

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В КОСМОНАВТИКЕ

Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина

*Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ*

E-mail: novikov@sinp.msu.ru

## Введение

На рубеже XX–XXI столетий сформировалась новая стремительно развивающаяся научно-техническая область, которую можно охарактеризовать сочетанием трех понятий: нанонаука, нанотехнология, nanoиндустрия.

*Нанонаука* изучает фундаментальные свойства объектов нанометровых размеров (нанообъектов) и связанные с ними явления. К нанообъектам относят материальные объекты различной конфигурации: частицы (зерна), волокна, трубки, пленки и др., хотя бы один линейный размер которых лежит в диапазоне 1–100 нм, т.е.  $10^{-9}$ – $10^{-7}$  м. Со стороны малых значений этот диапазон непосредственно смыкается с областью размеров атомов и молекул, а его верхняя граница, отделяющая нанообъекты от микрообъектов, установлена достаточно условно. В общем случае ее нельзя однозначно связать с какими-либо характерными размерными параметрами, определяющими свойства вещества, например, с размерами магнитных доменов, длиной свободного пробега носителей заряда или с длиной волны де Бройля, поскольку для разных веществ значения этих параметров могут существенно отличаться.

*Нанотехнология* решает задачи создания самих нанообъектов, которые в зависимости от их конфигурации называют *наноструктурными элементами* или *наноструктурами*, материалов на их основе, называемых соответственно *наноструктурными (наноструктурированными) материалами* или просто *наноматериалами*, и законченных изделий, в составе которых используются наноматериалы. Применением термина «нанотехнология» во множественном числе обычно подчеркивают многообразие направлений в данной области или обозначают комплекс каких-то конкретных технологий.

*Nanoиндустрия* должна обеспечить достаточно масштабное производство наноматериалов и содержащих их изделий для применения в самых различных областях человеческой деятельности.

Как мы видим, понятия нанонаука, нанотехнология и nanoиндустрия тесно связаны между собой. Поэтому часто для обозначения рассматриваемой научно-технической области используют только один термин – «нанотехнология», подразумевая, что он охватывает научные основы технологии и производственные аспекты. Такой подход представляется наиболее правильным, поскольку, строго говоря, нанонаука не является самостоятельным научным направлением, а основывается на фундаментальных положениях и методах исследований физики, химии, биологии, математики и ряда технических и гума-

нитарных наук, что свидетельствует о ярко выраженной междисциплинарности нанотехнологии.

Очень важно отметить, что нанотехнология призвана создавать материалы и законченные изделия с принципиально новыми эксплуатационными свойствами, которые не могут быть достигнуты с помощью традиционных технологий.

Наноматериалы весьма разнообразны. Так, совокупность наночастиц, т.е. нанопорошок, может использоваться как самостоятельный материал, например, в качестве катализатора. Путем спекания или прессования нанопорошков из них можно получать высокопрочные твердые материалы. В качестве наполнителей нанопорошки могут входить в состав различных композиционных материалов, имеющих уникальные механические, тепловые или электрофизические характеристики.

Почему же наноматериалы обладают столь замечательными свойствами? Кратко на этот вопрос можно ответить следующим образом: во-первых, при переходе от микро- к нанообъектам увеличивается отношение числа атомов, находящихся на поверхности, к числу атомов в объеме, вследствие чего растет влияние сил поверхностного взаимодействия и границ раздела на свойства вещества, а во-вторых, с уменьшением размеров частиц все в большей степени проявляются квантовые эффекты. Роль первого фактора является определяющей, например, при получении наноматериалов с уникальными механическими свойствами, а второго – при создании элементов наноэлектроники.

Таким образом, можно констатировать, что наноструктурированное вещество приобретает новые свойства, отличные от физико-химических свойств, присущих веществу в его объемном состоянии. Переход в такое качественно новое состояние, называемое часто *наносостоянием*, для большинства веществ начинается как раз при размерах структурных элементов менее 100 нм.

Еще одним важнейшим отличием нанотехнологий от существующих микро- и макротехнологий является возможность реализации принципа «снизу–вверх», который предполагает создание требуемых структур, материалов и изделий путем их сборки из отдельных атомов и молекул. При этом значительная роль отводится процессам самоорганизации и самосборки наноструктур за счет межатомных и межмолекулярных взаимодействий, подобно тому как это происходит в живых системах. Очевидно, что указанный принцип, который называют также «восходящим», кардинально отличается от традиционного технологического принципа «сверху–вниз» («нисходящего»), реализуемого через процессы механической обработки материалов, их химического травления, дробления и т.д.

Космонавтика является одной из наиболее перспективных и масштабных областей применения нанотехнологий и наноматериалов. В ближайшие годы нанотехнологии и разнообразные наноматериалы будут все шире использоваться при создании новых образцов космической техники, что значительно изменит подходы к конструированию космических аппаратов (КА) и сыграет огромную роль в осуществлении крупномасштабных космических проектов первой половины XXI столетия.

Одной из важнейших задач, от решения которых во многом зависит успех развития работ в данной области, является подготовка специалистов, обладающих необходимым комплексом знаний и практических навыков. В настоящее время подготовке специалистов соответствующего профиля уделяется огромное внимание. Проводимая X Межвузовская научная школа молодых специалистов внесет свой вклад в решение этой задачи.

## 1. Физические основы нанотехнологий

Свойства вещества определяются, в первую очередь, его химическим составом и структурой. Достаточно вспомнить многообразие свойств химических элементов в периодической системе Д.И. Менделеева и различных их соединений, а также общеизвестный пример разительного отличия свойств алмаза и графита, которые состоят только из атомов углерода, но имеют разную кристаллическую структуру.

Однако при переходе вещества в наносостояние его свойства начинают сильно зависеть от размера составляющих его нанообъектов, что является следствием происходящего при уменьшении размера объектов изменения их свойств и характера взаимодействия с другими объектами. В этом заключаются *размерные эффекты*, которые возникают, когда размер объекта становится сопоставимым с каким-то параметром вещества, оказывающим значительное влияние на протекание тех или иных процессов в веществе и, соответственно, на его свойства. Этот параметр может характеризовать процессы, описываемые в рамках классической физики, либо на основании квантовомеханических представлений. Для классических размерных эффектов в качестве указанного параметра могут рассматриваться длина свободного пробега заряженных частиц в веществе, диффузионная длина, диаметр траекторий скольжения дислокаций в кристаллических структурах (петель Франка–Рида) и др., а для квантовых размерных эффектов, называемых также *квантоворазмерными*, соответствующим параметром чаще всего служит длина волны де Бройля.

При анализе квантоворазмерных эффектов удобно использовать еще один параметр наноструктур, называемый *размерностью* или *наноразмерностью*. Размерность наноструктур определяется числом измерений, в которых размеры рассматриваемого объекта лежат вне нанодиапазона и в которых, следовательно, не проявляются какие-либо особенности, связанные с размерными эффектами. По этому параметру все объекты можно разделить на четыре группы:

- 3D-объекты – объекты микро- и макродиапазонов (объемные материалы);
- 2D-объекты – нанопленки;
- 1D-объекты – нановолокна, нанотрубки и т.п.;
- 0D-объекты – наночастицы, нанокристаллы, квантовые точки.

Приведенную классификацию часто распространяют также на материалы, состоящие из объектов соответствующих групп.

О влиянии квантовых эффектов на свойства материалов (химические, электрические, оптические, тепловые) можно судить по распределению плотности

электронных состояний  $g(E)$ , т.е. по зависимости числа квантовых состояний, приходящихся на единичный энергетический интервал, от энергии электронов  $E$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $g(E)$  для объектов различной размерности. В 3D-объекте электроны могут свободно перемещаться во всех трех измерениях. Если рассматривать пленку, толщина которой соизмерима с длиной волны де Бройля  $\lambda$  (2D-объект), то в этом случае электроны смогут свободно перемещаться только в плоскости пленки, а в третьем измерении их движение будет ограничено потенциальным барьером, высота которого определяется разностью между работой выхода и энергией теплового движения электронов. Для полупроводников работа выхода лежит в диапазоне 1–6 эВ. Эта величина значительна по сравнению с энергией теплового движения электронов ( $\sim 0,026$  эВ). Таким образом, в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, электроны окажутся в глубокой потенциальной яме, и энергия их движения в этом измерении будет квантоваться в сочетании с непрерывными энергетическими спектрами электронов в направлениях, лежащих в плоскости пленки, что дает ступенчатую зависимость  $g(E)$ . Исходя из этого, 2D-объект принято называть *квантовой ямой (quantum well)*.

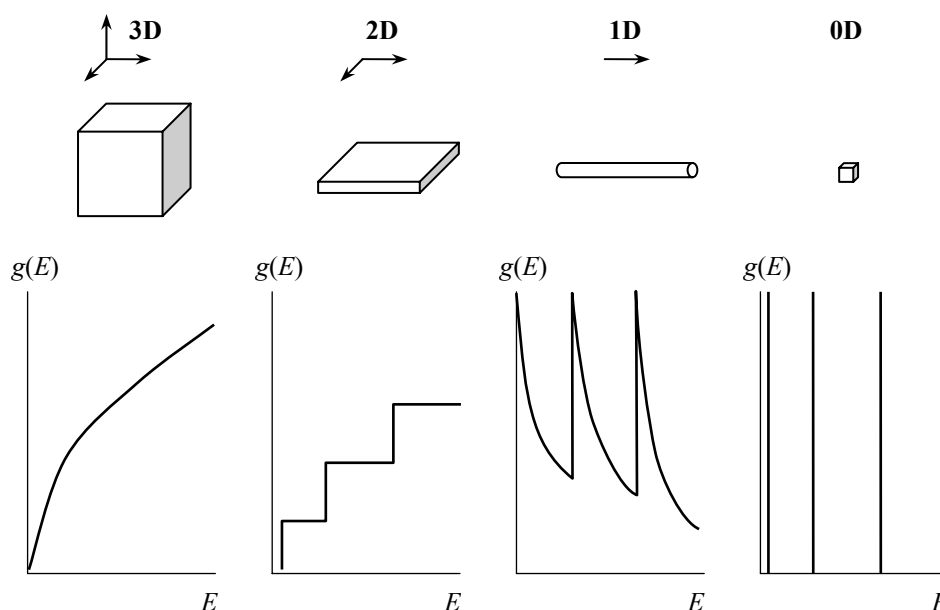


Рис. 1. Зависимости  $g(E)$  для объектов различной размерности

Если наложить квантовое ограничение на движение электронов еще в одном измерении, то получим 1D-объект, который принято называть *квантовой проволокой (quantum wire)*. В этом случае зависимость  $g(E)$  представляется совокупностью достаточно узких пиков.

Если и в третьем измерении размер объекта будет близок к длине волны де Бройля, то он превратится в *квантовую точку (quantum dot)* с наноразмерностью 0D, в которой, подобно отдельным атомам, электроны могут иметь только дискретный набор энергетических состояний. Благодаря этому на основе квантовых точек могут с успехом создаваться лазеры и различные элементы нанoeлектроники. Типичные размеры полупроводниковых квантовых точек

составляют 5–15 нм, а количество содержащихся в них атомов измеряется единицами–десятками тысяч, но разработаны технологии получения и более крупных квантовых точек.

Очень важно подчеркнуть, что размер является далеко не исчерпывающим признаком, характеризующим свойства объектов. При изменении размеров объектов происходят изменения количества содержащихся в них элементов, т.е. их сложности, и характерных времен протекания различных физических процессов с участием этих объектов. Такие взаимные связи могут быть проиллюстрированы рис. 2, на котором положение объекта в некотором гипотетическом трехмерном пространстве «размер–время–сложность» характеризуется радиус-вектором **R**. Изображенное пространство по степени сложности охватывает структуры от атомов до микрообъектов, что определяет диапазоны размеров и времен на горизонтальных осях.

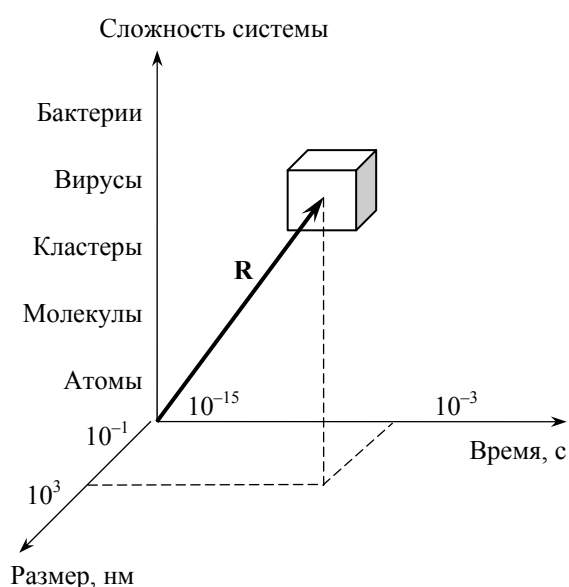


Рис. 2. Взаимосвязь характеристик объекта

## 2. Перспективные наноматериалы

Развитие нанотехнологии в значительной степени связано с открытием, изучением и уже начавшимся практическим использованием трех углеродных наноструктур: *фуллеренов*, *углеродных нанотрубок* и *графена*.

Фуллерены представляют собой шарообразные молекулы, состоящие из 60, 70, 76 ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$  соответственно) и более атомов углерода. Самым изученным является фуллерен  $C_{60}$ , который был открыт в 1985 г. в экспериментах по лазерному испарению графитовой мишени. Поверхность молекулы  $C_{60}$  представляет собой многогранник, состоящий из 20 шестиугольных и 12 пятиугольных граней (рис. 3). Диаметр молекулы  $C_{60}$  составляет около 0,7 нм, а диаметр ее внутренней полости – около 0,5 нм.

Фуллерены уже находят применение при производстве аккумуляторных батарей, изучаются возможности создания на их основе оптических затворов, устройств для записи информации и элементов солнечных батарей. Молекулы

$C_{60}$  пригодны также для применения их в качестве добавок при создании различных наноматериалов и присадок для ракетного топлива.

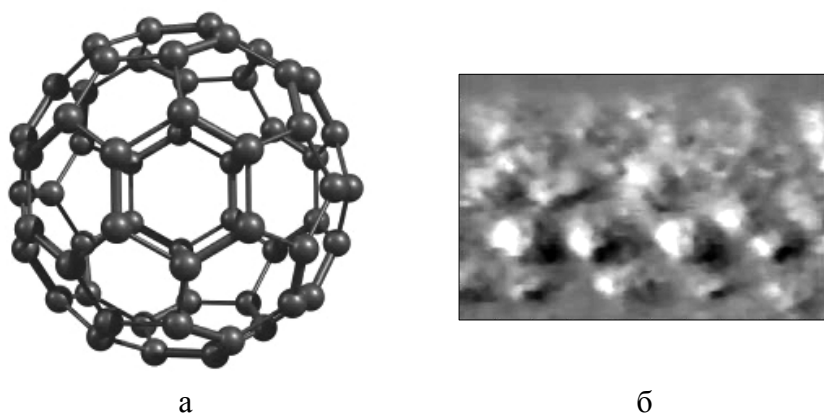


Рис. 3. Структура молекулы фуллерена  $C_{60}$  (а) и изображение молекул  $C_{60}$  на поверхности графита, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (б)

Углеродная нанотрубка (УНТ) является фактически свернутым в цилиндр диаметром 1–5 нм моноатомным слоем графита, который и называется графеном. На рис. 4а показано изображение фрагмента боковой поверхности УНТ, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа, а на рис. 4б – схематическое изображение торцевых частей трубки, которые закрыты полусферическими колпачками, похожими на половинку фуллерена.

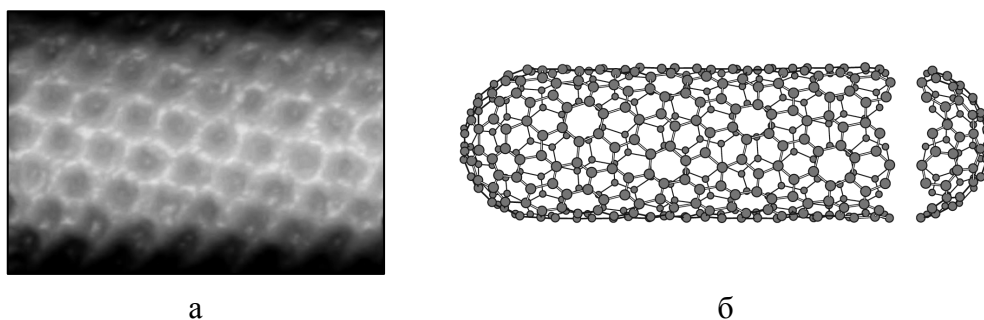


Рис. 4. Изображение УНТ, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (а) и схема торцевых участков УНТ (б)

Впервые УНТ были обнаружены в 1991 г. при высокотемпературном разрушении графитовых электродов зажигаемой между ними электрической дугой. Затем образование УНТ наблюдалось и в экспериментах по лазерному испарению графита, подобных тем, в которых были открыты фуллерены, а фуллерены, в свою очередь, были получены электродуговым методом.

Помимо однослойных (*single walled*) УНТ, существуют многослойные (*multiwalled*) трубки, которые представляют собой несколько вложенных друг в друга однослойных нанотрубок. Диаметр многослойных УНТ достигает 20–25 нм, а расстояние между слоями равно 0,34 нм, что соответствует расстоянию между атомами углерода в графите. Длина УНТ, полученных электродуговым методом и лазерным испарением графита, обычно не превышает

10–100 мкм. Разработанные позднее методы получения УНТ путем химического осаждения из паров углеводородов дают возможность получать значительно более длинные УНТ – до 2–3 см.

Нанотрубки обладают очень хорошими механическими характеристиками. Предел прочности однослойных УНТ по разным оценкам составляет от 50 до 150 ГПа, что в десятки раз выше прочности стали. Поскольку плотность УНТ достаточно низка ( $1,3\text{--}1,4\text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ), то удельная прочность материала, изготовленного из нанотрубок, достигает рекордных значений. Относительное удлинение УНТ до разрушения составляет 10–15%, т.е. они обладают и достаточно высокой пластичностью. Нанотрубкам также присущи уникальные электрические и тепловые свойства, связанные с особенностями их структуры.

Графен (*graphene*), как уже указывалось, представляет собой изолированный моноатомный слой графита, т.е. слой атомов углерода, размещенных в узлах гексагональной двумерной кристаллической решетки (рис. 5).

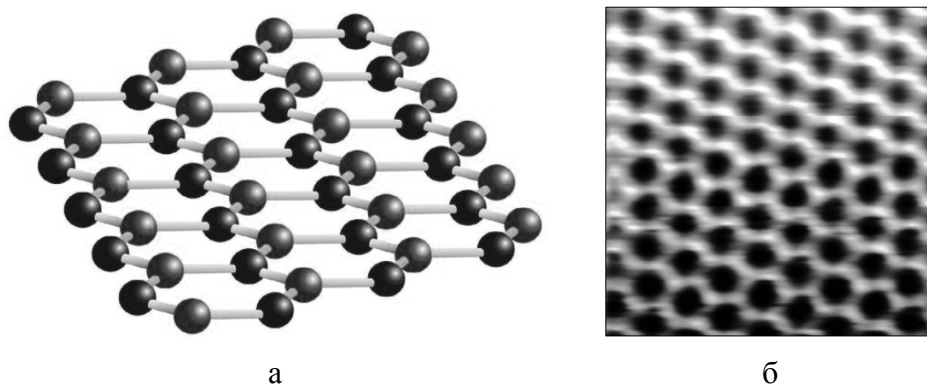
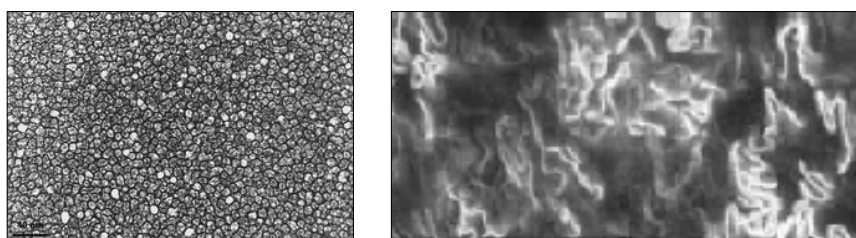


Рис. 5. Структура (а) и изображение (б) листа графена, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа

Свойства графена во многом уникальны. Он является одним из наиболее прочных материалов и обладает очень высоким коэффициентом теплопроводности при комнатной температуре – около  $5\cdot 10^3\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ , что почти в 15 раз выше по отношению к меди и в 1,5 раза превышает аналогичный показатель для УНТ. В настоящее время некоторые исследователи считают графен наиболее перспективным заменителем кремния в качестве полупроводникового материала для наноэлектроники.

С помощью нанотехнологий создаются уникальные композиционные материалы, разделяемые на два вида: нанокомпозиты и нано-нанокомпозиты. К первым относят композиты, в которых используются наноразмерные включения, но матрица не является наноструктурированной, а ко вторым – имеющие помимо нановключений наноструктурированную матрицу. На рис. 6 приведены полученные с помощью электронного микроскопа изображения образцов композитов, в одном из которых матрицей является сплав NiAl, а наполнителем служат зерна WC диаметром около 1 нм (а), в другом в качестве матрицы используется полистирол, а в качестве наполнителя – графеновые ленты (б).



а б

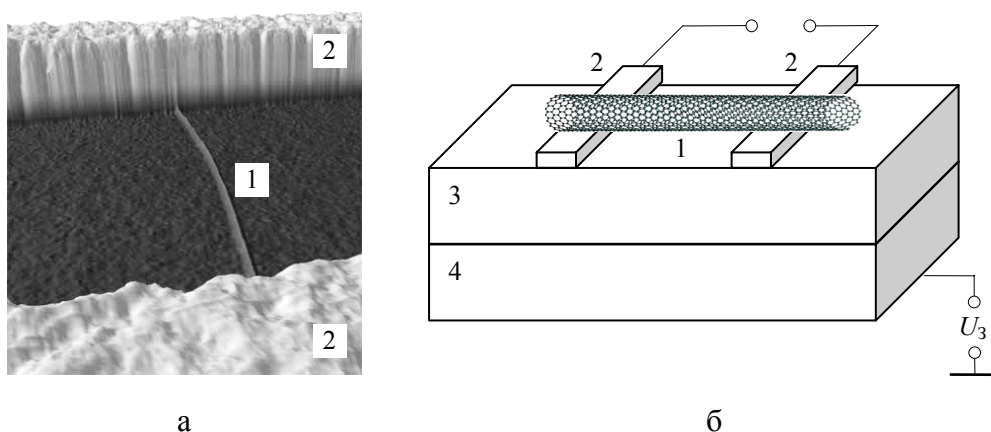
Рис. 6. Образцы нанокompозитов

Перспективным направлением является создание с помощью нанотехнологий материалов и систем, имитирующих биологические объекты и использующих принципы их функционирования (*biomimetic materials and bioinspired systems*). Такие материалы и системы могут строиться только на основе неорганических элементов или с применением биологических объектов, причем при их создании также могут реализовываться процессы самосборки.

### 3. Элементы наноэлектроники и наносенсоры

С использованием наноматериалов создаются уникальные элементы, активно внедряемые в настоящее время в электронику, вычислительную технику, измерительные системы и т.п. Такие элементы, безусловно, найдут широкое применение в бортовом оборудовании КА.

В качестве примера на рис. 7 показана конструкция транзистора на УНТ. Нанотрубка (1) помещается между двумя металлическими контактами (2), изолированными с помощью оксидного слоя  $\text{SiO}_2$  (3) от проводящей подложки  $\text{Si}$  (4), которая выполняет роль затвора как в обычном полевом транзисторе. Меняя напряжение на затворе  $U_3$  и, соответственно, воздействующее на УНТ поперечное электрическое поле, можно варьировать в широких пределах ток, протекающий через трубку. Такие транзисторы могут использоваться как в аналоговых, так и в цифровых схемах.



а б

Рис. 7. Изображение (а) и схема (б) полевого транзистора на УНТ

Нанотрубки, благодаря их высокой электро- и теплопроводности, можно использовать в качестве соединительных проводников в чипах с плотной упаковкой. Значительная удельная поверхность УНТ позволяет рассматривать их



как материал для создания сверхминиатюрных конденсаторов большой емкости (*суперконденсаторов*), которые можно применять не только при создании электронных устройств, но и в качестве накопительных элементов в системах электропитания КА.

При анализе путей развития элементной базы для построения бортовых систем будущих КА следует указать на важность развития двух очень перспективных направлений – *спинтроники* и *фотоники*. Спинтроника, в отличие от традиционной электроники, строящейся на регистрации зарядов, оперирует спином электрона и связанным с ним собственным магнитным моментом электрона, которые могут иметь лишь две возможных ориентации. Фотоника использует в качестве информации кванты света, что принципиально обеспечивает целый ряд преимуществ по сравнению с традиционной зарядовой электроникой в отношении быстродействия, помехоустойчивости, энергопотребления и тепловыделения.

Нанотехнологии и созданные с их помощью наноматериалы открывают совершенно новые возможности для разработки разнообразных сенсоров – датчиков для регистрации и определения параметров широкого круга физических объектов. Примечательно, что в большинстве своем наносенсоры отличаются от существующих датчиков не только своими малыми размерами, но и значительно лучшими характеристиками.

Для создания наносенсоров широко используются нанотрубки и наностержни в сочетании с органическими и неорганическими молекулами. Простейший датчик представляет собой УНТ с закрепленной на ее конце молекулой (рис. 8). Проводящую нанотрубку можно заставить совершать колебания в высокочастотном электромагнитном поле и при этом измерить ее собственную резонансную частоту, которая зависит от размеров трубки и, соответственно, от ее массы. Если произвести такое измерение до закрепления молекулы на конце трубки и после, то по разности резонансных частот можно определить массу молекулы.

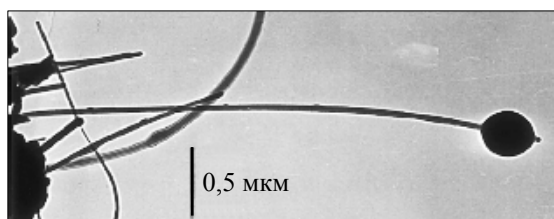


Рис. 8. Простейшие нановесы

Нанотехнологии позволяют создавать также высокочувствительные датчики механических воздействий, ускорений, электромагнитных полей. Особенностью описанных датчиков является наличие подвижных частей, что позволяет с их помощью получать электрический сигнал в ответ на механическое воздействие, и наоборот – механическую реакцию на электрическое воздействие. По этому признаку указанные датчики можно отнести к *нанозлектромеханическим системам*. На рис. 9 в качестве примера показана модель наномотора, представляющего собой две УНТ с закрепленными на их поверхности в

виде зубьев молекулами бензола. Вращение трубок происходит за счет электростатического взаимодействия между молекулами.

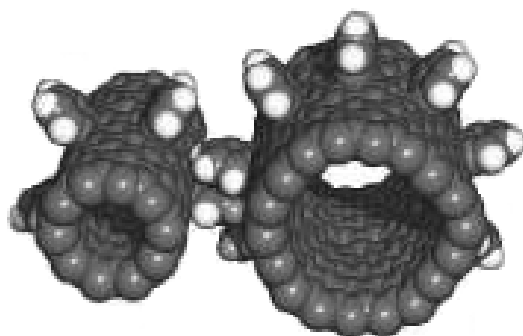


Рис. 9. Наномотор

Сочетание на одном чипе электронных и электромеханических нанорайств, включая устройства для управления потоками жидкости и газа, позволяет создавать весьма сложные функциональные системы, получившие название «лаборатория на чипе» (*lab-on-chip*). Результатом развития рассмотренных конструкторских идей является создание «КА на чипе».

#### **4. Применение нанотехнологий и наноматериалов в перспективных космических проектах**

Специалисты космической отрасли многих стран уделяют большое внимание анализу и прогнозированию разнообразных возможностей применения нанотехнологий и наноматериалов в космических системах. Обобщенный прогноз развития космических нанотехнологий представлен на рис. 10. На этом рисунке горизонтальная шкала отражает рост потенциальных возможностей космических систем на разных временных этапах, а движение вверх по вертикальной шкале показывает повышение уровня сложности и интеграции систем. Каждый новый шаг по шкале времени, приведенной в верхней части рисунка, предполагает появление более сложных нанообъектов, а также возникновение и развитие новых областей знаний и технологий или функций.

Как можно видеть из приведенной прогностической схемы, в ближайшие годы (до 5 лет) ожидается появление и даже начало практического применения нескольких классов наноматериалов. Прежде всего, речь идет о новых конструкционных материалах на основе наночастиц и нанотрубок, которые позволят резко снизить вес КА без ущерба для его прочности. Другим успешно развиваемым направлением является наноэлектроника с использованием УНТ и иных наноструктур. В дальнейшем планируется создание стойких к воздействию космической радиации молекулярных компьютеров и биокомпьютеров, реализация известного проекта строительства «космического лифта» на основе сверхпрочного троса протяженностью от земной поверхности до геостационарной орбиты, разработка биосенсоров, использующих эффект «молекулярного распознавания», создание сенсорных сетей для диагностики состояния среды в окрестности Земли и других планет, а также систем нанороботов, спо-



На рассматриваемом временном интервале до 2035 г. предполагается непрерывное совершенствование основных систем КА за счет применения нанотехнологий и наноматериалов. Это позволит уже в ближайшие годы использовать созвездия малых спутников для мониторинга Земли, околоземной космической среды и Солнца, а позднее – ввести в строй подобные созвездия для изучения дальнего космоса и построить космические телескопы с большой апертурой. Роботы, созданные с применением нанотехнологий и наноматериалов, будут играть важную роль при изучении Марса, а также Венеры и планет-гигантов Солнечной системы, в окрестности и на поверхности которых КА должны работать в экстремальных условиях. И конечно же, осуществление таких крупных космических проектов как строительство обитаемых баз на Луне и пилотируемый полет на Марс, немыслимо без нанотехнологий и наноматериалов, начиная от использования конструкционных и функциональных материалов с уникальными свойствами и заканчивая применением разнообразных устройств и систем, обеспечивающих диагностику состояния здоровья и жизнедеятельность космонавтов.

## **Заключение**

Для успешной реализации рассмотренных в докладе программ развития космических нанотехнологий и внедрения наноматериалов в космическую технику еще предстоит решить целый ряд сложных фундаментальных и прикладных задач, связанных с созданием новых уникальных наноматериалов с необходимыми для их применения в космической технике свойствами, а также с изучением поведения наноматериалов и изделий на их основе в условиях космического пространства. Для решения этих задач необходимо создать физико-математические модели, адекватно описывающие структурные особенности наноматериалов и механизмы воздействия факторов космического пространства различной природы на наноструктуры, разработать технологические и испытательные установки нового поколения для производства наноматериалов и исследования изменения их свойств в космической среде, подготовить и провести космические эксперименты по тестированию наноматериалов и изготовленных из них изделий.

## **Рекомендуемая литература**

1. Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. Нанотехнологии, 3-е изд. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
2. Л. Фостер. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.
3. И.П. Суздальев. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
4. Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. Наноструктурные материалы. Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2005 – 192 с.
5. Н.Г. Рамбиди. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
6. Л.С. Новиков. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006. – 120 с.