

Введение для реалистов

Развитие нанотехнологий может привести к кардинальным техническим, экономическим и социальным последствиям. Вопрос в том, когда нанотехнологические мечты воплотятся в реальность и какую цену за все это придется заплатить.



(Алиса в стране чудес, вместе с Чеширским котом...)

За последние годы сделано немало для развития нанотехнологий, включающих в самом общем смысле создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, т.е. ее упорядоченными фрагментами с характеристическим размером от 1 до 100нм.

Сами наноструктуры можно создавать двумя принципиально разными способами: «снизу-вверх» - путем самосборки или самоорганизации атомов и молекул с образованием надмолекулярных структур и «сверху-вниз» путем диспергирования крупных объектов.

Управляя размерами и формой наноструктур, можно в определенных рамках придавать таким материалам совершенно новые, практически выгодные (и нередко рекордные), свойства, резко отличающиеся от свойств обычных материалов – прародителей. Однако для этого нужно детально исследовать всю систему, а система должна быть сложной и открытой, т.е. способной обмениваться с окружающей средой как

веществом, так и энергией. Иначе упорядочения с образованием заданной наноструктуры не произойдет. Подходы самоорганизации сокращают усилия исследователей, однако они реализуются в узком диапазоне условий – и при полном соблюдении законов нелинейной термодинамики. Основным условием развития нанотехнологий должен быть выверенный, профессиональный научный подход, требующий больших усилий, знаний и финансовых вложений в дорогостоящие фундаментальные исследования. Поэтому нанотехнологии не могут быть мгновенной панацеей от всех наших проблем, а их развитие займет длительное время даже в условиях жесточайшей нанотехнологической гонки, стартовавшей во всем мире.

Если не учитывать налет ажиотажа, существование наноматериалов закономерно и не подрывает никаких известных нам основ мироздания, просто пришло их время. Возникновение нанотехнологий «просто» означает качественный скачок в философии получения практически важных веществ - создание невидимых простым глазом сложных устройств и систем, размеры которых находятся в диапазоне размеров надмолекулярных образований. «Обычная» химия работает с молекулами и атомами, в этом уже давно нет ничего необычного. «Обычная» промышленность работает с тоннами и кубометрами, к этому тоже все привыкли. Наноматериалы как продукт нанотехнологий – это нечто особое, что гораздо сложнее атомов и молекул, но как продукт высоких технологий не требует многотоннажного производства, поскольку даже один грамм такого дорогостоящего вещества способен решить множество проблем.

Наноматериалы это не один «универсальный» материал, а обширный класс множества различных материалов, объединяющий их различные семейства с практически интересными свойствами. Заблуждением является и то, что наноматериалы – это просто очень мелкие, «нано»частицы. На самом деле, многие наноматериалы являются не изолированными друг от друга частицами, а представляют собой сложные макро- или микрообъекты, которые наноструктурированы на поверхности или в объеме. Такие наноструктуры можно рассматривать в качестве особого состояния вещества, так как свойства материалов, образованных с участием наноструктурных элементов, не идентичны свойствам объемного вещества, не содержащего таких элементов.

Итак, наноматериалы характеризуются несколькими основными чертами, делающими их вне конкуренции по сравнению с традиционными материалами,.

Во – первых, все наноматериалы действительно состоят из нанокристаллов, которые нельзя увидеть невооруженным глазом. Это первый плюс – суперминиатюризация, приводящая к тому, что на единице площади можно разместить

больше функциональных наноустройств, что жизненно важно, скажем, для нанoeлектроники или для достижения суперплотной магнитной записи информации.

Во-вторых, наноматериалы, как правило, обладают большой площадью поверхности, ускоряющей взаимодействие между ними и средой, в которую они помещены. Например, каталитически активные материалы позволяют в тысячи и даже миллионы раз ускорить химические или биохимические реакции. Интересное применение – разложение воды на водород и кислород в присутствии наночастиц диоксида титана, который всем нам известен как компонент титановых белил. Наночастицы позволяют отсеять бактерии или эффективно поглотить примеси или токсины. Наночастицы также могут переносить с собой необходимые лекарства, программируемо доставляя их к заранее выбранной цели, например, раковой опухоли, а также при гипертермии (дозированном перегреве опухоли вплоть до гибели раковых клеток среди окружающих их нормальных тканей).

В – третьих, наноматериалы уникальны тем, что находятся в особом, «наноразмерном», состоянии, которому квантовомеханические эффекты. Эти эффекты имеют место при таком критическом размере наночастиц структуры, которые соизмеримы с так называемым корреляционным радиусом (например, с длиной свободного пробега электронов, фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы и др.). Характерной особенностью наночастиц является также отсутствие в них точечных дефектов. Это делает, в частности, полупроводниковые наночастицы («квантовые точки») идеальными элементами совершенных энергосберегающих лазерных и светоизлучающих элементов. А индивидуальные углеродные нанотрубки обладают прочностью, в десятки раз превышающей прочность лучших сортов стали. При этом они во много раз выигрывают у стали и по удельной массе. Все эти признаки вполне объясняют тот факт, что даже грамм наноматериала может быть более эффективен, чем тонна обычного вещества, и что их производство – вопрос не количества, не тонн или километров, а качества человеческой мысли, «ноу-хау» (от английской know how – «знаю как»).

Нанотехнологии – чрезвычайно сложная, междисциплинарная область деятельности, объединяющая на равных усилия дипломированных химиков, физиков, механиков, материаловедов, медиков, специалистов в области вычислительной техники и др. Талантливые дилетанты и романтики, к сожалению, часто не обладают необходимой подготовкой или необходимыми возможностями, а также не всегда могут распознать, что они изобретают (в который уже раз!) велосипед, не зная текущего положения дел в том ворохе разноплановой научной информации, которая появляется ежечасно. В области

наноматериалов удивительным образом переплетены как глубоко фундаментальные научные основы, так и прорывные аспекты практического использования человеческих знаний. Только полностью контролируемая исследователем цепочка от новой идеи до синтеза, анализа и установления практически-важных свойств могут помочь войти в элитный клуб исследователей наномира.

Нанотехнологии – детище современной фундаментальной науки. Последние достижения свидетельствуют о возможности создания новых поколений функциональных и полифункциональных материалов, а проекты возможного использования нанотехнологий затрагивают практически все области человеческой деятельности. В то же время, постепенно происходит переосмысление научных фантазий, которые приобретают черты реалистичности.

Что можно сказать об истоках нанотехнологии и о фундаментальном вкладе российских исследователей в развитие нанотехнологий. Отправной точкой следует считать найденные Г.А. Гамовым еще в 30-х годах прошлого века решения уравнения Шредингера, которые означали возможность преодоления частицей энергетического барьера даже в том случае, когда энергия частицы меньше высоты барьера. Это явление, называемое туннелированием, позволило объяснить многие экспериментально наблюдавшиеся процессы. Развитие электроники подошло к использованию процессов туннелирования лишь тремя десятилетиями позже, когда появились туннельные диоды, открытые японским ученым Л. Есаки, удостоенным позднее Нобелевской премии. В настоящее время процессы туннелирования положены в основу технологий, позволяющих оперировать со сверхмалыми величинами порядка нанометров.

Другим эпохальным событием нанотехнологической революции обычно считают легендарную лекцию Нобелевского лауреата Р. Фейнмана «Там внизу еще много места» («There's Plenty of Room at the Bottom»), в которой он предложил 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.).

Многие фундаментальные исследования, без которых было бы невозможно развитие современных нанотехнологий, проводились на протяжении десятилетий научными школами академиков В.А. Каргина, П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина и особенно 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 пионерским и практически чрезвычайно важным для своего времени достижением является создание и 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 «состав-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.

Систематическое изучение частиц малых размеров началось с развития коллоидной химии и в этой связи следует упомянуть знаменитую книгу Вольфганта Оствальда «Мир обойденных величин», написанную им в окопах Первой мировой войны. Именно коллоидные системы («золи», «коллоидные растворы», «прямые и обращенные мицеллы», «жидкие кристаллы», «адсорбционные слои», «пленки Лэнгмюра-Блоджетт», «мини- и микроэмульсии») можно назвать прямыми предшественниками наносистем. Формирование коллоидных систем обычно происходит в результате нековалентных (лиофильных/лиофобных, Ван-дер-Ваальсовых, электростатических) взаимодействий молекул между собой, причем характеристический размер элементов коллоидных систем находится в интервале от 1 до 1000 нм. Например, золи содержат частицы размером 1-100 нм, равномерно распределенные в какой-либо среде (вода, масло, воздух или другой газ). Наиболее часто встречаются коллоидные системы, формируемые в результате лиофильных/лиофобных (в частности гидрофильных/гидрофобных) взаимодействий. В этом случае молекулы, формирующие нанообъект, должны являться «амфифильными», то есть иметь неполярный «хвост», растворимый в неполярных растворителях, или гидрофобный «хвост», и полярную «головку», обладающую гидрофильными свойствами. В воде гидрофобные части таких молекул стремятся объединиться, формируя неполярный «островок» (часто сферической формы) в полярном растворителе. Самыми яркими амфифильными свойствами обладают молекулы и ионы «поверхностно-активных веществ» (ПАВ). Примером ПАВ может служить додецилсульфат натрия $C_{12}H_{25}SO_4Na^+$ – один из наиболее распространенных компонентов моющих средств.

Именно на этом принципе построены природные «нанореакторы» и «наноконтейнеры»: нековалентно связанные молекулярные системы ограничивают реакционную зону, а встраиваемые в стенки реактора органические мембраны служат для регулировки потока веществ. Так происходит биоминерализация, транспорт и хранение биологически активных компонентов в живых организмах. Однако биологические нанореакторы и процессы, происходящие в них, оказываются слишком сложны для непосредственной репликации в технологии. Синтез наноструктур в пространственно-ограниченных коллоидных системах является наиболее распространенным способом получения наноразмерных систем.

По целому ряду известных всем причин активность российских ученых в области нанотехнологий и наноматериалов, равно как и в других научных направлениях значительно сократилась в последнее десятилетие 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_2 и WS_2 (Тенне, 1995 г.), V_2O_5 (Ажайян, 1995 г.), TiO_2 (Хойер, 1996 г.). Несколько позже были предприняты попытки создания молекулярных переключателей (2002г.) и измерения электропроводимости отдельных молекул (2000г.), продемонстрирован полевой транзистор на углеродной нанотрубке (2000г.), продолжены исследования по самосборке и управляемой сборке молекул и наночастиц, продолжены исследования по самосборке и управляемой сборке молекул и наночастиц, тсмплатному синтезу, развиты такие методы получения наноструктур как лазерная абляция, молекулярно-лучевая эпитаксия, ионное травление, нанолитографии сфокусированным ионным пучком, расширены возможности исследования нанообъектов с помощью электронной микроскопии высокого разрешения и синхротронного излучения.

На сегодняшний день реализованы первые наноактюаторы (устройства конвертирующие электрическую, тепловую, химическую или биологическую энергию в механическую): описана возможность передачи вращения с одной нанотрубки на другую (по аналогии с шестеренками), создан гигагерцовый механический осциллятор из группы концентрических нанотрубок, проведена интеграция биомолекулярных двигателей, работающих на биологическом источнике энергии - аденозинтрифосфате (АТФ), в механические мембраны и устройства, создан "переносчик" наночастиц на основе белка миозина и др. Особое место в развитии нанонауки отводится сейчас бионанотехнологиям, что в первую очередь связано с проблемами старения

биологических организмов и острыми потребностями современной медицины в неинвазивных методах комплексной диагностики и лечения заболеваний. Все высокоразвитые государства, включая США, Японию, Германию, Англию, Францию, Китай и Южную Корею ведут интенсивные разработки, направленные на использование уникальных свойств гибридных бионаноматериалов. Разнообразные направления развития наномедицины включают биосенсорную диагностику, наночастицы как средство доставки лекарств и новые формы лекарственных препаратов, создание сверхточной лазерной техники, нанороботов, наноинструментов и наноманипуляторов для медицинских целей и многое другое.

Сегодня нанотехнологии и наноматериалы входят в новую эру - эру коммерциализации и непосредственного использования в промышленности. В литературе уже появились такие термины как наноиндустрия и нанобизнес, которые в отличие от самой приставки "нано", означающей предельно малый размер, становятся все более и более значимыми. Одно лишь бюджетное финансирование нанотехнологий в 2006 году составило около 5 миллиардов долларов США, причем текущие размеры финансирования можно сравнить лишь с ядерной и космической программами. Еще большее финансирование нанотехнологии получают от венчурных компаний. На сегодня объемы средств, затрачиваемых частным капиталом на развитие наноиндустрии по разным оценкам составляет от 5 до 10 млрд. долларов.

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. Производство нанопорошков оказалось довольно масштабным и было 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). Количество же коммерческих нанопродуктов, предлагаемых обществу, уже превысило 5 тысяч наименований, а число компаний, привлекающих различные нанотехнологии по всему миру превысило в 2006г. одну тысячу.

Акт об исследованиях и развитии нанотехнологий в текущем столетии, подписанный американским 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, а также создания новых поколений функциональных и

конструкционных наноматериалов, наноматериалов для медицины, машиностроения и робототехники, компьютерных технологий, экологии, авиации, систем безопасности и борьбы с терроризмом. Созданная в США инфраструктура включает ведущие университеты, национальные лаборатории и производственные структуры, функционирующие в составе венчурных компаний. Более половины патентодержателей составляют американские компании, университеты или частные лица. Даже Японии оказалось довольно трудно конкурировать с США и ей пришлось ограничить активность в области нанотехнологий 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 более, чем в 20 раз и лишь немногим (на 25 %) уступивший США. Вместе с тем по числу полученных патентов Китай намного уступает другим странам, находясь 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 активности 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 нанопроductов требовало крайне дорогостоящего оборудования, которым наши исследователи в большинстве своем не располагали, а многие не располагают и поныне. Исключение составляли лишь те, кто сотрудничал с зарубежными коллегами, имевшими такое оборудование. В этой связи заслуживает одобрения инициатива РФФИ (Российского Фонда Фундаментальных Исследований, www.rffi.ru) по поддержке международных грантов, позволяющих эффективно использовать уникальное диагностическое оборудование научных центров ФРГ, Франции, Италии, Бельгии, Голландии, Японии, а в последнее время и США. Достаточно вспомнить, что 10 лет назад в Москве не было ни одного функционирующего сквид-магнетометра, которые совершенно необходимы для создания и исследования нанопорошков.

Тем более удивительно, что и в трудные 90-е годы фундаментальные исследования, вносящие несомненный вклад в развитие нанотехнологий, не прекращались в России. Достаточно назвать научные группы, которые возглавляли М.В. Алфимов, Р.А. Андриевский, В.В. Болдырев, А.Л. Бучаченко, Р.З. Валиев, С.П. Губин, А.И. Гусев, Б.В. Дерягин, А.Л. Ивановский, Ю.А. Котов, И.В. Мелихов, И.И. Минкин, А.Д. Помогайло,

А.И. Русанов, И.П. Суздалев, Ю.В. Цветков, А.Ю. Цивадзе и многие другие. В 1996 г. по инициативе М.А. Ананяна был организован институт нанотехнологий, а в 2001 г. – концерн «Наноиндустрия». Созданные В.А. Быковым с сотрудниками сканирующие зондовые микроскопы получили международное признание и оказались востребованными научным сообществом многих зарубежных стран.

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, 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 - 40 раз уступало размерам государственной поддержки нанотехнологий в США. Тем не менее, некоторые академические, вузовские и отраслевые лаборатории были быстро переориентированы на исследования в области нанотехнологий и наноматериалов, хотя большинство из них по-прежнему не располагало и до сих пор не располагает 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 нанoeлектроники, 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 формирования 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 отметить, 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 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.

Такие чудеса случались в прошлом 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 колоссальные средства 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 фундаментальными знаниями в области математики, физики, химии, механики, биологии. Лишь междисциплинарные образовательные программы способны обеспечить нанотехнологический прорыв.

Созданный в 1991г. в МГУ им. М.В.Ломоносова Факультет Наук о Материалах может служить своеобразной моделью междисциплинарного естественно-научного образования, обеспечившего многоуровневую подготовку материаловедов-исследователей, включая бакалавров, специалистов и магистров в направлении «Химия, физика и механика материалов», кандидатов и докторов наук по специальностям «Химия твердого тела» и «Физика конденсированного состояния». В 2003 г. Министерством образования РФ в порядке эксперимента в технических университетах было открыто образовательное направление «Нанотехнология» с введением двух специальностей: «Нанoeлектроника» и «Наноматериалы». В настоящее время подготовка по этим специальностям проводится в таких вузах, как РХТУ им. Д.И. Менделеева, МВТУ им. Баумана, Санкт-Петербургский государственный технологический университет, Санкт-Петербургский политехнический университет и другие. 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 осуществлять подготовку специалистов по нанотехнологиям в рамках образовательных программ по фундаментальному материаловедению. В тесной связи с такой идеологией находится выраженное профессором Гарвардского университета Д. Вайтсайдом и полностью разделяемое авторами представление о том, что при создании материалов с разнообразными свойствами наноразмерные особенности структуры не всегда являются определяющим фактором. Для большинства материалов, особенно объемных, целесообразно рассматривать различные уровни 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 следует стремиться к созданию материалов 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 существующего сейчас нанотехнологического отставания.

Однако нельзя сбрасывать со счета, что нанотехнология в отличие от обычных традиционных технологий, 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 лабораторных исследований к nanoиндустрии несомненно более сложен, чем при промышленным создании 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 может показаться утопией. Вряд ли на активность 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 зарубежные друзья и партнеры». Есть серьезные 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 значительные средства в развитие инновационных производств типа nanoиндустрии.

В этом смысле ситуация за рубежом кажется несомненно более благоприятной. Уже сейчас 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.

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», организовавший производство нанопорошков 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 международный журнал «Наноструктурное материаловедение», издаваемое в Украине и печатающий материалы на русском или английском языках. Наконец, с конца 2006 года начал издаваться журнал «Российские нанотехнологии» (гл. редактор акад. М.В. Алфимов), запущен и «Российский электронный наножурнал». В последних двух журналах в роли учредителя выступает «Федеральное агентство по науке и инновациям».

Аналитическое агентство Nanotechnology News Network предлагает через открытые им сайты новейшую информацию по нанотехнологиям для российских (www.nanonewsnet.ru) и зарубежных (www.nanonewsnet.com) читателей. На факультете наук о материалах МГУ им. М.В.Ломоносова создан нанотехнологический портал (www.nanometer.ru) и ежемесячно издается одноименный информационный бюллетень «Нанометр» (www.fnm.msu.ru).

Среди проблем, связанных с развитием нанотехнологий, реализуемая в США программа «Национальная нанотехнологическая инициатива» считает приоритетным анализ социальных и экономических 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, содержащей информацию об основных организациях, занимающихся нанотехнологиями в России и 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 ранее, после 2000 г. отечественные исследования в области нанотехнологий заметно оживились, но все познается в сравнении. Напомним 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...

* * *

Введение

для последователей наук о материалах

В научной литературе такие ключевые в современном понимании термины как «наноматериалы» и «нанотехнологии» появились лишь немногим более 30 лет назад. Между тем, технология получения цветных стёкол, окрашенных наночастицами металлов, была известна ещё в Древнем Египте, а возраст биологических нанообъектов вообще сопоставим с продолжительностью существования жизни на Земле. Некоторые исследователи связывают появление наноматериалов с коллоидными системами, в изучении которых исключительную роль сыграли Р. Зигмонди и Т. Сведберг, удостоенные Нобелевских премий по химии за 1925 и 1926 г.г., соответственно. Однако ближе всего к современному пониманию «нанотехнологий» и «наноматериалов» оказался нобелевский лауреат Р.Фейнман, предложивший два принципиально разных подхода к созданию нанопродуктов: «снизу - вверх» и «сверху - вниз», первый из которых связан с осуществлением процессов атомарной или молекулярной сборки (самосборки), а второй — с процессами механического диспергирования, интенсивных пластических деформаций, распадом твёрдых растворов и другими процессами. Примечательно, что предложенные Р. Фейнманом подходы появились задолго до создания инструментов (сканирующие туннельные высокоразрешающие электронные и атомно-силовые

микроскопы), позволивших не только исследовать, но и создавать контролируемым образом необходимые наноструктуры.

Экспериментальные исследования последнего десятилетия показали, что развитие нанотехнологии, нацеленной на производство и использование твердых нанодисперсных веществ, тормозится недостатком информации о закономерностях их поведения в техногенных и природных системах. Наметилаь необходимость проведения крупномасштабных фундаментальных исследований, обеспечивающих понимание возможностей получения и использования нанодисперсных веществ в технике, медицине и сельском хозяйстве. Тематика необходимых исследований относится к пограничным областям физики, химии, биологии и медицины, образуя широкий фронт междисциплинарного поиска.

Отсутствие консенсуса в понимании того, что такое наноматериалы и нанотехнологии, обусловлено различием научных подходов исследователей, и это вызывает необходимость уточнить соответствующие определения. Нанотехнологии (НТ) — это совокупность процессов, позволяющих создавать материалы, устройства и технические системы, функционирование которых определяется в первую очередь наноструктурой, т.е. фрагментами структуры размером от 1 до 100 нм. Наноматериалы (НМ) - продукты нанотехнологий, их следует характеризовать как материалы, функциональные свойства которых определяются наноуровнем их структуры.

Следует отметить, что большинство материалов независимо от их функционального или конструкционного назначения, имеет многоуровневую структуру. Наноуровень структуры существует в любом материале, с той лишь разницей, что далеко не в каждом из них наноуровень играет определяющую роль в формировании функциональных свойств. Более того, наноуровень структуры, эволюционирующий в зависимости от условий создания или функционирования материала, изменяется во времени, хотя эти изменения научились контролировать сравнительно недавно в результате так называемой инструментальной революции.

Существование иерархически структурированных систем является проявлением сложности и многообразия взаимодействий на различных уровнях (масштабах) организации материи. В настоящее время проблема исследований и моделирования поведения (экспериментального и теоретического) различных иерархически структурированных систем приобретает особое фундаментальное и значение в связи со «взрывом» информационных, энергосберегающих технологий, биохимии и, разумеется, нанотехнологий.

Иерархия структурных уровней материалов

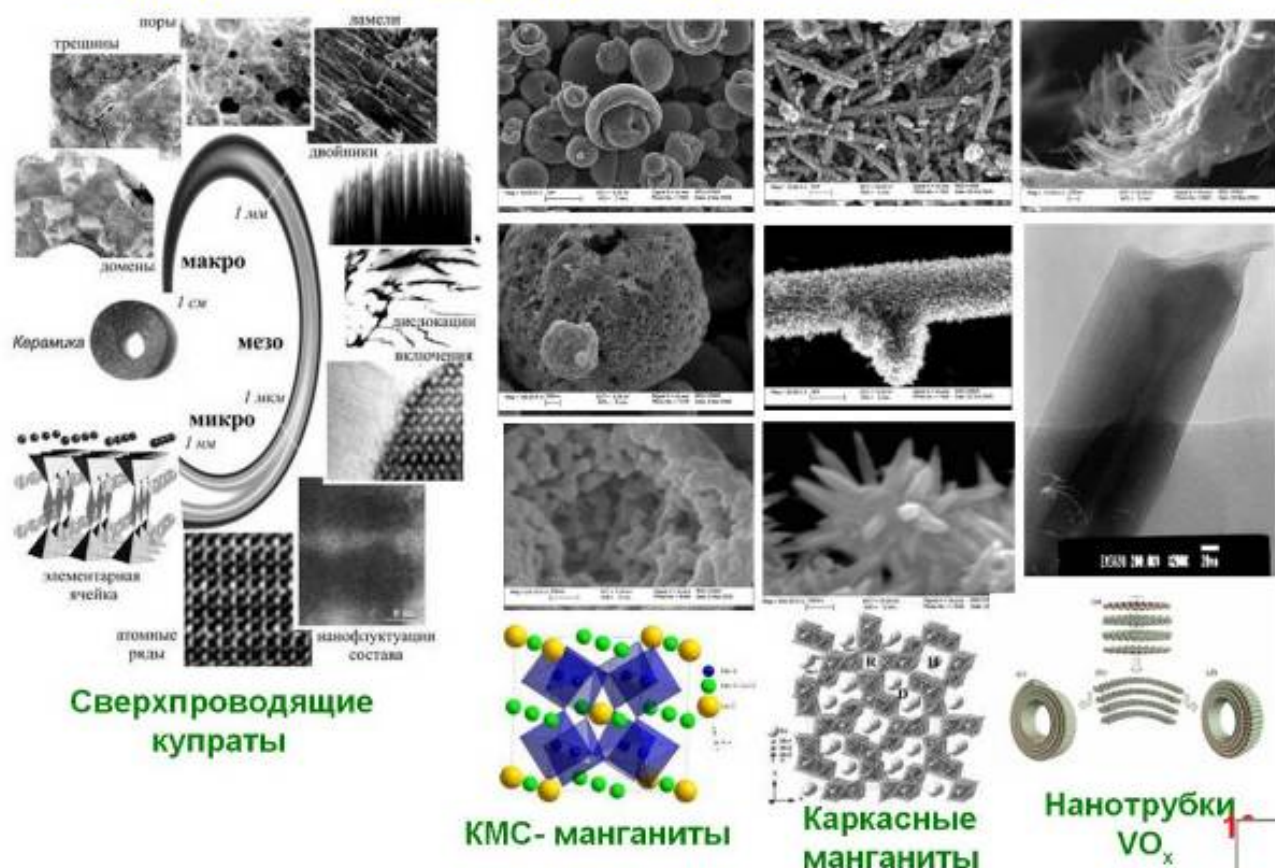


Рис.1. Иерархия уровней структуры различных функциональных наноматериалов, слева направо: крупнокристаллическая сверхпроводящая керамика с нанопористостью, выступающими в качестве эффективных центров пиннинга, наноструктурированные микросферы манганитов, обладающих колоссальным магнетосопротивлением, поверхностно – декорированные нитевидные кристаллы манганитов с туннельной структурой, образцы ванадий – кислородных нанотрубуленов.

Особой проблемой при этом является создание материалов с элементами наноструктурирования, в которых рекордные функциональные свойства или проявления полифункциональности возникают за счет вклада в «формировании» свойств различных уровней структуры – и не только на нано, но и на микроуровне структуры (Рис.1).

В отличие от обычных технологий нанотехнологии характеризуются повышенной «научеёмкостью» и затратностью, необходимостью высокоинтеллектуальной и экспертной деятельности, и поэтому в них резко снижена вероятность успешного решения проблем методом «проб и ошибок», который традиционно используют во многих прикладных разработках. Поэтому путь от лаборатории к наноиндустрии, несомненно, является более сложным, чем при выходе на промышленное производство «обычных» продуктов.



Рис.2. Основные факторы, влияющие на практически-важные структурно-чувствительные характеристики микро- и наноструктурированных материалов.

Теснейшая взаимосвязь фундаментальных и прикладных аспектов развития новых поколений НМ и НТ проявляется в обоюдном направлении. Нет сомнений, что основные пути фундаментальных исследований в области НМ и НТ определяются необходимостью создания новых поколений функциональных и конструкционных материалов практически в любых областях деятельности, включая энергетику, машиностроение, химическую промышленность, электронику и информационные технологии, авиацию и космос, авто- и железнодорожный транспорт, судостроение, строительство, медицину и здравоохранение, создание новых лекарственных препаратов и биоматериалов, производство и хранение пищевых продуктов, в том числе технологию опреснения воды, изготовление одежды (текстиль, шерсть, шёлк) с улучшенными функциональными свойствами, биотехнологию и сельское хозяйство, включая улучшение качества почв, создание новых бытовых продуктов (краски, холсты, бумага) и ценных бумаг (документы, денежные знаки), наконец, производство многообразных продуктов «двойного» назначения.

В то же время фундаментальные исследования принципиально отличаются от прикладных тем, что их эффективность, особенно в таких наукоёмких направлениях, как создание НМ и НТ не predetermined заранее и зачастую не ясна даже самим исследователям. Поэтому путь от оригинальной научной идеи к её практическому

воплощению может оказаться исключительно извилистым и далеко не всегда предсказуемым. Именно по этой причине финансирование фундаментальной науки во многих странах было и остаётся уделом государства. Примером может служить реализуемая в США «Национальная нанотехнологическая инициатива» и аналогичные программы, созданные в Японии и странах Европейского Союза. К сожалению, в силу ряда объективных причин этот путь не был вовремя реализован в России. После распада СССР и мучительных поисков элементарного физического выживания научное сообщество нашей страны потеряло целое десятилетие для интенсивной творческой активности.

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 не располагали, а многие не располагают и сейчас. Свойства наноматериалов, как и любых других материалов, зависят от их химического состава, структуры, морфологической организации, размера, размерности и степени упорядочения составляющих их фрагментов, отвечающих нанодиапазону (рис.2). Естественным способом получения наноматериалов могут быть самосборка и самоорганизация. Организация (возникновение наноструктурного упорядочения) при самосборке контролируется, главным образом, конкуренцией различных сил взаимодействия, имеющих чаще всего молекулярную природу, наподобие гидрофильных - гидрофобных взаимодействий, сил гравитации, ван-дер-ваальсовых или кулоновских взаимодействий. Самосборка («консервативная самоорганизация») — процесс образования упорядоченной надмолекулярной структуры или среды, в котором в практически неизменном виде принимают участие только компоненты (элементы) исходной структуры, аддитивно составляющие или «собирающие» как части целого результирующую сложную структуру. Самоорганизация может быть использована как механизм создания сложных «шаблонов», процессов и структур на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, что наблюдался в исходной системе, за счет многочисленных и многовариантных взаимодействий компонентов на более низких уровнях, на которых действуют свои, локальные законы взаимодействия, отличные от законов коллективного поведения самой упорядочивающейся системы. Для процессов самоорганизации характерны различные по масштабу энергии взаимодействия, а также существование ограничений степеней свободы системы на нескольких структурных уровнях.

Объемные (3D)
наноструктурированные
материалы: металлы и
сплавы с ультрамикрозернистой
структурой, нанокерамика

Наноструктурированные
планарные материалы
2D: пленки и покрытия,
нанопечатная литография,
самособирающиеся монослои

Наноструктурированные
(1D) материалы: нанотрубки,
нано волокна, наноагрегаты и
нанопроволоки

Нанодисперсные (0D)
материалы: нанопорошки,
нанокристаллы, квантовые точки

Наноконпозиты:
наноструктурированные
матрицы, наночастицы в
керамической, металлической
или полимерной матрице

Супрамолекулярные
материалы

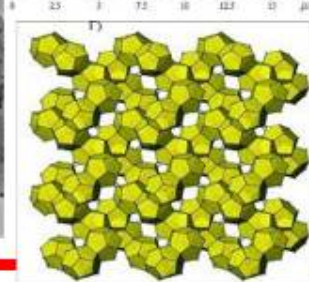
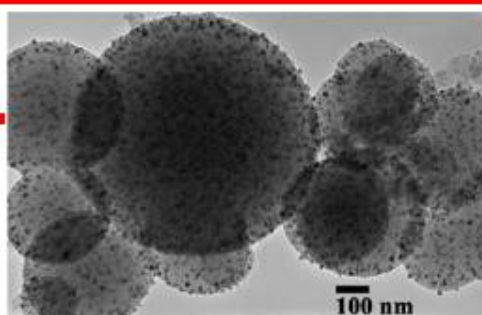
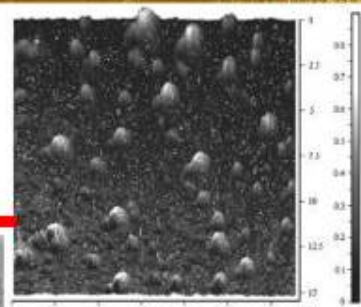
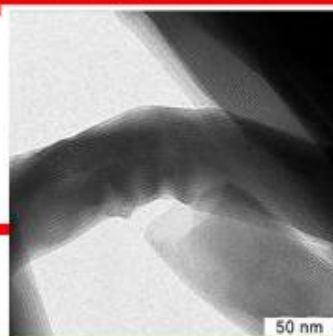
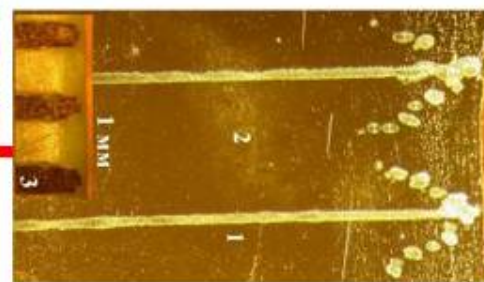
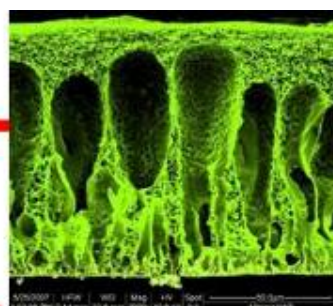


Рис.3. Классификации наноматериалов по критерию их размерности

Все многообразие наноматериалов (Рис.3) целесообразно классифицировать на следующие группы:

- Объемные (3D) наноструктурированные материалы, формируемые в результате термических, механических воздействий (металлы и сплавы с ультрамикрозернистой структурой, спинодальный распад в стеклообразных материалах или твердых растворах) или спекания предварительно компактируемых массивов наночастиц (нанокерамика).
- Наноструктурированные планарные (2D) материалы, включая тонкие и толстые пленки и покрытия, продукты нанопечатной литографии и самособирающиеся монослои.
- Наноструктурированные (1D) материалы, в том числе нанотрубки, нановолокна, наноагрегаты и нанопроволоки, формируемые из пересыщенных пара, раствора или в результате электрохимических и плазмохимических процессов
- Нанодисперсные (0D) материалы (нанопорошки, нанокристаллы, квантовые точки), получаемые в результате механического измельчения объемных объектов, путем кристаллизации пересыщенных систем (из пара, жидких фаз — водных и неводных

растворов или расплавов), а также нанокластеры, создаваемые самосборкой или стабилизируемые благодаря разнообразным темплатам.

- Наноккомпозиты, состоящие из мезопористой матрицы с 1D-каналами или 2D-слоями, заполненными нанофазой, или нановискеров, нанотрубок и наночастиц в полимерной, металлической или керамической матрице.

- Супрамолекулярные материалы, формируемые из более простых молекул с целью создания молекулярных устройств или машин, имитирующих биологические процессы в живых организмах, нанопористые структуры

Ключевым вопросом, связанным с исследованием наноматериалов, является возникновение определенных химических, физических и других особенностей при переходе вещества в наносостояние. Изменение химических свойств диктуется наличием достаточно большой доли «поверхностных атомов» и, соответственно, существованием большого вклада энергии границы раздела в термодинамические характеристики системы в целом. В ряде случаев происходит изменение относительной стабильности модификаций ультрадисперсных фаз с различной, иногда не существующей в объемном состоянии, кристаллической структурой, формирование агломератов или агрегатов наночастиц, изменение механизма или кинетики реализации топохимических реакций, диффузионного (ионного, электронного) транспорта вещества и носителей заряда через развитые границы раздела. Подобные особенности приводят к существенному изменению механизмов формирования наночастиц и их агрегатов, приводя к морфологическому разнообразию нанообъектов. Существование большой площади поверхности и наличие метастабильных фаз с достаточно большим количеством потенциально активных центров гетерофазного взаимодействия способствует существенному повышению каталитической активности. Указанные особенности также тесно перекликаются с изменением термической стабильности наносистем, изменением параметров теплопроводности, теплоемкости и пр. С точки зрения физических свойств большое влияние начинают оказывать «эффекты близости», связанные с перекрытием зон Ферми при близком контакте составных частей наноматериала или нанокомпозита, а также окружающей их газообразной или жидкой среды. При этом в существенной степени проявляются также эффекты туннелирования, а квантово - размерный фактор приводит к возникновению новых оптических, электронных и магнитных характеристик, особенно в том случае, если размер наночастиц сопоставим с размерами «квазичастиц», что приводит, например, к своеобразному поведению экситонов в квантовых точках, плазмонному резонансу и пр. Следует также отметить, что в подобных наносистемах специфическим образом реализуется магнитный и другие типы дальнедействующих обменов, которые исключают

наличие блоков (доменов) внутри одной наночастицы, однако при этом может происходить взаимодействие в ансамбле наночастиц, конкурирующее с тепловыми флуктуациями свойств и положений наночастиц.

Таким образом, ансамбли наночастиц могут проявлять новые, коллективные свойства, чувствительные к внешним условиям. В них возможна реализация кросс-корреляции различных физических характеристик, приводящая к получению полифункциональных (во всех смыслах) материалов с уникальными свойствами. Отдельно следует отметить примерное соответствие размеров нанообъектов, супрамолекулярных ансамблей и объектов биологической (белковой природы) природы, к тому же во всех этих «ансамблях», как правило, реализуются достаточно слабые связи – водородные, ван-дер-ваальсовы, дисперсионные взаимодействия и пр., существенно отличающиеся по энергии от взаимодействий, приводящих к формированию собственно самих отдельных нанообъектов. Это близость характеристик энергетических воздействий, а также наличие нестандартной координации «ненасыщенных» поверхностных атомов наночастиц открывают возможность сопряжения наночастиц и биологических объектов для реализации нанобиотехнологических подходов. При этом такие «кентавры» могут достаточно легко обходить иммунную систему организма, проникать сквозь клеточные мембраны, гематоэнцефалический и плацентарный барьеры, что дает возможность разработки новых средств доставки лекарств и терапевтического воздействия.

Добиться формирования дезагрегированных наночастиц, стабильных суспензий, эмульсий и других коллоидных систем без существенной доли межчастичного взаимодействия и образования агрегатов часто бывает достаточно сложно (а в ряде случаев и нецелесообразно). Поэтому при рассмотрении природы различных явлений в наносистемах и процессов, происходящих при получении и функционировании наноматериалов, следует проводить детальный анализ взаимодействий в ансамблях нанообъектов. Указанное взаимодействие может реализоваться за счет формирования новых химических связей в ансамблях наночастиц, их физического агрегирования, протекания процессов обмена веществом или энергией. Особую роль приобретает рассмотрение специфических, различных по природе, энергии и дальности действия, взаимодействий на существующих иерархических уровнях структуры. Только такой подход способен предсказательно объяснить поведение реальных систем. Вторая важная составляющая, от которой зависит ряд важнейших функциональных характеристик – динамика и направленность различных транспортных явлений, включая как перенос вещества, так и энергии, заряда и т.д. через развитые гетерогенные границы. Очевидно также, что кроме размерных эффектов, в существенной степени модифицирующих

поведение ансамбля нанообъектов по отношению к объемному состоянию, в наносистемах будут сказываться эффекты размерности (в контексте морфологии, а также анизотропии физических характеристик) и степени упорядочения составляющих систему элементов, что должно приводить к существенному изменению интегральных характеристик ансамбля упорядоченных и взаимодействующих друг с другом нанообъектов. При этом одними из самых эффективных подходов создания упорядоченных (наноструктурированных) систем является самосборка и самоорганизация. *Самосборка* – процесс образования упорядоченной надмолекулярной структуры или среды, в котором в практически неизменном виде принимают участие только компоненты (элементы) исходной структуры, аддитивно составляющие или «собирающие», как части целого, результирующую сложную структуру. *Самоорганизация* может быть использована как механизм создания сложных «шаблонов», процессов и структур на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, что наблюдался в исходной системе, за счет многочисленных и многовариантных взаимодействий компонент на низких уровнях, на которых существуют свои, локальные, законы взаимодействия, отличные от коллективных законов поведения самой упорядочивающейся системы. Для процессов самоорганизации характерны различные по масштабу энергий взаимодействия, а также существование ограничений степеней свободы системы на нескольких различных уровнях ее организации.

Целенаправленное получение наноматериалов с воспроизводимыми, заранее заданными свойствами является очень сложной фундаментальной задачей, решение которой должно учитывать как указанную выше фундаментальную специфику наноматериалов, так и особенности реализации взаимодействий в ансамблях нанообъектов и их иерархичность. Получение наноматериалов означает создание метастабильных систем с заданной иерархической пространственной организацией, при которой реализуется требуемые уникальные физические, физико-химические и биологические свойства. Очевидно, что далеко не все традиционные методы получения наноматериалов при таких исходных предпосылках способны привести к требуемому результату. Поэтому следует более тщательно подходить к вопросам получения наноматериалов, а также пытаться разработать уникальные методики под конкретные классы наноматериалов. У большинства исследователей не вызывает сомнений, что «поатомная» сборка наноматериалов является научной утопией, а в качестве трех основных подходов могут выступать принципы самосборки, самоорганизации и использования темплатов, особенно в сочетании с рядом химических методов гомогенизации исходных прекурсоров, другими методами «мягкой химии» и с учетом

всего комплекса явлений, изучаемых физической химией поверхности и термодинамики открытых систем. Эволюция наносистемы на различных стадиях получения целевого наноматериала носит характер температурно – временных превращений (ТТТ - диаграммы) и включает как важнейший параметр времени (продолжительности) процесса. Для повышения степени воспроизводимости всего процесса в целом требуется анализ влияния условий синтеза на иерархическую организацию структуры конечного ансамбля нанообъектов, в чем проявляются известные эффекты «предыстории» и «топохимической памяти». В случае, если в системе известны условия реализации процессов самосборки, при которых из унифицированных составляющих формируется более сложная, часто упорядоченная, структура, или же открытая система за счет самоорганизации с использованием различных по рангу компонент и различных по типу и энергии взаимодействий формирует такое наноструктурированное состояние самостоятельно, то это может привести к эффективному получению наноматериалов с требуемыми характеристиками. В ряде случаев возможно введение в систему структурообразующих темплатов (в том числе поверхностно-активных веществ, полидентантных лигандов, жидкокристаллических матриц, дендримеров, одно – и двумерных нанореакторов) – частей сложной системы, принадлежащих тому или иному масштабному уровню пространственной организации, обеспечивающих доминирование тех или иных взаимодействий из всего набора возможных вариантов, или же способствующих возникновению пространственных ограничений при формировании наноструктур. Темплатный метод синтеза, в силу своей специфики, часто является одним из самых эффективных и предсказуемых, приводящих к получению наноструктурированных материалов с высокой воспроизводимостью и высокими целевыми выходами продуктов.

Разработка новых типов материалов является прямым индикатором эффективности фундаментальных исследований в области создания принципиальных основ новых технологий их получения и проводится практико-целевым образом. Последнее означает выбор наиболее адекватных методов получения и соответствующего технологического регламента в зависимости от требуемых параметров конечного продукта. Очевидно, что фундаментальное понимание процессов, лежащих в основе современных и будущих методов получения наноматериалов, является важнейшим условием появления их новых типов. При получении наноматериалов существуют две основные причины, определяющие целесообразность проведения синтеза вообще. Первая из них связана с ожиданиями того, что использование более дорогостоящих и трудоемких в получении и хранении наноматериалов вместо «обычных» приведет к существенному улучшению существующих или к появлению новых, уникальных свойств, оправдывающих

дополнительные затраты на реализацию «нанотехнологического подхода». Вторая причина связана непосредственно с необходимостью многопараметрической миниатюризации устройств, используемых в быту и технике, уменьшению их энергоемкости и энергопотребления, увеличению эффективности использования. Миниатюризация, особенно в медицине, наноэлектронике, экологии и пр. может являться ключевым моментом, приводящим к самой возможности создания новых поколений материалов и устройств.

С фундаментальной, практической и методологической точек зрения моделирование является важнейшей стадией и, в то же время, важнейшей независимой составляющей исследований в области наносистем, наноматериалов и нанотехнологий, подтверждающей или опровергающей существующие интерпретации полученных экспериментальных данных, а также, в ряде случаев, обладающей уникальными прогностическими возможностями, существенно сокращающими и упрощающими процесс разработки и внедрения новых наноматериалов. Адекватное моделирование объектов и процессов нанотехнологий включает в себя глубоко фундаментальные знания, в том числе «из первых принципов», надежные базы данных справочных величин, концептуальные теории структуры (строения) и поведения сложных систем, а также перспективные алгоритмы разработки и реализации программного кода. Последнее является чрезвычайно трудоемким процессом, призванным обрабатывать, часто в режиме реального времени, огромные массивы данных с использованием эвристических и других численных алгоритмов, дополняющих математическое моделирование ключевых явлений и объектов. Кроме того, этот процесс является комплексным, многомасштабным моделированием, объединяющим воедино различные по своей сути алгоритмы описания поведения системы на различных иерархических уровнях – от нано- и мезо- до макроуровня, что только и может дать выход на прогностическое описание ожидаемых функциональных характеристик всей системы (наноматериала) в целом. Очевидно, что моделирование наноматериалов, процессов их получения, предсказания свойств и поведения в требуемых условиях эксплуатации возможно при использовании лишь мощных вычислительных комплексов, в том числе суперЭВМ с параллельными алгоритмами вычислений.

Роль методов анализа наносистем и наноматериалов трудно переоценить. Исторически разработка все более совершенных методов анализа, особенно методов визуализации, таких как сканирующая зондовая и просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения, инициировала само возникновение интереса к наносистемам, наноматериалам и нанотехнологиям. С точки зрения практического применения продуктов нанотехнологий надежное подтверждение результатов является

основанием для таких юридических процедур, как аттестация и сертификация «нанопродуктов», их лицензирование и т.д. Очевидно, что разработка новых и использование существующих аналитических методов и методик анализа наноматериалов тесно сопряжено с успехами в моделировании поведения наносистем и материалов, что наиболее ярко проявляется при разработке современного программного обеспечения, без которого невозможно функционирование ни одной аналитической методики. При использовании аналитических методов в повседневной научно-исследовательской практике становится возможным не только получение текущей экспериментальной информации, но и научное планирование и эффективная реализация серий экспериментов. К особенностям наносистем относится также то, что их анализ во многих случаях проводится на пределе разрешающей способности как конкретных аналитических комплексов, так и метода, который лежит в основе их функционирования. В связи с этим, анализ наноматериалов требует всегда применения комплекса взаимодополняющих методик анализа и их грамотной интерпретации. С другой стороны, в случае наноматериалов чрезвычайно важной является разработка методологических подходов, связанных с развитием метрологии и стандартизации.

Список литературы

1. Taniguchi, N. On the basic concept of nanotechnology / N. Taniguchi // Proc. Int. conf. Prog. Eng. Part 2. – Tokyo : Jap. Soc. Pres. Eng, 1974.
2. А.И. Русанов. Журн. общ. химии, 72, 532 (2002)
3. The Best of Colloid Science (Eds D.Platikanov, D.Exerova) Wiley-VCH, Weinheim, 2009. P.
4. R.P.Feynmann. Miniaturization. Reinhold, New York, 1961
5. Ю.Д.Третьяков. Успехи химии. 72, 731 (2003)
6. G.M.Whitesides. Small, 1, 172 (2005)
7. В.Я.Шевченко, В.Е.Шудетов, Н.А. Плате. В кн. «Белая книга по нанотехнологиям». URSS, Москва, 2008, с. 28
8. И.В.Мелихов. Вестн. РАН. 77, 987 (2007)
9. И.В.Мелихов. Альтернативная энергетика и экология. №1 (45), 20 (2007)
10. NSTC, 2003. National Nanotechnology Initiative: Supplement to the President's FY 2004 Budget. Washington, DC, Roco M.C., Williams R.S. and Elivisatos P. eds., 2000.
11. Yamaguchi Y; Komiyama H. Structuring Knowledge Project in Nanotechnology Materials Program Launched in Japan, [Journal of Nanoparticle Research](#), Volume 3, Numbers 2-3, June 2001, pp. 105-110(6)

12. M.C. Roco, "International Strategy for Nanotechnology Research and Development," J.Nanoparticle Research, 3 (5–6) (2001), pp. 353–360.
13. Ю.Д.Третьяков. Вестн.РАН, 77, 3 (2007)
14. Ю.Д.Третьяков. Вестн.РАН, 79, 3 (2009)
15. G.M.Whitesides. ACS Nano, 1, 73 (2007)