложить прекрасные условия для профессиональной деятельности и высокие социальные стандарты, удовлетворяющие специалистов самого высокого уровня.

Украина, как и ряд других стран бывшего СССР, значительно пострадала вследствие оттока квалифицированных научных кадров за границу в последние 15 – 20 лет. Особенно остро эти потери сейчас ощущаются на уровне специалистов среднего возраста. Для восполнения этих больших потерь второй путь решения проблемы кадров (приглашение их из-за границы) сейчас для Украины неприемлем и наша страна может рассчитывать только на кадры, подготовленные в собственных ВУЗах. Поэтому задача развития нанообразования для Украины имеет особую значимость, если мы хотим серьезно развивать нанотехнологии и быть в этой области конкурентоспособными на мировом уровне. И она уже начала решаться в ряде ВУЗов, в частности, – в Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина [7] и Харьковском национальном университете радиоэлектроники.

АНАЛИЗ НАИБОЛЕЕ АКТУАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФИЗИКЕ

На каждом этапе развития физики, как и других наук, существовали и существуют наиболее актуальные и резонансные (“горячие”) направления исследований, обеспечивающие реальную или потенциальную возможность решения конкретных практических задач. В журнале “Nature” [8] на основе использования специально разработанных коэффициентов, учитывающих количество публикаций и цитирований по какой-либо теме, а также динамику этих показателей во времени, была произведена оценка и выявлены пять наиболее актуальных на момент исследования и ближайшую перспективу направлений в физике:

- углеродные нанотрубки – 12,85;
- нанонити – 8,75;
- квантовые точки – 7,84;
- фуллерены – 7,78;
- гигантское магнитосопротивление – 6,82.

Указанные численные значения нормировочных коэффициентов получены при статистической обработке данных и являются относительной количественной мерой оценки актуальности.

Как видно, все эти пять наиболее “горячих” тем имеют прямое отношение к наноматериалам. И это не случайно, поскольку создание, исследование свойств и практическое применение различных наноматериалов сейчас является одной из главных задач развития нанотехнологического направления. Очень часто в различных программах, проектах, публикациях и т.д. термины “нанотехнология” и “наноматериалы” используются одновременно и наравне, что подтверждает важность и значимость проблемы наноматериалов в нанотехнологической тематике [9, 10]. Именно с созданием новых материалов связываются обоснованные надежды на дальнейшее развитие микро- и наноэлектроники, а также решение многих проблем, стоящих сейчас перед человечеством в различных областях – экологии, энергетике, медицине, обеспечении пищей, водой и т.п. Среди вышеперечисленных пяти направлений два от-

носятся к исследованию новых аллотропных модификаций углерода – углеродных нанотрубок (УНТ) и фуллеренов. Следует также отметить, что появление в наноматериалах особых, часто уникальных свойств, из-за чего к ним привлечено такое большое внимание, является результатом проявления в них разного рода размерных эффектов. Да и сама суть нанотехнологий состоит именно в переходе в область других размеров (в нанометровый диапазон) и использовании появляющихся при этом новых свойств и возможностей [10].

Как показывает анализ, в области открытия и изучения УНТ, фуллеренов и размерных эффектов в твердых телах имеется ряд существенных научных результатов, достигнутых ранее учеными бывшего СССР, но не очень широко известных и цитируемых в иностранных научных публикациях по данным вопросам. Эти результаты являются нашим ценным научным наследием и поэтому должны изучаться и использоваться при подготовке кадров в области нанотехнологий и наноматериалов поскольку, невзирая на временные финансовые и материальные трудности и явный проигрыш в приборном и материально-техническом обеспечении лабораторий, мы даже сейчас остаемся конкурентоспособными по интеллектуальному потенциалу, что создать значительно сложнее.

Рассмотрим некоторые из результатов нашего научного наследия в области открытия и изучения новых углеродных материалов и размерных эффектов в твердых телах.

НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОТКРЫТИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ФУЛЛЕРЕНОВ И РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

А. ОТКРЫТИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Как уже отмечалось выше, сейчас в физике большое внимание уделяется вопросам изучения и применения фуллеренов и УНТ. Эти новые аллотропные модификации углерода

активно изучаются также и в других областях науки и техники – химии, биологии, медицине, электронике и т.д.

В работе [11] приведена диаграмма роста количества научных публикаций, отраженных на научных сайтах, по данным объектам исследований (рис. 1, данные на 1-й квартал 2007 г.).

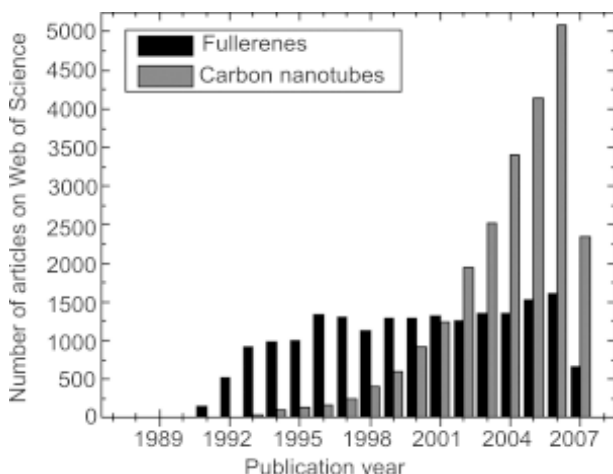


Рис. 1. Диаграмма роста научных публикаций по фуллеренам и УНТ.

Из диаграммы виден значительный рост интереса исследователей к ним, что также подтверждает вышеприведенный рейтинг актуальности научных направлений в физике. При этом видно, что количество публикаций по фуллеренам остается высоким и плавно растет, а количество публикаций по УНТ демонстрирует значительный, почти экспоненциальный рост. Такая тенденция сохраняется и сейчас.

История открытия УНТ неоднозначна и содержит ряд фактов, требующих еще своего изучения, освещения и оценки. Сейчас в подавляющем большинстве публикаций, касающихся УНТ, однозначно утверждается, что они были открыты японским физиком Сумио Иижимой (Sumio Iijima) и приводится ссылка на его работу [12], в которой автор сообщает об обнаружении трубчатых структур из углерода, образующихся на катоде в процессе дугового синтеза фуллеренов. В данной работе приводятся снимки многослойных УНТ, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, картина микродифракции электронов от них, а также обсуждается механизм образования этих структур, включая и образование трубок геликоидального

типа. В последующем автор продолжил исследования в данной области и опубликовал серию работ по УНТ. Отдавая должное заслугам С. Иижимы, фактически начавшим целенаправленные систематические и тщательные исследования УНТ с использованием просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, следует отметить, что и до него уже были синтезированы УНТ, опубликованы их электронномикроскопические снимки, сделано ряд теоретических расчетов и высказано предположение о возможности образования углеродом трубчатых структур. Вопрос о том, что в открытие УНТ внесли заметный вклад кроме С. Иижимы также и ряд других авторов и поэтому нужно тщательно подходить к оценке претензий на приоритет в открытие УНТ иногда поднимается и в серьезных зарубежных научных публикациях [13 – 16], хотя их значительно меньше по сравнению с работами, в которых указывается, что первооткрывателем УНТ является С.Иижима.

Анализ большого количества публикаций по теме показывает, что, по-видимому, самые первые электронномикроскопические снимки УНТ были опубликованы еще в 1952 г. в работе Л.В. Радужкевича и В.М. Лукьяновича (Институт физической химии и электрохимии РАН) [17]. В данной работе УНТ были получены одним из наиболее распространенных сейчас методов химического осаждения из пара (CVD, Chemical vapour deposition) при пиролизе окиси углерода над железным катализатором. Полученные на просвечивающем электронном микроскопе снимки (некоторые из них показаны на рис. 2), которые были приведены в данной работе, с позиции знаний сегодняшнего дня не вызывают сомнений в том, что авторами были синтезированы именно многослойные УНТ и в общем дана правильная интерпретация полученных изображений, хотя и не использовался термин “углеродные нанотрубки”, а из аллотропных модификаций углерода тогда были известны только графит и алмаз. Подтверждением этому является приведенные далее несколько цитат из данной работы: “...Продуктом реакции, детали которой пока неизвестны, является тонкий нитевидный или игольчатый крист-

талл, своим основанием расположенный на крупинке железа, из которой он вырос, и имеющий на конце избыток железа, перенесенного вперед в процессе роста... Сами частицы почти прозрачны для электронов... Создается впечатление, что внутри частицы проходит канал и что сама частица является пустотелой”.



Рис. 2. Электронномикроскопические снимки УНТ из работы [17].

После этой работы был выполнен также ряд других исследований и опубликованы электронномикроскопические снимки различных углеродных структур (нитей, волокон, жгутов, трубчатых структур и т.п.) [18 – 20], синтезированных чаще всего методом пиролиза различных углеродсодержащих соединений. В [19], в частности, приведено много снимков и тщательно обсуждаются различные структуры углерода, синтезированные в процессе пиролиза бензола.

Рассматривая в историческом аспекте работы, имеющие отношение к УНТ, которые были выполнены до 1991 г., т.е. до публикации работы [12], нельзя не упомянуть также статью М.Ю.Корнилова (Киевский национальный университет имени Т.Г. Шевченко) [21]. Она была опубликована тогда, когда возможность существования новой аллотроп-

ной формы углерода в виде замкнутых каркасных структур (фуллеренов) уже была теоретически предсказана, но еще экспериментально не подтверждена. Опираясь на ранее выполненные расчеты [22], касающиеся уменьшения суммы валентных углов атомов углерода, находящихся в ароматических соединениях с шестичленными циклами, при сворачивании этих соединений, автор предсказал возможность существования трубчатого углерода, т.е. хорошо теперь известных УНТ. Приведем также несколько цитат из работы [21]: “...Если сетку из sp^2 -гибридизированных атомов логично расположить на поверхности сферы (C_{60} – прим. авт.), то почему бы не использовать для этого поверхность цилиндра или призмы? А чтобы придать всей структуре достаточную устойчивость, сделаем ячейки сетки шестиугольными. Это будет как бы макромолекула графита, свернутая в трубку... Можно с уверенностью сказать, что даже при $K = 5 - 7$ (количество свернутых в трубку гексагонов – прим. авт.) трубчатый углерод будет вполне стабильной модификацией... не исключено, что трубчатый углерод уже давно существует в природе и его нужно только найти, как это произошло с карбином”. На наш взгляд эту статью, опубликованную в научно-популярном журнале “Химия и жизнь”, не следует забывать, рассматривая историю открытия УНТ.

Б. ОТКРЫТИЕ ФУЛЛЕРЕНОВ

Рассмотренные выше исторические аспекты открытия УНТ тесно переплетаются с историей открытия фуллеренов, которая оказалась весьма эффектной и поучительной: в ней пересеклись простые геометрические соображения, квантово-химический расчет и астрономические наблюдения, которые предшествовали лабораторному эксперименту [23]. Огромный интерес к фуллеренам (да и сам термин “фуллерены”) появился после первого их искусственного синтеза в 1985 г. путем лазерного испарения графитовой мишени с последующей конденсацией углеродного пара в инертной среде [24]. За это открытие трое из его авторов – Г. Крото, Р. Керл и Р. Смолли в 1996 г. получили Нобелевскую премию по химии. Однако настоя-

ший “фуллереновый бум” начался после открытия в 1990 г. метода их получения в макроскопических количествах путем экстракции из фуллеренсодержащей сажи [25]. Именно после этого во многих лабораториях начали получать и исследовать фуллерены.

Отдавая должное авторам и блестящим экспериментальным результатам, полученным в работах [24, 25], следует также отметить и ученых, впервые выдвинувших предположение о возможности образования каркасных форм углерода и теоретически обосновавших их стабильность. Именно эти результаты позволили авторам работы [24] быстро и правильно интерпретировать полученные результаты – об этом они упоминали в своих нобелевских лекциях. Дэвид Джонс (Jones D.E.H.) в 1966 г. выдвинул предположение о том, что внедрение в плоский графитовый слой дефектов в виде пятиугольников может привести к его искривлению и образованию замкнутой оболочки. Ежи Осава (Osawa E.) в 1970 г. выдвинул предположение о том, что атомы углерода могут располагаться в узлах усеченного икосаэдра, образуя таким образом замкнутую молекулу C₆₀ [26]. Советские химики-теоретики Д. Бочвар и Е. Гальперн (Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН) впервые выполнили квантово-химические расчеты [27] такой гипотетической молекулы, подтвердившие ее высокую энергетическую стабильность и возможность реального существования. Небольшая, но яркая цитата из данной работы: “...Теоретически молекула додекаэдра должна быть настолько напряженной насыщенной системой, что вопрос о возможности ее существования не вызывает сомнений». Этот вывод был сделан в 1973 г. и оставался малоизвестным даже специалистам вплоть до 1985 г., когда фуллерены были получены на практике.

Изучая научное наследие и вклад ученых бывшего СССР в открытие новых форм углерода – фуллеренов и нанотрубок, уместно также отметить, что третья (после графита и алмаза) аллотропная модификация углерода – карбин был впервые получен в начале 60-х гг. прошлого века советскими химиками

В.В. Коршаком, А.М. Сладковым, В.И. Касаточкиным и Ю.П. Кудрявцевым (Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН) [28, 29].

В. ОТКРЫТИЕ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Появление в наноматериалах особых, часто уникальных свойства, из-за чего к ним привлечено такое большое внимание, является результатом проявления в них разного рода размерных эффектов. Да и сама суть нанотехнологий состоит именно в переходе в область других размеров (в нанометровый диапазон) и использовании появляющихся при этом новых свойств и возможностей [10].

Отцом нанофизики и нанотехнологий многими, и вполне заслуженно, на наш взгляд, считается американский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии Р. Фейнман, который еще в 1959 году в своей знаменитой лекции с пророческим названием “Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики” [30] говорил: “... “внизу” мы будем постоянно наблюдать новые закономерности и эффекты, предполагающие новые варианты использования”. И еще: “... “внизу” располагается поразительно сложный мир малых форм и когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира”. Под “низом” Р. Фейнман подразумевал область малых (нано) размеров, а новые закономерности и эффекты, проявляющиеся в области наноразмеров, как раз и являются размерными эффектами (size effects). В этой же работе Р. Фейнман обсуждал возможные методы создания миниатюрных объектов и среди них указал нанесение тонких пленок, т.к. этот метод реализует один из основных методов нанотехнологии “снизу-вверх”.

Одной из наиболее ранних, и с полным правом можно сказать, пионерских работ, касающихся исследования размерных эффектов в тонких пленках, является работа, выполненная А.И. Бубликом и Б.Я. Пинесом (Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина) [31] задолго до знаменитой

вышеупомянутой речи Р. Фейнмана. В этой работе авторы убедительно доказали, что фазовый состав тонких пленок металлов при переходе в область нанометровых толщин существенно отличается от фазового состава массивных образцов, а иногда в таких пленках могут существовать фазы, которые в массивных образцах вообще не наблюдаются. Этот научный результат, как и ряд других результатов, полученных представителями харьковской научной школы, входит в число основных результатов, составляющих сегодня фундамент физики тонких пленок.

ВЫВОДЫ

Эффективное развитие нанотехнологий и наноматериалов в Украине, а значит и успешное выполнение формирующейся Государственной целевой научно-технической программы “Нанотехнологии и наноматериалы” на 2010 – 2014 годы возможно только в случае успешного решения одной из главных и приоритетных задач на начальном этапе развития любого нового научно-технического направления – обучения и подготовки высокопрофессиональных кадров для этого направления, которым необходимо будет решать новые задачи и воспроизводить кадровый потенциал. Как показал анализ, именно эта задача является приоритетной во всех странах, являющихся сегодня лидерами в развитии нанотехнологий и наноматериалов – США, Японии, Китае, Германии, Великобритании, Франции и др.

Рассмотренные выше лишь несколько конкретных научных результатов, относящихся к области создания и исследования наноматериалов, подтверждают ценность нашего научного наследия в данной области. Без сомнения можно утверждать, что это лишь маленькая часть очень ценных научных результатов, касающихся нанотехнологий и наноматериалов, которые были получены в более отдаленном прошлом нашими предшественниками, а также полученных уже в последние годы. Эти научные результаты непременно должны использоваться в процессе обучения и подготовки новых кадров.

Древняя китайская мудрость гласит: “Человек, почувствовавший ветер перемен, дол-

жен строить не заграждающие щиты, а ветряные мельницы”. Зарождающееся на наших глазах и при нашем непосредственном участии нанообразование в Украине и, в частности, в Харькове, соответствует ветру научно-технических перемен, а его направленность в будущее является залогом успешного развития нанотехнологий и наноматериалов в Украине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roco M.C. National Nanotechnology Initiative – Past, Present, Future. Handbook on Nanoscience, Engineering and Technology, 2nd ed., Taylor and Francis. – 2007. – P. 3.1-3.26.
2. Азаренков Н.А., Орлов В.Д., Слипченко Н.И., Удовичкий В.Г., Фареник В.И. Нанонауки и нанотехнологии: достижения, перспективы, проблемы и задачи развития//Физическая инженерия поверхности. – 2005. – Т. 3, № 1-2. – С. 127-146.
3. The National Nanotechnology Initiative: Overview, Reauthorization, and Appropriations Issues. CRS Report for Congress № RL34401, 2009, 45 p. – Electronic resource: <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL34401.pdf>
4. The National Nanotechnology Initiative. Research and development leading to a revolution in technology and Industry. Supplement to the President’s FY 2010 Budget, 36 p. – Electronic resource: http://www.nano.gov/NNI_2010_budget_supplement.pdf
5. National Center for Learning and Teaching in Nanoscale Science and Engineering (NCLT). – Electronic resource: http://www.nano.gov/html/edu/home_edu.html.
6. S. 1199: Nanotechnology in the Schools Act (110th Congress 2007 – 2008). – Electronic resource: <http://www.govtrack.us/congress/bill.xpd?bill=s110-1199>
7. Азаренков Н.А., Гирка И.А., Удовичкий В.Г., Фареник В.И. О развитии нанообразования на физико-техническом факультете Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина//Зб. наук. праць Міжн. наук. конф. “Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур” (ФММН’2007). – 2007. – С. 151-153.
8. Top five in physics//Nature. – 2006. – Vol. 441. – P. 265.
9. Удовичкий В.Г. Курс “наноматериалы” – важная составляющая системы нанообразования //Збірник наукових праць Міжн. наук. конф.

- “Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур” (ФММН’ 2007) – 2007. – С. 154-156.
10. Удовицкий В.Г. О терминологии, стандартизации и классификации в области нанотехнологий и наноматериалов//Физическая инженерия поверхности. – 2008. – Т. 6, № 3-4. – С. 193-201.
 11. Agnieszka Iwasiewicz-Wabnig. Studies of carbon nanomaterials based on fullerenes and carbon nanotubes, Umea Universitat, 2007. – 115p. – Electronic resource: <http://umu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:140619>
 12. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon//Nature. – 1991. – Vol. 354. – P. 56-58.
 13. Gibson J.A.E. Early nanotubes?//Nature. – 1992. – Vol. 359. – P. 369.
 14. Monthieux M., Kuznetsov V.L. Who should be given the credit for the discovery of carbon nanotubes?// Carbon. – 2006. – Vol. 44. – № 9. – P. 1621-1623.
 15. Vacsa W.S. Who discovered carbon nanotubes? – All you need to know about the discovery of carbon nanotubes. – Electronic resource: http://www.scitizen.com/screens/blogPage/view-Blog/sw_viewBlog.php?-idTheme=5&id-Contribution=147
 16. Harris P.J.F. Carbon nanotubes and related structures: new materials for the twenty-first century, Cambridge University Press, 2001. – 294 p.
 17. Радушкевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте//ЖФХ. – 1952. – Т. 26, Вып.1. – С. 88-95.
 18. Davis W.R., Slawson R.J., Rigby G.R. An Unusual Form of Carbon//Nature. – 1953. – Vol. 171. – № 4356. – P. 756.
 19. Oberlin A., Endo M., Koyama T. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition//J. of Crystal Growth. – 1976. – Vol. 32, № 3. – P. 335-349.
 20. Biry L.P., A. Carlos Bernardo, Tibbetts G.G., Lambin Ph. Carbon filaments and nanotubes: common origins, differing applications. – Springer, 2001. – 366 p.
 21. Корнилов М.Ю. Нужен трубчатый углерод//Химия и жизнь. – 1985. – № 8. – С. 22-23.
 22. Корнілов М.Ю. Про один різновид конденсованих ароматичних вуглеводнів//Доповіді АН УРСР, сер. “Б”. – 1977. – № 12. – С. 1096-1099.
 23. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
 24. Kroto H.W., Heath J.R., O’Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C60: Buckminsterfullerene//Nature. – 1985. – Vol. 318. – P. 162-163.
 25. Kratschmer W., Lamb L., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C60 – a new form of carbon//Nature. – 1990. – Vol.347. – P. 354-358.
 26. Керл Р.Ф. Истоки открытия фуллеренов: эксперимент и гипотеза//УФН. – 1998. – Т. 168, № 3. – С. 331-342.
 27. Бочвар Д.А., Гальперн Е.Г. О гипотетических системах: карбододекаэдре, s-икосаэдрани и карбо-s-икосаэдре//ДАН СССР. – 1973. – Т. 209. – С. 610-612.
 28. Сладков А.М., Касаточкин В.И., Коршак В.В., Кудрявцев Ю.П. Диплом на открытие № 107. Бюлл. изобрет. и открытий. – 1972.– № 6.
 29. Сладков А.М. Карбин – третья аллотропная форма углерода. – М.: Наука, 2003. – 151 с.
 30. Фейнман Р. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики//Рос. хим. журн. – 2002. – Т. 46, № 5. – С. 4-6.
 31. Бублик А.И., Пинес Б.Я. Фазовый переход при изменении толщины в тонких металлических пленках//Докл. АН СССР. – 1952. – Т. 87, № 2. – С.215-218.

Удовицкий Виктор Григорьевич – начальник лаборатории наноструктур НФТЦ, доцент кафедры физических технологий (по совместительству).

© Н.А. Азаренков, В.Д. Орлов, Н.И. Слипченко, В.Г. Удовицкий, В.И. Фареник, 2009.