

Терминология и классификация

1. Введение

Растущую значимость нанотехнологий каждый человек чувствует по публикациям в научной или популярной литературе, по информации в Интернете и в средствах массовой информации. Подтверждением значения и роли НТ в развитии общества может служить ежегодный рост публикаций по этой проблематике, числа заявок на патенты, распределения финансирования на эти темы и т. п. В качестве еще одного аргумента можно привести интенсивно развивающиеся дискуссии по научным и политическим аспектам НТ, которые свидетельствуют о стремлении общественности приобщиться к исследовательской деятельности в этой области. Дискуссии происходят в региональных, национальных и международных масштабах, так что становится очевидным, что в этой проблеме мы, вероятно, имеем дело с техническими и экономическими процессами глобального масштаба, которые (по оценкам многих экспертов) могут перерасти в еще одну промышленную революцию.

Термин «промышленная революция», впервые сформулированный социальным реформатором Фридрихом Энгельсом, подразумевает в узком смысле этого слова индустриализацию Великобритании в период примерно между 1750 и 1850 гг., в результате чего возникло то, что сейчас называется промышленным капитализмом. Развитие техники (особенно в сфере механизации производства) за этот период привело к полному техническому, экономическому и общественному изменению социальной системы (König, 1992), конечным результатом чего стали огромные перемены в экономике, технике, социальной структуре, стиле жизни, политической системе и даже изменение общего ландшафта стран, вовлеченных в указанный процесс. Другими известными последствиями промышленной

революции стали более гуманные условия труда, устранение массовой бедности, ускорение технологических, экономических и социальных изменений, возрастание «аккумуляции» капитала и рост предложений на рынке труда. Некоторые аспекты этого процесса и сегодня представляются чрезвычайно актуальными, особенно с точки зрения дальнейших последствий технического и экономического развития.

Второй промышленной революцией часто называют внедрение автоматизации в промышленные процессы, которое произошло в начале 20-го века (König, 1992). Даже те, кто считает понятие «промышленная революция» давно утратившим свой первоначальный смысл, не могут отрицать, что автоматизация производства действительно привела к глобальным и до сих пор заметным переменам в существующем обществе. Третьей промышленной революцией некоторые социологи называют внедрение в производство процессоров, начавшееся с середины 20-го века. Такое сравнение ИТ с перечисленными выше промышленными преобразованиями, послужившими основой глобальных изменений во всех сферах жизни, еще глубже подчеркивает невероятный потенциал развития новых технологий.

Легко заметить, что любые дискуссии по проблеме ИТ в кругах экспертов (особенно при рассмотрении общественно-политических вопросов) отличаются удивительной широтой обсуждаемых тем и понятий. Почти всегда эти многочисленные обсуждения быстро переходят от рассмотрения каких-либо последних достижений в области ИТ к практическим возможностям их использования. Эксперты любят обсуждать глобальные применения, которые потенциально обещают охватить *все* сферы жизнедеятельности, а также потенциальные риски, связанные с техническими преобразованиями. Забавно, что связанные с ИТ серьезные ученые часто предлагают весьма смелые и фантастические проекты, в свете которых все измышления журналистов, писателей-фантастов и дилетантов представляются упрощенными и приземленными (образно говоря, наука сейчас обгоняет фантастику).

Серьезное знакомство с основами, стратегией развития и областями возможного применения ИТ сейчас приобретает особое значение по двум основным причинам. Во-первых, такое знакомство служит предпосылкой для компетентной оценки потенциала ИТ в области промышленного применения с технической и макроэкономической перспективы, а, во-вторых, оно необходи-

мо самым разным специалистам для оценки возможных изменений в различных сферах общественной жизни (например, в медицине, использовании природных ресурсов, образовании и т. п.).

Нанотехнология в последние годы стала очень популярна в академических кругах, а также в высших учебных заведениях, что можно объяснить неожиданно возникшей острой потребностью в квалифицированных кадрах. Наряду со специально созданными и дополнительными учебными курсами, спешно создаются новые учебники и программы обучения или совершенствования персонала. В высших учебных заведениях Германии и других развитых стран уже создан целый ряд новых учебных курсов и факультативных курсов лекций по различным направлениям НТ. Большинство новых учебных пособий пытается отобразить разнообразие идей НТ и различные научно-технические особенности отдельных областей НТ, от электроники до молекулярной медицины, однако для фундаментального понимания новой науки гораздо важнее знание междисциплинарных основ, объединяющих область исследований НТ, независимо от конкретного применения. В мировой науке наблюдается новое и очень интересное явление — проведение междисциплинарных исследований на основе срастающихся и взаимно дополняющих друг друга наук и технологий, в результате чего неожиданно появляются *новые* продукты и методы. Этот феномен даже получил специальное название слияния или *сходимости технологий*.

Выводы: При любой системе оценок и определений, следует признать, что нанотехнология (НТ) представляет собой чрезвычайно важное направление научно-технического развития вообще. Общественные дискуссии о НТ обычно проводятся людьми, не имеющими специальных знаний, а точный прогноз возможностей развития новой науки представляется проблематичным даже для экспертов. Нанотехнология системно связана с множеством научных дисциплин и уже существующих технологий, и эта специфика отражается как на процессе обучения, так и изучении структур и явлений на нанометрическом уровне.

2. Основы НТ

Зачастую НТ ошибочно и очень упрощенно связывают только с длиной и определяют ее через характерные или минимальные параметры (размеры) структуры, материала или компонентов системы. Столь же ошибочным представляется и распространенное мнение, что НТ возникла «сама собой» в рамках микроэлектроники вследствие естественного прогресса в технике миниатюризации. В многочисленных дискуссиях истинная значимость НТ обычно переоценивается или недооценивается, но в целом сейчас почти никто не сомневается в том, что новые технологии представляют огромную важность для развития науки, техники и общества.

2.1. Что такое нанотехнология?

Для начала следует сразу подчеркнуть, что термин «технология» в рассматриваемом случае следует воспринимать в значении «техника», а не относить его лишь к некоторым техническим *процедурам*. Префикс *нано-* является заимствованием из греческого языка, где *nanos* означает «карлик». Подобно аналогичным префиксам, заимствованным из греческого или латыни, частица «нано» применяется для обозначения определенной доли (фракции) физических величин. В данном случае речь идет об одной миллиардной части ($10^{-9} = 0,000\,000\,001$) какой-либо величины, что позволяет вводить, например, нанолитр ($= 10^{-9}$ литра), наносекунду (1 нс) или нанометр (1 нм = одной миллиардной метра, одной миллионной миллиметра или одной тысячной микрометра). Введение таких дополнительных мер длины играет особую роль для определения НТ, однако я повторю, что НТ нельзя упрощенно связывать лишь с масштабами объектов.

Читатель может оценить сложность проблемы, если вспомнит (этот вопрос подробно рассматривается в главе 4), что для достаточно малых систем функциональные свойства материалов или их отдельных компонентов начинают зависеть от размеров объектов. Речь идет о том, что основные характеристики вещества как целого, обычно рассматриваемые в качестве постоянных (например, твердость, электрическая проводимость, цвет или химическая активность мелких частиц) для любого заданного материала, начинают зависеть от размера частиц. Этот

эффект нельзя наблюдать в объемных материалах или у более крупных частиц: стальная булавочная головка имеет те же основные физические свойства (серебристый блеск, твердость, электропроводность и точку плавления), как и слиток стали того же сорта весом в 1 тонну. Обычно физико-химические свойства веществ не связаны с их размерами, но ситуация принципиально изменяется при переходе к нанообъектам и нановеществам. Например, миниатюрные полупроводниковые компоненты меньше некоторой критической величины ведут себя совсем не так, как их более крупные аналоги, так как электрические токи в таких объектах могут протекать только в некоторых изолированных областях, а значения тока могут возрастать при росте напряжения ступенчато, а не непрерывно. В таких системах характерное измерение размеров оказывает непосредственное влияние на функциональность компонентов и их свойства. Поэтому представляется целесообразным дать следующее определение:

Специфические функциональные параметры в НТ достигаются путем связи между соответствующими свойствами и уменьшением характерных структурных размеров в тех случаях, когда размеры объектов (по крайней мере, в двух измерениях) не превышают значения 100 нм.

Этого кажущегося несколько абстрактным определения (формулы), с одной стороны, вполне достаточно, чтобы упорядочить представления о различных областях применения НТ. С другой стороны, оно исключает некоторые области применения инновационного характера, которые «незаконно» причисляются к НТ. Особое значение имеет установление нанообласти в интервале 1–100 нм, так как именно в этой области размеров проявляется большинство абсолютно новых свойств любых объектов. Ниже этого предела находятся отдельные атомы или молекулы, а выше — микротехнологии. Путем ограничения в приведенном определении на *два* нанометровых измерения исключается возможность, что продуктом НТ назовут, например, просто очень тонкий слой на поверхности (толщиной несколько нм), хотя структурные компоненты этого слоя при соответствующих параметрах, несомненно, будут являться нанокompонентами системы.

В соответствии с приведенным выше определением, НТ не является чем-то абсолютно новым, поскольку частицы с нанометрическими параметрами известны очень давно (например, именно такими частицами давно занимаются специалисты по

коллоидной химии). Более точные и научно строгие определения, особенно в вопросах нанотехнологического синтеза, требуют возможности обращения и доступа ко всем компонентам нанобъекта. Говоря о так называемых молекулярных НТ, следовало бы рассматривать развитие по принципу «снизу – вверх», при котором наноструктуры целенаправленно создавались бы из отдельных атомов или молекул, как это показано в качестве примера на рис. 2.1.

Отдавая должное существующей ситуации и перспективам дальнейшего развития методов изготовления наноструктур, было бы целесообразно оставить приведенную формулу (определение) без изменений и просто констатировать, что принципом, объединяющим различные нанотехнологии, выступает целенаправленное использование приведенного выше ограничения свойств объектов.

Как показано на рис. 2.2, наноструктуры можно производить как с помощью методик типа *сверху – вниз* (основной принцип которых состоит в постепенном уменьшении размеров от макро- через микро- до нанобласти), так и посредством мето-

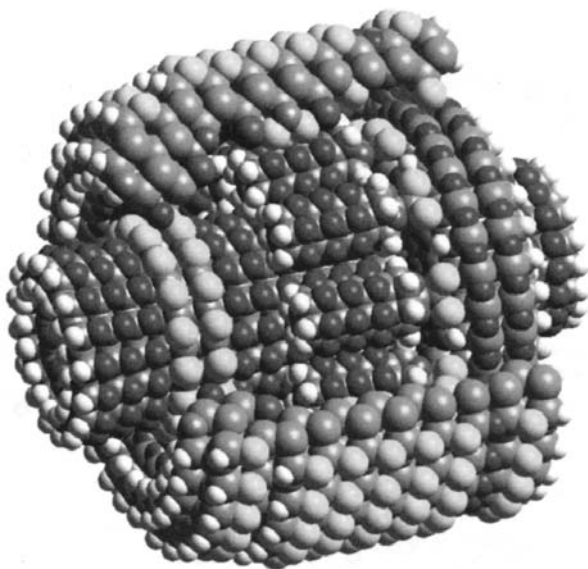


Рис. 2.1. Наноконпоненты и структуры, собранные из отдельных атомов (Институт молекулярного производства, Лос-Альтос)

дик типа *снизу – вверх*, основой которых служит атомарный или молекулярный синтез все более крупных и усложняющихся структур. Используя новейшие методы супрамолекулярной химии или генных технологий, уже сейчас удается синтезировать структуры величиной в нанометры, однако вплоть до настоящего времени представлялось невозможным производить их в массовом количестве, то есть создавать в пробирке большое число одинаковых наноразмерных «объектов» (например, типа показанной на рис. 2.1 структуры), обладающих одинаковой, точно заданной функциональностью. С другой стороны, подобное «производство» не только не противоречит законам природы, но и реально осуществляется в биологических системах, где постоянно синтезируются в больших количествах сложнейшие «наномашин», функциональность которых обусловлена параметрами и размерами, приведенными в определении.

В качестве типичного примера действия биологических механизмов можно рассмотреть размножение вирусов, протекающее в природе подобно отлично отлаженному массовому производству, действующее совершенно безошибочно и, естественно, без вмешательства человека. Как правило, вирусы состоят из тысяч протеиновых соединений, которые многократно реагируют друг с другом под действием межмолекулярных сил в

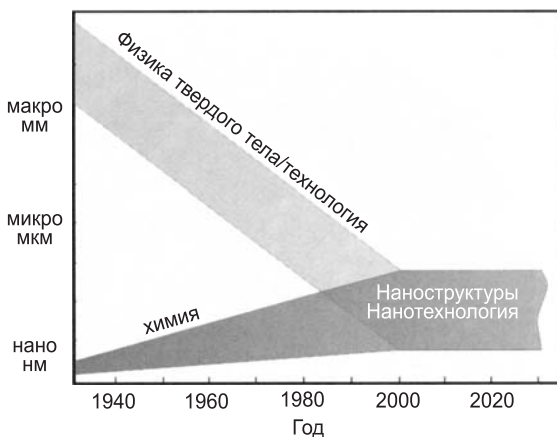


Рис. 2.2. Характерные размеры объектов, создаваемых с помощью методик, обозначаемых «сверху – вниз» (top-down) и «снизу – вверх» (bottom-up). Область перекрытия методик соответствует типичным размерам синтеза и функционирования биологических наноструктур

неравновесных термодинамических условиях. При ошибках в процессе «сборки», как правило, начинают действовать какие-то биологические процессы «самоизлечения» или «исправления». Известно множество примеров биологических машин на межклеточном уровне с удивительными свойствами и поразительной функциональностью, и именно к этой области биологии примыкает большой раздел НТ, называемый нанобиотехнологией и представляющий собой промежуточную дисциплину на границе между собственно НТ и биотехнологией.

Выводы: В НТ взаимосвязь между структурными размерами и функциональностью целенаправленно используется для получения материалов и компонентов с новыми характеристиками. Наноструктуры могут создаваться методиками сверху – вниз и снизу – вверх. Принципиальная цель НТ состоит в создании и применении стратегий, напоминающих те, которые существуют и действуют в природе, что придает НТ особое значение.

2.2. История развития НТ

Тот факт, что достаточно мелкие частицы различных веществ обладают свойствами, зачастую совершенно не похожими на свойства этих веществ в объемной фазе, был известен (во всяком случае, эмпирически) ученым и технологам очень давно. Известно, что еще древние римляне применяли сверхмалые частицы золота или серебра и золота для того, чтобы придавать бочалам и другим стеклянным изделиям особо характерную окраску (например, таким способом изготавливались знаменитые римские рубиновые кубки, один из которых показан на рис. 2.3). Не вдаваясь в детали производства, отметим, что эффект достигался введением в материал наночастиц благородного металла, что и придавало стеклу необычные оптические свойства. Стоит подчеркнуть (исходя из приведенного выше определения НТ), что в данном случае мы не можем говорить о НТ в строгом смысле этого понятия, поскольку процесс осуществлялся древними стеклодувами неосознанно, без четкого представления о реальных связях между величиной частиц и эффектом рассеивания света. Можно привести много других примеров такого практического использования наносистем, не основанного на строгих определениях и знаниях. Например,

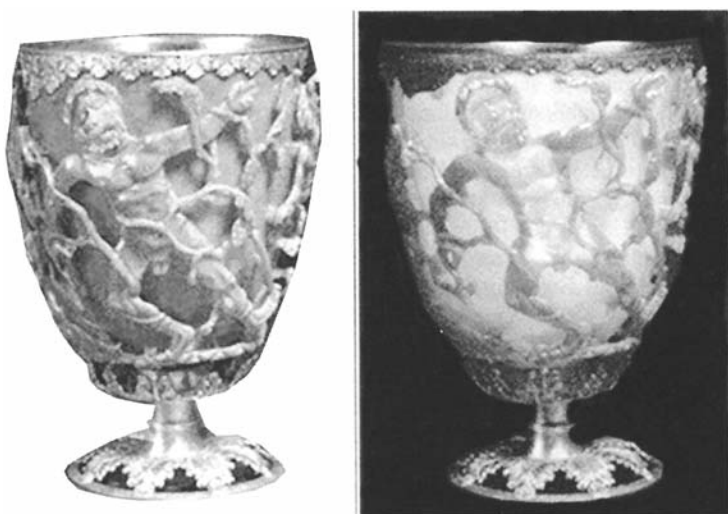


Рис. 2.3. Кубок Ликурга (4 век, Национальный Британский исторический музей). Бокал, на который нанесены частицы размером в 70 нм (содержащие семь частей серебра и три части золота), кажется зеленым в отраженном свете и красным при подсветке сзади

коллоидные суспензии, т. е. системы с частицами меньше микрометра в жидкой среде, известны уже десятки лет, не говоря уже о многих фармацевтических препаратах, в которых наночастицы выступают носителями лекарственных препаратов, и т. д.

Строго говоря, истинным предвестником и основателем НТ сегодня следует считать знаменитого американского физика и лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана, который достаточно подробно рассмотрел последствия безграничной миниатюризации с позиций теоретической физики в своем известном выступлении перед американским физическим обществом в декабре 1959 г. (Feynman, 1959). Фейнман с очень общей точки зрения проанализировал возможности изменения масштабов электромеханических приборов, электрических схем и проблему записи, сжатия и сохранения информации. Идеи Фейнмана казались слушателям фантастическими, поскольку практическая реализация предлагаемых им устройств и механизмов считалась проблемой далекого будущего или вообще невозможной. Сегодня мы убеждаемся, что идеи великого физика оказались

вполне реалистичными, а многие из них уже воплощены в математических расчетах и практических применениях.

При этом сам Фейнман не пользовался термином «нанотехнология», поскольку это понятие было введено в обиход позднее (1974) японцем Норио Танигучи. Долгое время термин не получал широкого распространения среди специалистов, работавших в связанных областях, так как Танигучи использовал понятие нано- только для обозначения точности обработки поверхностей, например, в технологиях, позволяющих контролировать шероховатости поверхности материалов на уровне меньше микрометра и т. п.

Очень важным моментом в истории НТ стало изобретение растрового туннельного микроскопа в конце 1981 года, так как этот прибор впервые позволил получить изображения отдельных атомов, а не их упорядоченных скоплений. Нобелевскую премию в области физики за изобретение этого ценного прибора получили Герд Бинниг и Гейнрих Рорер из исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Рюшликоне. Важность их открытия заключается в том, что оно затем привело к созданию целой серии приборов, позволяющих анализировать поведение вещества на молекулярном и атомном уровне, а еще позднее на этой основе реализовались возможности управления поведением атомов и молекул (подробнее об этом рассказывается в главе 5). С другой стороны, простота и удобство этих приборов привели к их очень быстрому распространению, так что сегодня невозможно себе представить исследования, разработки и производство в НТ без атомарных микроскопов, ставших стандартным оборудованием многих лабораторий. Можно было бы привести еще несколько важных дат в истории НТ, однако необходимо подчеркнуть, что эта история сложилась из множества параллельно протекавших и непрерывных разработок в различных областях науки и техники. В частности, НТ возникла из сочетания множества технологий, связанных с микроскопическими исследованиями и анализом состояния поверхностей различных веществ в микроэлектронике. В основу НТ столь же органично вошли аналитические и методические разработки супрамолекулярной химии и биохимии вообще. Развитие НТ подразумевает также невероятный рост возможностей теоретического моделирования вообще (и наносистем, в частности), благодаря невиданному росту вычислительной мощности компьютеров, связанному с возможностями удивительной миниатюризации. С другой стороны,

НТ предполагает целенаправленное и междисциплинарное использование множества новейших математических методов для описания, использования или изготовления нанометрических систем.

Выводы: Независимо от оценки исторических корней развития, НТ базируется, в сущности, на ряде весьма важных научно-технических достижений в различных дисциплинах, а физико-математическая основа НТ является принципиально междисциплинарной.

2.3. Современное состояние рынка нанотехнологий

Не вызывает сомнений, что развитие НТ со временем приведет к существенным изменениям во многих отраслях промышленности. Для оценки современного состояния этих технологий и связанного с ними рынка можно рассмотреть ряд конкретных технико-экономических показателей (рост числа заявок на патенты, количество создаваемых инновационных фирм и их промышленная активность, число доступных или находящихся в разработке продуктов, объем фактического товарооборота и т. д.). Точная оценка, даже на основании этих показателей, представляется сложной, потому что во многих случаях нанотехнологические компоненты в конкретных разработках или продуктах используются лишь частично, вследствие чего их доля не указывается в статистических данных отдельно. Кроме того, существует много противоречий и разных точек зрения относительно методик правильной оценки существующих экономических показателей рынка и построения прогнозов. В табл. 2.1 приводятся данные одного из самых тщательно составленных статистических обзоров (Luther, 2003).

Следует отметить, что разброс данных относительно объемов производства очень велик, и в других работах читатель может увидеть существенно иные показатели. По тем же причинам очень трудно конкретно подсчитать реальное число рабочих мест в различных отраслях НТ. Достаточно точные и подробные статистические данные относительно роста числа заявок на патенты, а также финансирования исследований по НТ в разных странах (особенно в Северной Америке, Европе и Японии) приводятся в работе (Jopp, 2003). В любом случае, даже с учетом противоречий и неточностей, можно утверждать, что, хотя НТ сейчас еще не достигла экономического уровня и зна-

Таблица 2.1

Обзор рыночных цифр и прогнозов по НТ (Luther, 2003)

Объем продаж на мировом рынке (год)	Вид продукта	Источник информации
493 млн долларов США (2000) 900 млн долларов США (2005)	Неорганические наночастицы и порошки (SiO ₂ , TiO ₂ , металлы и т. д.)	BCC (2002) ¹
40 млрд долларов США (2002)	Синтетические наночастицы как полуфабрикаты	BASF (2002) ²
23 млрд долларов США (2003) 73 млрд долларов США (2003)	Наноматериалы Инструменты; компоненты нанобиотехнологии	Deutsche Bank (2003) ³
54 млрд евро (2001) 100 млрд евро (2005)	НТ продукты (по убывающей): наноматериалы, нанослои, наноаналитические препараты, сверхточная обработка поверхностей, латеральные наноструктуры	VDI, ⁴ DG Bank (2001) ⁵
66 млрд долларов США (2005) 148 млрд долларов США (2003)	НТ продукты	Mitsubishi Research Institute (2002) ⁶
до 200 млрд евро (2005)	НТ продукты	Sal. Oppenheim (2001) ⁷
225 млрд долларов США (2005) 700 млрд долларов США (2008)	НТ продукты	NanoBusiness Alliance (2001) ⁸
1 триллион долларов США (2015)	НТ продукты вообще	NSF (2001) ⁸

- 1) Rittner M. (2002) «Анализ рынка наноструктурных материалов», American Ceramic Society Bulletin, том 81, № 3.
- 2) Diestler D. (2002) «Наночастицы в мегатоннах», пресс-релиз АО BASF от 28.10.2002.
- 3) Deutsche Bank (Немецкий банк) «Рынок НТ и отчет компании 2003».
- 4) www.nanonet.de
- 5) DG/WZ Bank (2001) «В фокусе: НТ в химии».
- 6) Kamel S. (2002) «Частное НТ-предпринимательство по японской модели».
- 7) Sal. Oppenheim (2001) «Техника микросистем и НТ — ключевые технологии для Германии».
- 8) RedHerring (2001) «Биотек-бум: взгляд отсюда», статья в Интернете от 02.11.2001 (www.redherring.com/Insider/2001/1102/580020458.html).

чимости крупных отраслей (типа микроэлектроники или сталелитейной промышленности), однако в ряде отраслей она уже играет существенную роль в формировании рынка товаров и рабочей силы. Особое значение эти прогнозы имеют в свете стремительных темпов роста НТ, вследствие чего уже в ближайшее десятилетие НТ может стать важным элементом национальной экономики во многих странах. Циклы развития высоких технологий приблизительно соответствуют этому временному отрезку, поэтому серьезные, стратегические решения на правительственном уровне по многим вопросам необходимо принимать уже сейчас (Beckmann, 2002).

Выводы: НТ имеет очень высокую значимость для развития науки и общества вообще, как в силу разнообразия своих применений и междисциплинарного характера, так и просто вследствие бурной динамики количественного и качественного развития. Поэтому уже сейчас представляется необходимым определить стратегии технологического и экономического развития НТ на разных уровнях. В настоящий момент трудно оценить реальное положение и значимость НТ на основании стандартных показателей, так как в литературе отсутствуют надежные статистические данные. Кроме этого, в настоящее время НТ зачастую используются в сочетании с обычными технологиями, внося лишь частичный и трудно учитываемый вклад в создаваемые товары.