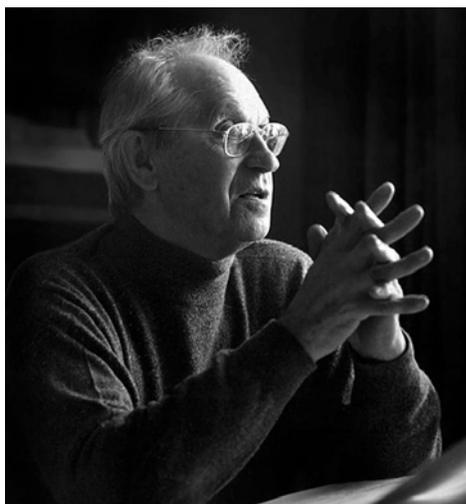


## Проблема развития нанотехнологии в России и за рубежом.



Заведующий кафедрой неорганической химии, заведующий лабораторией  
неорганического материаловедения химического факультета МГУ,  
Декан факультета наук о материалах МГУ  
Академик РАН Ю.Д. Третьяков

«Если бы меня спросили, какая область  
науки может обеспечить нам прорыв  
в будущее, я бы назвал нанотехнологии»  
Р. Фейнман, физик, лауреат Нобелевской премии

Нанотехнологический бум, переживаемый в настоящее время международным и российским научным сообществом, формально во многом сродни буму, который пережило почти 20 лет назад это сообщество в связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости. Напомню, что 18 октября 1986 года публикация И. Беднорца и К. Мюллера в журнале «Zeitschrift fur physik» дала старт гонке, которая несколькими месяцами спустя позволила исследователям техасского университета под руководством профессора К. Чу создать керамические оксидные сверхпроводники с критической температурой, превышавшей точку кипения жидкого азота.

Впервые в мировой практике благодаря электронной почте информация об этом открытии распространилась с огромной скоростью и потребовалось лишь 1-2 недели, чтобы исследователи многих стран воспроизвели, а в ряде случаев и превысили достижения группы Чу. В нашей стране это было впервые сделано совместно химиками и физиками Московского Университета. Месяцем спустя были созданы первые образцы сверхпроводящих пленок и покрытий, проволок и соленоидов, показавших, что высокотемпературная сверхпроводимость может стать технической реальностью. Тогда-то сверхпроводимость из научной проблемы превратилась в государственную. В нашей стране была образована государственная комиссия, которую возглавил тогдашний премьер-министр Н.И. Рыжков, а 26 мая 1987 года ученые и политики встретились вместе, чтобы, по сути дела, дать старт Государственной научно-технической программе по высокотемпературной сверхпроводимости. Значительное финансирование, которое с учетом инфляции в нынешних ценах составило около 500 млн. долларов/год, позволило существенно и достаточно быстро обновить приборный парк ведущих академических, отраслевых институтов и вузов и привлекло огромное число исследователей, многие из которых стремились преуспеть в создании новых

поколений высокотемпературных сверхпроводников с более высокой критической температурой и особенно высокой критической плотностью тока, что в конечном счете предопределяло технические возможности использования сверхпроводящих материалов. Многие из этих исследователей располагали лишь дифрактометрами, печами и простейшими магнитными измерительными системами, функционировавшими при температурах жидкого азота, но и этого было достаточно, чтобы продвинуться вперед и достичь определенного успеха. Хочу особенно подчеркнуть последнее обстоятельство, поскольку квалифицированная активность в создании новых нанотехнологий и наноматериалов требует несомненно более дорогого синтетического и диагностического оборудования, включая чистые комнаты, электронные и атомно-силовые микроскопы, Фурье-, Рамановские, Оже-спектрометры и многое другое. Известно, что фронт работ в области высокотемпературных сверхпроводников в настоящее время значительно сузился, хотя и сейчас реализуются очень значимые по масштабам научно-технические проекты, связанные, в частности, с созданием сверхпроводящих моторов (Л.К. Ковалев), длинномерных сверхпроводников для сильноточной энергетики (Н.А. Черноплеков, А.Р. Кауль), электронных устройств и их компонентов, включая электромагнитные экраны, модуляторы, антенны, болометры для широкого диапазона излучений, а также измерительные устройства, использующие эффект Джозефсона. Естественно возникает вопрос, не разделит ли нынешний нанотехнологический бум судьбу последовавшего за открытием ВТСП. Боюсь, что сейчас трудно дать однозначный ответ на этот вопрос, хотя знаю, что есть очень уважаемые лица, представляющие как научное, так и бизнес-сообщества, которые довольно скептически относятся к идее переустройства мира благодаря повсеместному внедрению нанотехнологий. Думаю, что если, как и в случае с ВТСП, оправдаются далеко не все оптимистические прогнозы, связанные с развитием нанотехнологий, то и тогда наша страна могла и должна была бы последовать примеру наиболее индустриально развитых стран, тем более что нынешний шанс использовать «нефтяные» и «газовые» деньги может и не повториться.

Но вернусь к теме, обозначенной в названии статьи. Прежде всего, было бы целесообразно определиться с содержанием понятия «нанотехнологии», впервые появившегося в литературе с легкой руки Н. Танигучи (Япония). В самом общем смысле нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Важнейшей составной частью нанотехнологии являются наноматериалы, то есть материалы, необычные функциональные свойства которых определяются упорядоченной структурой их наночастиц размером от 1 до 100 нм.

Согласно рекомендации 7-ой Международной конференции по нанотехнологиям (Висбаден, 2004 г) выделяют следующие типы наноматериалов:

- нанопористые структуры;
- наночастицы;
- нанотрубки и нановолокна;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры.

Последние представляют собой частицы упорядоченного строения размером от 1 до 5 нм, содержащие до 1000 атомов. Собственно наночастицы диаметром от 5 до 100 нм состоят из  $10^3$ - $10^6$  атомов. Нитевидные и пластинчатые частицы могут содержать гораздо больше атомов и иметь один или даже два линейных размера, превышающих пороговое значение, но их свойства остаются характерными для вещества в нанокристаллическом состоянии. Соотношение линейных размеров наночастиц позволяет рассматривать их как одно-, двух- или трехмерные (соответственно 1D-, 2D-

и 3D-наночастицы). Если наночастица имеет сложную форму и строение, то в качестве характеристического рассматривают не линейный размер частицы в целом, а размер ее структурного элемента. Такие частицы, как правило, называют наноструктурами, причем их линейные размеры могут значительно превышать 100 нм. В зависимости от того, какую преимущественную анизотропию имеют структурные элементы наноструктур, последние также подразделяют на одно-, двух- и трехмерные (нульмерные).

Наиболее важной отличительной особенностью наносистем является проявление в них эффекта размерного квантования. С классической точки зрения, по мере уменьшения размеров частиц в системе должно происходить увеличение удельной поверхности, а свойства объемной фазы остаются неизменными. При этом влияние размеров частиц на термодинамику системы учитывается введением в выражение для свободной энергии дополнительного слагаемого  $\gamma ds$ , где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения, не зависящий от размера, а  $s$  – площадь поверхности. Согласно уравнению Томпсона, по мере уменьшения размеров частиц происходит увеличение равновесного давления пара и растворимости, изменяются температуры плавления и других фазовых переходов. Ряд экстенсивных свойств системы, связанных с протеканием процессов на ее поверхности, таких как адсорбция и катализ, пропорциональны удельной поверхности. Значение удельной поверхности частиц резко возрастает по мере приближения их размера к атомарному, что связано со значительным увеличением числа атомов, составляющих поверхность частиц.

Вместе с тем многие свойства материалов (в том числе магнитные, оптические, электрические) являются следствием коллективных взаимодействий в твердом теле и не могут сохраняться при переходе от объемного к наноматериалу. В этом случае свойства веществ не могут быть объяснены только увеличением их удельной поверхности и ростом числа поверхностных атомов без учета квантоворазмерных эффектов. Примерами могут служить такие явления, как образование квантовых точек в случае, когда размеры частиц полупроводника соизмеримы с дебройлевской длиной волны электрона, изменение ширины запрещенной зоны за счет локализации экситонов, переход ферромагнитных материалов в суперпарамагнитное состояние. Однако иногда размерный эффект проявляется даже в таких свойствах веществ, как их каталитическая активность или реакционная способность: с уменьшением размера частиц может наблюдаться как резкое увеличение, так и уменьшение удельной активности, т.е. активности, отнесенной к одному атому металла. Как правило, этот эффект особенно ярко выражен у кластеров. Следует отметить, что важнейшей компонентой нанотехнологий является химический синтез нанопродуктов. В связи с этим уместно напомнить, что Нобелевский лауреат Р. Хоффман (кстати, сам по образованию физик, проработавший некоторое время в Московском Университете) в ответ на вопрос, что такое нанотехнология, остроумно заметил, что рад тому, что для химии люди нашли новое название. Теперь у них появился стимул изучать то, что они не желали учить в школе. По сути дела химики занимались нанотехнологиями на протяжении двух с половиной столетий. Современная нанотехнология отличается тем, что она соединила талант химика-синтетика с мастерством инженера, и именно этот союз позволил создавать самые замысловатые структуры благодаря использованию как разнообразных темплатов, так и безтемплатных процессов, подобных Оствальдовскому вызреванию или использованию эффекта Киркиндаля.

Что можно сказать об истоках нанотехнологии и о фундаментальном вкладе российских исследователей в развитие нанотехнологий. Отправной точкой обычно считают легендарную лекцию Нобелевского лауреата Р. Фейнмана «Там внизу еще много места» («There's Plenty of Room at the Bottom»), в которой он предлагал манипулировать отдельными атомами для создания очень малых объектов с необычными свойствами. Эта идея была реализована в дальнейшем благодаря

созданию сканирующего туннельного микроскопа (Г. Биннинг, Г. Рорер, 1981 г.) и атомно-силового микроскопа (Цюрихское отделение IBM, 1986 г.). Однако многие фундаментальные исследования, без которых было бы немыслимо развитие современных нанотехнологий, проводились на протяжении десятилетий научными школами академиков В.А. Каргина, П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина и Нобелевского лауреата Ж.И. Алферова. Было бы несправедливо замалчивать пионерские работы В.Б. Алесковского по развитию методов «химической сборки», т.е. послойного (layer-by-layer) синтеза, заложившие начало успешно функционирующей и сейчас Санкт-Петербургской научной школе (С.И. Кольцов, А.А. Малыгин, И.В. Мурин, В.М. Смирнов, В.П. Толстой). Несомненным для своего времени достижением является создание и практическое внедрение в атомную энергетику оригинальных технологий получения ультрадисперсных (нано-) порошков, выполненное группой советских ученых под руководством И.Д. Морохова (И.Д. Морохов, Л.И. Трусов, С.П. Чижик, Ультрадисперсные металлические среды. Атомиздат, Москва, 1977г.). Примерно к тому же времени относятся фундаментальные исследования научной школы академика И.В. Тананаева, впервые предложившего дополнить классические диаграммы «структура-свойство» координатой дисперсности (Физико-химия ультрадисперсных систем. Под ред. И.В. Тананаева. Наука. Москва, 1987 г.), а также оригинальные исследования акад. И.И. Моисеева и М.Н. Варгафтика по созданию так называемых «гигантских кластеров» палладия, ядро которых насчитывает около 600 атомов металла.

По целому ряду известных всем причин активность российских ученых в области нанотехнологий и наноматериалов равно как и в других научных направлениях значительно сократилась в последние десятилетия прошлого века. Парадокс заключается в том, что именно в этот период за рубежом, в первую очередь в США и в Японии, были сделаны важные открытия, включая создание объемных фотонных кристаллов с запрещенной оптической зоной (Яблонович, 1991 г.), синтез углеродных нанотрубок (Ижима, 1991 г.), а в дальнейшем и нанотрубок BN (Чопра, 1995 г.), MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> (Тенне, 1995 г.), V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Ажайян, 1995 г.), TiO<sub>2</sub> (Хойер, 1996 г.). В этот же период были предприняты попытки создания молекулярных переключателей и измерения электропроводимости отдельных молекул, продемонстрирован полевой транзистор на углеродной нанотрубке, продолжены исследования по самосборке молекул на металлической поверхности. Примерно в то же время группа экспертов Национального Научного фонда (NSF) США сделала заключение о безусловной приоритетности исследований в области нанотехнологий и наноматериалов, а в 2000 г. в США была принята долгосрочная комплексная программа, названная Национальной нанотехнологической инициативой. В соответствии с этой программой объем бюджетного финансирования нанотехнологических исследований в США уже в 2001 г. составил 420 млн. долларов, в 2004 г. вырос до 900 млн. долларов, а в дальнейшем вышел на стационарный уровень, немногим превышавший 1 млрд. долларов/год. В Японии и в странах Европейского Союза государственная поддержка нанотехнологических исследований немногим уступала США. Вместе с тем значительно возросла активность частного капитала. В 2002 г. число венчурных компаний, занимавшихся производством нанопроductов, достигло в мире 320, причем среди них на производстве нанопорошков специализировалось 160 компаний, нанотрубок – 55, нанопористых материалов – 22, фуллеренов – 21, квантовых точек – 16, нановолокон – 9, нанокапсул – 8, нанопроволок – 6 и дендримеров – 5 компаний. Производство нанопорошков является довольно масштабным и связано с изготовлением катализаторов дожигания выхлопных газов автомобилей (11.5 тыс. тонн), абразивов (9.4 тыс. тонн), материалов для магнитной записи (3.1 тыс. тонн) и солнцезащитных материалов (1.5 тыс. тонн). Согласно прогнозам, рынок нанопорошков, оцениваемый сейчас в 1 млрд. долларов, должен к 2010 г. возрасти до

11 млрд. долларов, тогда как мировой рынок нанотехнологий в целом к этому времени предположительно должен превысить 1 триллион долларов США.

Акт об исследованиях и развитии нанотехнологий в XXI веке, подписанный президентом Бушем в 2003 г., предполагает фронтальное решение проблем нанотехнологии как в фундаментальном, так и в прикладном направлениях с выделением свыше тысячи направлений поиска, объединенных вокруг наноэлектроники, нанобиотехнологии, молекулярной электроники, наноэлектромеханики, наноэнергетики, оптоэлектроники, создания новых поколений функциональных и конструкционных наноматериалов, наноматериалов для медицины, машиностроения и робототехники, компьютерных технологий, экологии, авионавтики, систем безопасности и борьбы с терроризмом. Созданная в США инфраструктура включает ведущие университеты, национальные лаборатории и производственные структуры, функционирующие в составе венчурных компаний. Число продуктов, произведенных в США с помощью нанотехнологий, уже сейчас превысило 3 тысячи, а более половины патентодержателей составляют американские компании, университеты или частные лица. Даже Японии оказывается довольно трудно конкурировать с США и ей пришлось ограничить наноактивность более узким кругом решаемых задач. По числу нанотехнологических публикаций в международных журналах лидируют 6 стран, три из которых, представляющие запад (США, Германия, Франция), несколько опережают восток (Япония, Южная Корея, Китай), причем на второе место уже в 2004 г., безусловно, вышел Китай, увеличивший за десятилетие число нанотехнологических публикаций в 21 раз и лишь немногим (на 25 %) уступивший США. Вместе с тем по числу полученных патентов Китай находится пока лишь на 20 месте. Ну а что же Россия? Научному сообществу нашей страны сильно не повезло. Прежде всего, потому, что оно в целом потеряло для интенсивной творческой работы почти целое десятилетие, последовавшее после распада СССР и мучительных поисков путей элементарного физического выживания. Разумеется, что это касалось не только развития нанотехнологий, но, прежде всего именно их, поскольку визуализация и контролируемое создание нанопродуктов требовало крайне дорогостоящего оборудования, которым наши исследователи в большинстве своем не располагали. Исключение составляли лишь те, кто сотрудничал с зарубежными коллегами, имевшими такое оборудование. В этой связи заслуживает одобрения инициатива РФФИ по поддержке международных грантов, позволивших эффективно использовать уникальное диагностическое оборудование научных центров ФРГ, Франции, Италии, Бельгии, Голландии, Японии, а в последнее время также и США. Достаточно вспомнить, что 8 лет назад в Москве не было ни одного функционирующего сквидмагнетометра, и молодым исследователям Московского университета пришлось (да и по сей день приходится) проводить измерения синтезированных ими магнитных нанокомпозитов в Иене (ФРГ). Тем более удивительно, что и в 90-е годы фундаментальные исследования, вносящие несомненный вклад в развитие нанотехнологий, не прекращались в России. Достаточно назвать научные группы, которые возглавляли Р.А. Андриевский, В.В. Болдырев, А.Л. Бучаченко, Р.З. Валиев, С.П. Губин, Б.В. Дерягин, А.Л. Ивановский, Ю.А. Котов, И.В. Мелихов, И.И. Минкин, А.Д. Помогайло, А.И. Русанов, И.П. Суздаев, А.Ю. Цивадзе и многие другие. В 1996 г. М.А. Ананяном был создан институт нанотехнологий, а в 2001 г. – концерн «Наноиндустрия».

Справедливости ради надо сказать, что после 2000 г. отечественные исследования в области нанотехнологий и наноматериалов заметно оживились. Этому способствовал ряд причин, среди которых немаловажным было плодотворное обсуждение этой проблемы в 2002 г. на заседании Президиума РАН, которому предшествовал постановочный научный доклад чл.-корр. И.В. Мелихова «Физико-химия наносистем – успехи и проблемы». В 2002 г. был создан Научный Совет по наноматериалам при

Президиуме РАН (председатель акад. Н.П. Лякишев), а в программе фундаментальных исследований РАН выделено (правда, довольно ограниченное) финансирование работ по разделу «Фундаментальные проблемы физикохимии наноматериалов». Примерно в это же время началось финансирование инициативных проектов РФФИ по нанотехнологиям и наноматериалам, а также по отраслевым программам Минобороны, Минатома (Росатома), Роскосмоса, Минпромэнерго, что по приближенным оценкам в сумме составляло 20-25 млн. долларов/год и в 30 раз уступало размерам государственной поддержки нанотехнологий в США. Тем не менее, некоторые академические, вузовские и отраслевые лаборатории были переориентированы на исследования в области нанотехнологий и наноматериалов, хотя большинство из них по-прежнему не располагало необходимым современным оборудованием. Достаточно сказать, что электронный микроскоп высокого разрешения HREM TECHNAI стоит около 4 млн. долларов, а чистая комната достаточно высокого класса – и того больше. Ситуация несколько улучшилась, когда в соответствии с постановлением Правительства № 540 от 12.10.2004 г. в федеральную целевую научно-техническую программу (ФЦНТП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 годы» были внесены существенные изменения, а в перечне приоритетов появилось направление «Индустрия наносистем и материалы», на поддержку которого было предусмотрено выделить из средств федерального бюджета в 2005 г. 2 млрд. рублей (около 70 млн. долларов), а в 2006 г. – 2.12 млрд. рублей (около 80 млн. долларов, с учетом изменения курса доллара). Рабочая группа экспертов, возглавляемая академиком М.В. Алфимовым, определила следующие приоритеты:

1. Углеродные наноматериалы.
2. Новые материалы и технологии для наноэлектроники, оптоэлектроники и спинтроники.
3. Органические и гибридные наноматериалы.
4. Полимеры и эластомеры.
5. Кристаллические материалы со специальными свойствами.
6. Мехатроника и микросистемная техника.
7. Композиционные и керамические материалы.
8. Мембраны и каталитические системы.
9. Биосовместимые материалы.
10. Нанодиагностика и зондовые методы.

Очевидно, что направление «Индустрия наносистем и материалы» объединяет две не вполне совместимые составляющие, из которых вторая включает многотоннажные продукты, такие как полимеры и эластомеры, композиты и керамику, кристаллические материалы на основе металлов и сплавов, а в определенной мере также мембраны и каталитические системы. Их технология помимо всего прочего базируется на использовании подходов макрокинетики, гидродинамики, тепло- и массопереноса, которые, как правило, не являются определяющими в процессе получения наноматериалов. Следовательно, указанное выше финансирование лишь частично относится к нанотехнологиям. Другая особенность, нередко вызывающая непонимание и недовольство научного сообщества, состоит в том, что оно воспринимает возможность получить финансовую поддержку в рамках ФЦНТП как конкурс на получение гранта, тогда как в действительности необходимо работать в рамках закона о госзакупках и скрупулезно выполнять требования заключенного контракта. Другое дело, насколько именно научные эксперты, а не чиновники определяют формулировку выставленных на торги лотов, которая нередко вызывает недоумение и даже подозрение в том, что она (эта формулировка) предопределяет победителя конкурса. Несомненный оптимизм вызывает то обстоятельство, что правительство Российской Федерации 6 июля 2006 г. утвердило концепцию ФЦНТП «Исследования и разработки

по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», установив объем финансирования за счет федерального бюджета в объеме 134 млрд. рублей (примерно 5 млрд. долларов). Есть основания полагать, что в рамках этой суммы значительно возрастает господдержка приоритетного направления «Индустрия наносистем и материалы».

Напрашивается вопрос, насколько реально в России создание самостоятельной федеральной программы по нанотехнологиям и наноматериалам. Потребность в существовании такой программы была осознана научным сообществом давно, особенно после старта в США упомянутой выше «Национальной нанотехнологической инициативы». Но время шло, примеру США последовало около 50 стран, но среди них по-прежнему отсутствовала Россия. Многочисленные совещания и круглые столы, в том числе слушания в Госдуме и Совете Федерации однозначно высказывались в пользу открытия национальной нанотехнологической программы, но, как сказал один уважаемый физик: «Чтобы дожидаться открытия Нанопрограммы в России, надо быть бессмертным». Справедливости ради следует сказать, что Минобрнаукой с участием представителей заинтересованных ведомств в 2005 г. была разработана концепция развития нанотехнологий в России, далее была подготовлена рамочная «Программа развития в РФ работ в области нанотехнологий и наноматериалов до 2015 года (национальная технологическая инициатива по развитию nanoиндустрии)» и, наконец, составлен проект Федеральной целевой программы «Развитие исследовательской, инновационной и технологической инфраструктуры для nanoиндустрии РФ на 2007-2009 годы». Реализация последней программы, по нашему мнению, была бы наиболее важным шагом, способным в достаточно короткий срок вооружить наше нанотехнологическое сообщество совершенно необходимым, но отсутствующим сейчас современным научным и технологическим оборудованием. Мы и так потеряли целое десятилетие и только чудо может спасти то, что кажется безвозвратно утерянным. Но такие чудеса случались и в России и за рубежом. Всякий раз они были связаны с появлением нового поколения исследователей в результате национального образовательного прорыва. Достаточно вспомнить о знаменитом атомном проекте, успешная реализация которого, казалось, поставила США вне всякой конкуренции впереди остального мира. Однако потребовалось менее 10 лет, чтобы наша страна сумела успешно реализовать собственный атомный проект и стать могучей ядерной державой. Исключительно важный вклад в этот успех внесли выпускники МГУ и рожденного в его стенах по инициативе Нобелевского лауреата П.Л. Капицы и акад. С.А. Христиановича знаменитого Московского физтеха, впервые наиболее удачно соединившего фундаментальную и инженерную подготовку специалистов. Другой пример образовательного прорыва связан с космическим проектом. 12 апреля 1961 г., когда Ю. Гагарин первым побывал в космосе, стал днем поражения США, затративших 32 млрд. долларов на реализацию альтернативной программы «Апполон». И если 8 с небольшим лет спустя Нейл Армстронг первым ступил на поверхность Луны, то в этом огромную роль сыграло решение бывшего в 1961 г. президентом США Джона Кеннеди кардинально перестроить подготовку специалистов-материаловедов в крупнейших американских университетах. Успешная реализация нанотехнологического проекта невозможна ни в одной стране, если ей не удастся подготовить или привлечь со стороны специалистов, хорошо владеющих одновременно знаниями в области математики, физики, химии, механики, биологии. Лишь междисциплинарная образовательная программа способна обеспечить нанотехнологический прорыв. Созданный в МГУ 15 лет назад Факультет Наук о Материалах может служить своеобразной моделью междисциплинарного естественно-научного образования, обеспечивающего многоуровневую подготовку материаловедов-исследователей, включая бакалавров, специалистов, магистров в направлении «Химия, физика и механика материалов», кандидатов и докторов наук по специальностям «Химия

твердого тела», «Физика конденсированного состояния» и «Неорганическая химия». В 2003 г. Министерством образования РФ в порядке эксперимента в технических университетах было открыто образовательное направление «Нанотехнология» с введением двух специальностей: «Наноэлектроника» и «Наноматериалы». В настоящее время подготовка по этим специальностям начата в таких вузах, как РХТУ им. Д.И. Менделеева, МВТУ им. Баумана, Санкт-Петербургском государственном технологическом институте, Санкт-Петербургском политехническом университете и других. Специальные образовательные программы по нанотехнологии разработаны и реализуются в ряде европейских стран, включая Германию, Данию, Швецию и Швейцарию. Вместе с тем ведущие американские университеты считают целесообразным вести подготовку специалистов по нанотехнологиям в рамках фундаментального материаловедения. В тесной связи с такой идеологией находится выраженное профессором Гарвардского университета Д. Вайтсайдом и полностью разделяемое автором представление о том, что при создании материалов с разнообразными свойствами наноразмерные фрагменты их структуры не всегда являются определяющим фактором. Для большинства материалов, особенно объемных, целесообразно рассматривать различные структуры от нанометровых до миллиметровых и понимать, что они тесно взаимосвязаны. В некоторых случаях определяющими являются фрагменты не нано-, а микрометровых размеров (например, фотонные кристаллы или клетки млекопитающих) и поэтому в общем случае речь идет не о наноматериалах, а о материалах с оптимальным размером фрагментов их структуры, определяющим функциональные или конструкционные свойства.

Итак, если мы сумеем сохранить то лучшее, что было заложено в отечественной системе университетского образования (прежде всего, его фундаментальность) и пополним последнее междисциплинарностью и способностью владеть современным синтетическим и диагностическим инструментарием, то появится надежда на возможность преодоления нашей страной нанотехнологического отставания.

Однако нельзя сбрасывать со счета, что нанотехнология в отличие от обычных технологий, как справедливо отметил И.В. Мелихов, отличается повышенной «наукоемкостью» и затратностью, в ней резко снижена вероятность решения задач методом «проб и ошибок», который традиционно используется в прикладных разработках. Поэтому путь от лаборатории к nanoиндустрии несомненно более сложен, чем при промышленным созданием обычных продуктов. Если же учесть, что в России не удалось сохранить даже традиционные промышленные производства в тех объемах, которые существовали 15-20 лет назад, то ускоренное развитие nanoиндустрии в нашей стране кажется утопией. Вряд ли на бизнес-сообщество может повлиять позиция главы правительства М. Фрадкова, породившего очередной незабываемый афоризм: «Если бизнес не пойдет в нанотехнологии, он пропустит все на свете и будет в лучшем случае в телогрейке работать на скважине, которой будут управлять и обслуживать наши друзья и партнеры». Есть основания сомневаться в том, что до тех пор, пока экстраприбыли будут обеспечиваться в нашей стране за счет нефтяного, газового и строительного бизнеса, кто-то предпочтет инвестировать средства в развитие инновационных производств типа nanoиндустрии. В этом смысле ситуация за рубежом кажется несомненно более благоприятной. В США, Японии и Южной Корее частный бизнес инвестирует наноразработки в объеме, не уступающем бюджетной поддержке, причем за 5 лет – с 1999 по 2004 г. размеры частных инвестиций в nanoиндустрию выросли в 10 раз. Быть может, одобренное Правительством РФ 10.08.2006 г. создание венчурных компаний на основе государственно-частного партнерства станет шагом вперед в развитии nanoиндустрии. Пока же мне известен только один случай поддержки нанотехнологий со стороны коммерческих структур. Коммерческий банк «Юриаструм-Банк» спонсировал проведение Всероссийских конкурсов молодежных проектов в области нанотехнологий и издание научно-популярной книги М.

Рыбалкиной «Нанотехнология для всех». И хотя в этой книге специалист найдет немало проколов и промахов, она, несомненно, окажет и уже оказала положительное влияние на формирование общественного мнения о нанотехнологиях, особенно среди поколения молодых. Организованное молодыми же аналитическое агентство Nanotechnology News Network предлагает через открытые им сайты новейшую информацию по нанотехнологиям для российских ([www.nanonewsnet.ru](http://www.nanonewsnet.ru)) и зарубежных ([www.nanonewsnet.com](http://www.nanonewsnet.com)) читателей.

Российский опыт преодоления барьеров на пути от нанонауки к промышленному созданию и коммерческому сбыту нанопродуктов пока невелик. Одним из немногих примеров такой деятельности является концерн «Наноиндустрия» (генеральный директор М.А. Ананян), организовавший производство наноразмерных порошков на основе серпентитов – так называемых ремонтно-восстановительных составов (РВС), предназначенных для ремонта и восстановления до первоначальных параметров изношенных узлов и механизмов, работающих в режиме трения (двигатели внутреннего сгорания, металлорежущие станки, топливные насосы, турбокомпрессоры, все виды горношахтного и металлургического оборудования). Созданный по РВС-технологии модифицированный высокоуглеродный защитный слой на поверхности трения при эксплуатации приводит к снижению потребления энергии, показателей вибрации и шума, а у двигателей – также содержания СО и сажи в выхлопных газах. Другим коммерческим продуктом деятельности концерна являются коллоидные растворы наночастиц серебра, обладающие высокой антибактериальной активностью и придающие биоцидные свойства краскам, лакам, пастам, моющим и дезинфицирующим средствам. М.А. Ананян был также инициатором создания журнала «Нанотехника», ставшего, по-видимому, первым российским периодическим изданием по нанотехнологии. Следующим таким изданием оказался журнал «Наноструктурное материаловедение», печатающий материалы на русском или английском языках. Наконец, можно ожидать, что в ближайшее время стартуют журналы «Российские нанотехнологии» (гл. редактор акад. М.В. Алфимов) и «Российский электронный наножурнал», в которых в роли учредителя выступает «Федеральное агентство по науке и инновациям».

Среди проблем, связанных с развитием нанотехнологий, реализуемая в США программа «Национальная нанотехнологическая инициатива» считает приоритетным анализ социальных последствий так называемой нанотехнологической революции. Речь идет о доступе к благам, которые возникают в результате развития наноиндустрии, ее позитивном влиянии на рынок труда и на прогресс медицины, а также о возможных негативных последствиях накопления нанопродуктов на здоровье человека и на окружающую его среду. Позитивные аспекты развития нанотехнологии уже сейчас широко рекламируются в печати и на телевидении. Для 120 млн. человек, ежегодно посещающих научные музеи США, в качестве пиар-акции предлагается экспозиция, посвященная развитию нанотехнологии. Передвижную выставку «Это - наномир» в 2004 г. увидели почти 800 тысяч посетителей, среди которых доминировали 8-13 летние дети. Разнообразные направления развития наномедицины включают биосенсорную нанодиагностику, наночастицы как средство доставки лекарств и новые формы лекарственных препаратов, создание нанороботов, наноинструментов и наноманипуляторов для медицинских целей и многое другое. Не меньшее внимание в США и в странах Европейского Союза уделяется изучению потенциального ущерба, который наноматериалы могут нанести здоровью человека и окружающей среде. Речь идет, прежде всего, о респираторных и легочных заболеваниях, включая рак легких. Любопытно, что в Белой книге, подготовленной под редакцией акад. В.Я. Шевченко по результатам Всероссийского опроса ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий, среди многочисленных направлений наноисследований, проводимых

в России, отсутствует даже упоминание о возможных рисках и негативных социальных последствиях развития нанотехнологий и применения наноматериалов.

Есть ли у нас основания испытывать чувство удовлетворения нынешними темпами и состоянием нанотехнологических разработок в России? Как уже отмечалось в начале этой статьи, после 2000 г. отечественные исследования в области нанотехнологий заметно оживились, но все познается в сравнении. Напомню написанную известным ученым и некогда любимую детскую сказку «Алиса в стране чудес», персонажам которой, чтобы оставаться на месте, надо было быстро-быстро бежать, а чтобы продвигаться вперед – бежать еще быстрее. Боюсь, что по причинам, изложенным выше, нам этого сделать пока не удалось. Достаточно сказать, что информационный вклад российских ученых в нанотехнологическую науку за последние 5-6 лет заметно снизился и составляет сейчас 1.5 % против 6 % в 2000 г. Еще в большей степени это касается числа международных патентов, полученных россиянами и особенно лицензионных выплат, которые в пересчете на 1 млн. жителей оказались в 100 раз меньше, чем в США. О скромности российского нанотехнологического вклада свидетельствует и наше участие в международных встречах-конференциях и конгрессах по нанотехнологии. Приведу в качестве примера Девятую Международную конференцию по нанонауке и технологии (9<sup>th</sup> International Conference on Nanoscience and Technology), проходившую с 30.07 по 5.08.2006 г. в Базеле (Швейцария). В этой конференции участвовало свыше 5 тыс. человек, включая четверых Нобелевских лауреатов. Из 600 с лишним устных докладов (а помимо них было еще 900 постеров), представленных на конференции учеными 30 стран, лишь 40 докладов имели российских соавторов, но и они в большинстве случаев представляли не российские, а зарубежные организации (феномен «утечки умов»). Лишь в 9 докладах в качестве соавторов фигурировали ученые, представлявшие российские университеты и академические институты и лишь один доклад из 600 был сделан учеными РФ без иностранного участия (его авторы – сотрудники Института физики полупроводников из Новосибирска и Института микроэлектроники и информатики из Ярославля). Извечный сакраментальный для российского менталитета, во всяком случае, со времен Н.Г. Чернышевского вопрос «Что делать?» заставляет автора предложить перечень первостепенных действий, которые надо совершить, чтобы заметно продвинуться вперед:

1. Осуществить отбор приоритетных направлений нанотехнологических разработок с учетом перспектив их дальнейшей коммерциализации, конкурентоспособности и востребованности, в первую очередь на внутреннем рынке, а также учитывая невозможность осуществления фронтального подхода, ориентированного на одновременное решение всех проблем нанотехнологии (как это делается в США).

2. В кратчайший срок оснастить отечественных исследователей новейшим (как правило, импортным) оборудованием, необходимым для синтеза и диагностики нанопродуктов, реализовав проект федерально-целевой программы «Развитие исследовательской и технологической инфраструктуры для nanoиндустрии Российской Федерации» и предусмотренное в этом проекте создание национальной нанотехнологической сети, включая национальную лабораторию, научно-исследовательские центры и ЦКП.

3. Создать целостную образовательную систему подготовки нового поколения исследователей, материаловедов и технологов, обладающих междисциплинарными фундаментальными знаниями и владеющих новейшим синтетическим и диагностическим оборудованием, используемым в нанотехнологиях (по приближенным оценкам, в ближайшее десятилетие миру потребуется не менее 2-3 млн. специалистов, а, следовательно, по самым скромным масштабам в России их должно быть не менее 30 тысяч).

4. Организовать независимую сертификационную службу для выработки стандартов, метрологии и сертификации, способную объективно оценивать качество нанопродуктов.

5. Создать и реализовать целостную систему подготовки всего российского общества к переменам, связанным с фронтальным развитием нанотехнологий и использованием нанопродуктов, включая соответствующие школьные курсы, музейные экспозиции, выпуск научно-популярной литературы, телевизионные передачи, фестивали науки и прочее.

6. Разработать систему мер, обеспечивающих развитие нанобизнеса, в том числе устранение таможенных сборов на экспорт нанотехнологического оборудования и введение льгот для потребителей и производителей нанопродукции.

Разумеется, что мы и сейчас не стоим на месте. В конце мая сего года РАН впервые пополнила свои ряды новыми членами, избранными по специальности «наноматериалы и нанотехнологии» в результате серьезного конкурсного отбора с ограничением возраста. В конце июня сего года принято решение об учреждении Российской Ассоциации Наноиндустрии. В июле вышел первый номер информационного бюллетеня «Нанометр», издаваемого в МГУ. В августе объявлен конкурс лотам в рамках приоритетного направления «Индустрия наносистем и материалы». Как тут не вспомнить когда-то популярный роман-хронику В. Катаева «Время, вперед», название которого как никакое другое, выражает пафос нанотехнологической эпохи.