

**ПРОБЛЕМА ТЕХНОНАУКИ –
СВЯЗЬ НАУКИ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ***
(методологические проблемы нанотехнологии)

В.Г. ГОРОХОВ

1. Проблема определения предмета исследования

Действительно, что такое нанотехнология? Уже в самом ее названии заложено противоречие. Это — технология, а где же наука? Но нанотехнология объединяет ведущих ученых самых различных областей от физики и химии до биологии и медицины. Поэтому методы ее исследования и связанное с ними экспериментальное оборудование приходят отовсюду, а объект исследования определен лишь приблизительно как область явлений, расположенных между микромиром и макромиром.

Вот, например, одно их определений нанонауки и нанотехнологии. «Нанотехнология объединяет в себе все возникающие приложения нано наук. Нано науки имеют дело с функциональными системами, которые базируются либо на использовании подсистем со специфическими зависящими от их размеров свойствами или отдельных или комбинированных функциональных подсистем»¹.

Такое определение является тавтологией. Но, кроме того, оно не отражает самой сути нанотехнологии как новой технонауки, где невозможно в принципе отделить научное исследование от разработки технологии и проектирования. Например, при исследованиях, проводимых с помощью туннельного микроскопа одновременно создаются новые структуры. Это легко увидеть во многих рассуждениях в области нанотехнологии: «*Конструирование* эпитаксиальных структур «германий-кремний» с квантовыми точками стало возможным *после изучения* начальных стадий осаждения германия на атомно-чистую поверхность кремния методом *сканирующей туннельной микроскопии* в сверхвысоком вакууме. *Управлять* плотностью и размером островков германия можно,

*Статья подготовлена в рамках проекта РГНФ «Философские проблемы нанонауки: синергичная конвергенция информатики и нанотехнологий» № 08-03-00241а.

если германий *растет* на поверхности кремния со слоем оксида толщиной в несколько атомных слоев непосредственно *в установке молекулярно-лучевой эпитаксии*» (курсив мой — В.Г.)². Иногда прямо дается, например, графическое представление проектирования супрамолекулы³.

Как отмечается во многих работах, никакого общепризнанного определения нанотехнологии просто не существует. Дается, например, следующее ее прагматическое определение:

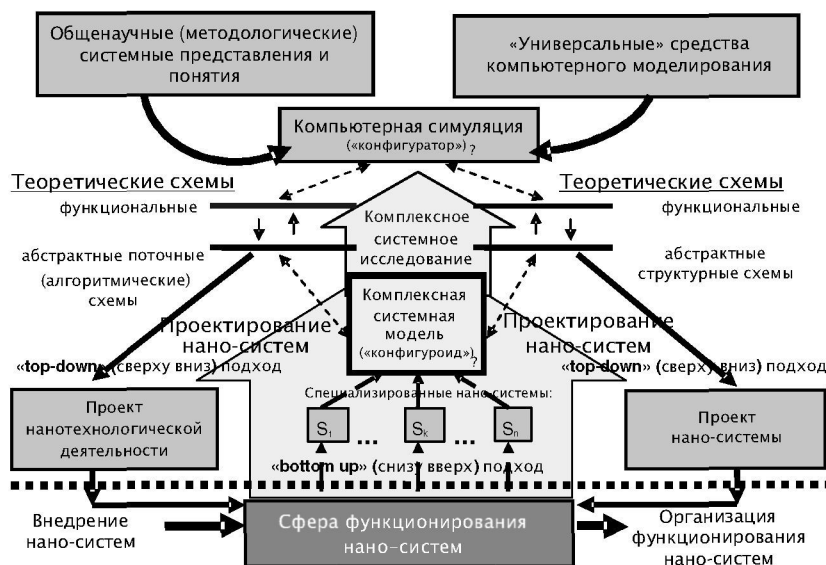
«1. Нанотехнологией называется область технологии, имеющая дело со структурами, по крайней мере, одно из измерений которых имеет размеры менее 100 нанометров.

2. Нанотехнология использует характерные эффекты и феномены, которые находятся в промежуточной области между атомарной и мезо областями.

3. Нанотехнология обозначает целенаправленное создание и/или манипулирование отдельными микроструктурами».

В нанотехнологии можно выделить две основные стратегии (*см. схему*). С одной стороны, существует так называемый *top-down* (сверху вниз) подход, «доминирующий главным образом в физике и физической технике. В данном слу-

Нанонаука и нанотехнология как технаука



чае, исходя из микротехники, рассматриваются все более и более миниатюрные компоненты и структуры. С другой стороны, имеется *bottom up* (снизу вверх) подход, который направлен на целевое создание все более сложных систем из атомарных или молекулярных элементов. Этот подход до сих пор больше представлен химией и биологией, в которых обращение с объектами нанометрической величины уже давно является обычным делом». При этом исследователи утверждают, что главным видением нанотехнологии с самого начала была целенаправленная манипуляция материей на атомарном уровне⁴. Как видно из схемы, нанонаука вынуждена ориентироваться, с одной стороны, на общие методологические системные представления, поскольку не существует единой теории для всех участвующих в нанотехнологической деятельности научных дисциплин, и для соотнесения частных теоретических схем необходимо обращаться непосредственно к общенаучной картине мира. С другой стороны, ее теоретические модели всегда опосредуются «универсальными» (но проблемно-ориентированными) средствами имитационного компьютерного моделирования, где уже «защита» определенная математическая схема для представления объекта исследования.

Теоретические схемы нанонауки, кроме того, всегда соединяют в себе не только отображение хода естественного процесса в наноструктурах (абстрактные структурные схемы), но и описывают алгоритмы конструирования таких наноструктур (абстрактные поточные — алгоритмические — схемы). Именно поэтому нанонаука и нанотехнология практически неразличимы и неразъединимы и составляют единую технонауку. «Нанотехнология является понятием, объединяющим целую палитру технологий, которые общим имеют прежде всего то, что все они связаны со структурами и процессами нанометрической шкалы. Один нанометр — одна миллиардная часть метра (10^{-9} м) и обозначает ту пограничную область, в которой материальные взаимодействия не могут быть более описаны законами классической физики, а все большую роль начинают играть квантово-механические эффекты. Ведущее представление нанотехнологии как целенаправленной манипуляции материей на ато-

марном уровне было сформулировано еще в 1959 г. американским физиком, нобелевским лауреатом Ричардом Фейнманом. В 1981 г. Герд Карл Биниг (G. Bining) и Генрих Рорер (H. Rohrer) сконструировали первый зондовый микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), при помощи которого удалось *визуализовать атомы* (курсив мой. — В.Г.). С помощью зонда этого прибора можно определить модуляцию электронной плотности, энергии связей атомов и наблюдать каждый атом по отдельности и в заданных точках. Родился новый физический метод — сканирующая зондовая микроскопия, а вместе с ней и технологический прием локального воздействия на поверхность (электрического, магнитного, механического и т.д.) с точностью ориентации до отдельных атомов. Его относят сейчас к основным методам нанотехнологии. В 1990 г. научным сотрудникам фирмы IBM впервые удалось реализовать это видение, а именно «написать» с помощью 35-ти отдельных атомов на никелевой монокристаллической поверхности лого своей фирмы⁵. Научное исследование в данном случае всегда сопровождается компьютерной симуляцией и то, что мы видим на экране дисплея, уже опосредовано определенной теорией, на основе которой построена данная приборная ситуация, и ее математическими представлениями, содержащимися в программе имитационного моделирования.

Такое представление в принципе аналогично визуализации электромагнитных волн, нарисованных Вильямом Гильбертом, Фараде-ем или Герцем, которые не видели и не могли видеть самих электромагнитных волн, а лишь их влияние на другие магниты и металлы, металлические опилки или искорки в резонаторе. Проблему визуализации электромагнитных колебаний впервые удалось решить лишь Фердинанду Брауну, хотевший с помощью своей электроннолучевой трубки сделать видимым потребителям переменный ток, которым снабжался город Страсбург. Изображение кривой тока было видно непосредственно на флуоресцирующем экране. Луч следовал непосредственно за изменениями электрического тока и Браун смог сфотографировать картину колебаний и опубликовать ее. Стало возможно представлять переменные токи графически, измерять их и геометрически конструировать, как это показано на экране современного осциллографа в виде осциллограммы. Чертежи Г. Герца, сделанные им на основе наблюдения в темном помещении через микроскоп искры в небольшом искровом промежутке⁶, и то, что увидел Браун на экране сконструированной им трубки⁷, поразительно схожи.

В принципе такого рода визуализация лежит в основе всей классической науки Нового времени, хотя методологические принципы ее были разработаны еще Леонардо да Винчи. Природный объект отображается сначала в виде физической или визуальной модели, которыми может быть скульптура, картина, макет и эскиз дома и т.п., затем эта модель преобразуется в визуальный образ в соответствии с законами перспективы и, наконец, в геометрическую схему или фигуру. И лишь последнее, важное для математизированной науки преобразование геометрической схемы в алгебраическую формулу не рассматривается Леонардо да Винчи вообще. Эту проблему решил в своей начертательной геометрии Декарт⁸. С методологической точки зрения визуализация в нанотехнологии ничем не отличается, например, от способа визуализации в виде механической модели электромагнитных уравнений Максвелла Больцманом или изображения в теоретической радиотехнике блока радиосхемы с помощью стандартных элементов. Реализация последней в виде интегральной схемы ничего общего не имеет с этим изображением, однако монолитную или твердотельную схему, которая в действительности изготавливается как единый блок с помощью планарной технологии, можно теоретически представить как электронную схему (четырёхполюсник), состоящую, например, из резисторов, конденсаторов (двухполюсников). Точно также и в нанотехнологии структура переключателя, выполненного с помощью одного электрона и призванного осуществить функции (нано)транзистора, может быть описана с помощью эквивалентной цепи⁹.

Таким образом, как и в любой технической теории и нанотехнологии строятся теоретические схемы замещения, позволяющие производить различные вычисления и конструировать структурные схемы наносистем. Входящие в них конструктивные блоки, однако, могут иметь различную физическую основу. «Вокруг» каждого такого блока группируются особые теоретические знания. Другими словами, эти блоки сами представляют собой различные частные теоретические схемы, являющиеся, в свою очередь, обобщением «конструктивных» схем конкретных наносистем.

2. Предвидимые и непредвидимые приложения

В сущности, признание нанотехнологии покоится на зыбкой основе широко пропагандируемых средствами массовой информации обещаний получения в ближайшем будущем удивительных практических результатов прежде всего новых, заранее заданных, свойств на поверхности различных материалов. Например, при напылении на ветровое стекло автомобиля тонкого слоя наночастиц больше не понадобятся раздражающие водителя щетки, а вода будет незаметно исчезать, оставляя обзор свободным. Предполагается, что таким образом могут быть получены поверхности, состоящие из невидимых невооруженным глазом наночастиц, которые смогут создать солнцезащитные или антирефлекторные слои или же самовоспроизводящиеся лакокрасочные покрытия. Ожидаются результаты применения нанотехнологии в энергетике (для транспортировки и аккумуляирования электрической энергии) с использованием эффектов сверхпроводимости, а также в области хранения и переработки информации. Аналогичные по своей убедительности обещания относятся к сфере медицинской техники и фармакологии, ну и, конечно, оборонной и аэрокосмической промышленности. И хотя точного предсказания здесь достичь невозможно, а действительно практически применимые результаты весьма эфемерны, это направление процветает и приоритетно финансируется. Мы отнюдь не хотим умалить его научного и прикладного значения, а лишь отметим, что для успешного развития и финансирования новых научных направлений сегодня отнюдь недостаточно заключений только одних экспертов.

Результаты экспертной оценки, проведенной германскими учеными, дают некоторое представление о сегодняшнем состоянии и перспективах нанотехнологии. Например, молекулярная электроника, раннее распознавание раковых заболеваний на молекулярном уровне и лакокрасочные покрытия, способные менять цвет в зависимости от окружающей среды, отнесены экспертами к долгосрочной перспективе. Создание же противоотражательных слоев, наномембран и наночастиц для автомобильных покрышек оценены готовыми к выпуску на рынок; на стадии технической реа-

лизации и создания прототипа находятся, например, аккумуляция водорода на уровне наноструктур, а на фазе применения и инноваций — рентгеновская оптика¹⁰.

Современной философии науки и техники необходимо специально исследовать на образцовых примерах и выявить механизмы, позволяющие облегчить диффузию научных знаний в социальную и экономическую сферы и коммуникацию науки и общества, повысить шансы переводимости и совместимости постановок проблем в области науки и техники. Одним из таких характерных примеров и является нанотехнология, занимающая центральное, ключевое место в современной науке и технике, интегрирующей в себе достижения физики, биологии и химии и многих других областей знания. Общей тенденцией развития этого по сути дела междисциплинарного исследования является ее консолидация в интегрированную научно-техническую дисциплину, основанную на использовании биологических принципов, физических законов и химических свойств для создания различных приборов¹¹. Раздельное поступательное развитие физики (электротехника — электроника — микроэлектроника — проектирование материалов — квантовые эффекты), биологии (биология клетки — молекулярная биология — функциональное проектирование молекул) и химии (комплексная химия — сверхмолекулярная химия) в перспективе должно слиться в интегрированное использование биологических принципов, физических законов и химических свойств.

Приложение нанотехнологии сегодня отмечено развитием электронных приборов, фотонных элементов, сенсоров и биочипов¹². Таким образом, «нанонаука представляет собой область пересечения таких дисциплин, как физика, химия, биология, материаловедение и технические науки. Она охватывает исследовательскую область нескольких естественнонаучных и научно-технических дисциплин и может быть охарактеризована как выходящая за дисциплинарные границы». Это отчасти объясняется предметом исследования нанотехнологии: «На атомарном и молекулярном уровне почти невозможно различить физические, химические и биологические свойства»¹³.

Для теоретических исследований в области нанотехнологии вполне релевантно утверждение структуралистской концепции науки о том, что всякая теория состоит из ядра и множества предполагаемых приложений. Эта взаимосвязанная пара включает в себя как подтвержденные, или актуальные, так и возможные, или *потенциальные* приложения. Причем эти приложения, как актуальные, так и потенциальные, существенно определяют расширенное ядро теории и включают в себя множество *всех возможных моделей*, удовлетворяющих некоторым специальным законам и условиям, и множество *ограничений*, которые исключают некоторые комбинации компонентов в различных потенциальных моделях. Именно частные потенциальные модели и обозначаются в структуралистской концепции науки как предполагаемые приложения теории. Между различными предполагаемыми приложениями устанавливаются связи, которые налагают ограничения на теоретические функции. Это значит, что теоретические функции, которые используются в различных приложениях теории, не являются независимыми друг от друга, а, напротив, между их значениями существуют вполне определенные отношения.

Таким образом, понятие теории в своем первоначальном стандартном значении выступает теперь в качестве базисного элемента теории и расширяется через особые *операции специализации*, образуя целостную *теоретическую сеть*. Целостную теорию вместе со всеми лежащими в ее основе специальными законами можно представить как *иерархическую структуру*, состоящую из теорий-элементов, вершину которой занимает базисный элемент (комплексная системная модель — «конфигуриод»), в то время как остальные элементы подстраиваются рядом в результате процесса специализации. В этой теоретической сети речь идет о совокупности теорий-элементов, которые частично упорядочиваются через отношения специализации. Мы говорим о совершенствовании данной теоретической сети, если в нее вводятся дополнительные операции специализации¹⁴. В структуралистской концепции вводится также понятие фрейма теорий, объединяющих целые группы теорий, которые построены по единому парадигматическому образцу. Например, простая

равновесная термодинамика является таким образом для термодинамики в целом как семейства, или фрейма термодинамических теорий. Все теории, входящие в фрейм, имеют семейные сходства, отличающих от других таких семейств физики. Они часто представлены в одной книге, и студенты изучают их совместно как единое целое. При этом, как подчеркивает Мулинес, исследование эволюции фрейма теорий должно включать в себя не только эволюцию единичных теорий и их взаимосвязей, но и их операциональных аспектов¹⁵. В нанотехнологии ситуация еще более усложняется, так как в фрейм составляющих ее теорий входят теории, часто ранее казавшиеся несовместимыми и построенные в соответствии с различными нормами и идеалами научного исследования.

3. О так называемых конвергентных технологиях

Проблема исследования научно-технического развития и инновационной политики имеет большую актуальность для современной методологии науки, поскольку рассматривает новую область знания, которая еще не была предметом систематического методологического исследования. Анализ этих явлений особенно важен на современном этапе как для европейского культурного развития, так и в особенности для России, переживающей преобразование всей системы социальных и экономических отношений. Однако осмыслить западный опыт и выработать рекомендации для российских условий возможно только на основе развития методологической базы оценки научно-технических проектов и анализа конкретных областей исследования. В то же время методология науки может внести вклад в осознание и развитие этих новых областей знания, используя свой богатый опыт содержательного методологического анализа различных конкретных научных дисциплин, одним из наиболее ярких и современных представителей которых является нанотехнология, как образцовый пример новой, так называемой, технотехники.

Профессор Армин Грунвальд — директор Института оценки техники и системного анализа в Исследовательский центр г. Карлсруэ в Сообществе Гельмгольца и руководитель Бюро Германского Бундестага по социальной оценке техники в Берлине — анализирует вклад конвергентных тех-

нологий в усовершенствование человеческих возможностей в качестве нового шага в усилении сопряжения науки, техники и общества и рассматривает его последствия для науки¹⁶. С одной стороны, этот процесс направлен на многообещающий рост человеческих возможностей, техническое улучшение человека, с другой — здесь возможно появление подводных камней, делающих такого рода конвергенцию опасной для человечества. Поэтому научное исследование данной проблематики требует рассмотрения «за» и «против» не только с точки зрения естествознания и техники, но и с позиций социально-гуманитарных наук. Итак, научно-технический прогресс расширяет возможности деятельности человека, открывает новые области мышления и действия, преобразует недоступное в подверженное манипуляции и проектированию, раздвигает или устраняет границы деятельности, увеличивает независимость от природы, расширяет многообразие вариантов, преобразует природные опасности в риски, зависящие от принятия решений (например, из-за побочных последствий новейших технологий эти природные опасности оттесняются на задний план). Научно-технический прогресс, таким образом, открывает не только новые возможности для принятия решений, но и принуждает к определенным решениям со своими собственными рисками (побочными следствиями), является, как правило, необратимым, поскольку знание невозможно намеренно забыть. Он не только разрешает определенные проблемы, но и создает зачастую новые и при этом выявляет свою принципиальную двойственность. Для принятия решений, кроме того, теперь требуется более высокий уровень рефлексивности в решениях. Для каждого отдельного человека и общества в целом это означает, что нужно больше принимать решений (возникает большее многообразие вариантов), причем основания для принятия решений отчасти становятся «текучими», как бы неуловимыми или сами себя определяющими, а потому они являются спорными в современном обществе.

Важную роль в решении проблемы «технического усовершенствования человека» играют так называемые конвергентные технологии, к которым относятся нанотехнология, биотехнология и генная инженерия, информационные и

коммуникационные технологии и когнитивные науки. Сегодня, как подчеркивают неоднократно германские и американские исследователи этой проблематики, недостаточно уже исследования того, как отдельные технологии (прежде всего из вышеназванных технологий) влияют на развитие общества и человека. Необходимо исследовать и учитывать их конвергентное (сопряженное) влияние также и друг на друга, учитывая всю палитру их возможных применений. Причем сами эти применения (не только уже имеющиеся, но и предполагаемые) оказывают воздействие и на развитие научно-теоретической базы этих технологий.

Грунвальд указывает на нанотехнологию как основу гипотезы конвергентности, поскольку названные области техники «встречаются» здесь на уровне атомов и молекул. Действительно, методы нанотехнологического анализа и манипуляции кажутся применимыми везде одинаково, а целенаправленная манипуляция на атомарном и молекулярном уровнях, как представляется, может обеспечить взаимосвязь между названными областями техники. Причем появляется также возможность обеспечить связи между живыми и техническими системами. Но не проявляется ли эта тенденция лишь как новая волна (атомарного) редукционизма на новом уровне?¹⁷

Идеи нанотехнологии А. Грунвальд характеризует как утопии. Эти утопии представляют интенцию преобразования и «улучшения» человеческого тела и духа, а именно: в направлении расширения или создания совершенно новых функций (например, органов чувств — сначала идентичное по функциям воспроизведение естественных органов, а затем и расширение их функций), организацию непосредственного интерфейса между техническими системами и мозгом (например, передача информации, хранение содержания мозга в технических системах, встраивание специальных устройств для поддержки вычислительной способности мозга), и т.д., а также создания встроенных в наше тело нанороботов для ремонта на месте различных дефектов, непрерывного наблюдения за состоянием здоровья человека на молекулярном уровне, значительного замедления или вообще снятия проблемы возраста, и т.п. Тезис «улучшения

человека» находится в традиции научно-технического прогресса, который изначально направлен на расширение возможностей человека и преобразование недоступного в подверженное нашему воздействию, а также на расширение возможностей принятия решений и сферы человеческой деятельности¹⁸. Но биотехнологические манипуляции на нано-уровне подводят человечество к некоторой пограничной ситуации, где результаты такого воздействия становятся принципиально непредсказуемыми, причем могут привести к необратимым негативным последствиям для человечества в целом и его дальнейшего развития как на социальном и психологическом, так и на биологическом и физиологическом уровнях. Многие из этих идей пришли из фантастической литературы, но сегодня они означают революционный прорыв не только с технической, но и с социокультурной точки зрения. Причем научные исследования воспринимаются современным обществом как путь реализации этих утопий. Мы обращаемся за помощью в решении всех иногда неразрешимых проблем больше не с молитвой к Богу, а к ученым и инженерам, апеллируя к кажущемуся всемогущим научно-техническому прогрессу, и искренне верим в глубине душе, что он нас спасет и всем нам поможет.

Формулировка такого рода утопий как «будущего настоящего» аналогична констатации научно-технической делаемости, возможности создать нечто искусственным путем. Но эта констатация в то же время нами же самими оспаривается и порождает сомнения, нужно ли и можно ли это делать, не приведет ли это нами созданное к непредвидимым последствиям, которые необратимы. Такому сомнению способствуют длительные временные интервалы реализации задуманного и обещание высокой надежности, сочетающееся с глубинной двойственностью этих видений, обратной стороной которых становятся пугающие наше воображение сценарии ужасов¹⁹. Эта ситуация сильно напоминает попытки реализации социальных утопий для создания рая на земле, которыми изобилует новейшая история и негативные результаты которых еще свежи в памяти нынешних поколений.

Таким образом, как отмечает Грунвальд, даже если не появляются новые пространства для деятельности относи-

тельно конвергентных технологий (NBIC-нано-, био- и информационные технологии и когнитивные науки), то возникают новые «мыслительные пространства» и появляются новые степени свободы, однако также и новые вопросы и вызовы, сочетающиеся с потерей традиционного «само собой разумеющегося». Все это формирует потребность в новой ориентировке: необходимо знать, что мы хотим и куда мы хотим и по какой причине, причем эта ориентировка осуществляется в условиях неопределенности. Спрос на научное знание увеличивается, но требуются новые методы размышления о будущем, коммуникации с будущим. В результате возникают новые интерфейсы между различными дисциплинами, в том числе социально-гуманитарными дисциплинами, и необходимость эпистемологической работы, заключающейся в сравнении «конкурирующих будущих», или точнее, конкурирующих сценариев развития будущих событий²⁰.

С внедрением во все стороны общественной жизни и даже в человеческий организм продуктов конвергентных технологий на новый виток своего развития выходит и проблематика их философского осмысления. С развитием нанотехнологии в рамках применения конвергентных технологий появились новые возможности точечного видоизменения структур на молекулярном и атомном уровнях, вживления в организм человека новых микроприборов, усиливающих или даже расширяющих возможности человеческого восприятия и органов чувств. В связи с этим возникают и новые философско-методологические, этические и социально-психологические проблемы.

Техника как предпосылка и в то же время результат научного исследования в сочетании с поддерживающими их хозяйственными и государственными структурами развилась сегодня в мировую силу, основывающуюся на принципе делаемости всех вещей посредством создания возможностей для приложения науки. Такого рода научно-технический прогресс оборачивается в конечном счете регрессом прежде всего в экологической сфере, ведет к разрушению защитных сил окружающей среды и самого человеческого организма. Его можно сравнить с открытием ящика Пандоры, приносящего человечеству одновременно с благодат-

ным даром Прометея неисчислимые бедствия и болезни. Атомная техника, химическая технология и генная инженерия, основывающиеся на достижениях соответственно ядерной физики, синтетической химии и молекулярной биологии особенно глубоко внедряются в природные процессы и структуры, манипулируя уже не непосредственно ощутимыми феноменами, а именно этой «вторичной» научной реальностью, создавая новые комбинации чуждых «первичной» природе материалов, элементов и организмов. При этом абсолютно непредсказуемыми, не просматриваемыми и часто необратимыми оказываются последствия такого рода искусственного вторжения в естественную сферу. Альтернативой подобному техническому действию становится создание новой парадигмы в науке и технике, ориентированной на учет переносимости природой и человеком таких вторжений на базе равноправных партнерских взаимоотношений с окружающей человека средой.

Современный этап научно-технического развития наглядно показал те границы, за которыми наука и техника, сегодняшняя или будущая, сталкивается с неразрешимыми для нее, или лучше сказать, самой ею инициированными научными и техническими проблемами. Развитие представления о научно-техническом прогрессе связано с идеей де лаемости или проектируемости всего и вся, т.е. принципиальной возможности и даже необходимости реализовать, осуществить, исполнить то, что задумано, замыслено, запроектировано в научных разработках и что по умолчанию является благом для человечества. Это связано с иллюзией того, что наука способна раньше или позже с достаточной степенью точности предсказать, предусмотреть, предвидеть и, по крайней мере, свести к минимуму всякие негативные последствия таких проектов. Такое «тотальное» проектирование всего и везде привело первоначально к «безграничному» расширению содержания проектирования, доводящему идею проектной культуры до абсурда и приведшему, в конечном счете, к осознанию ее границ. Речь идет даже о создании «универсальной теории проектирования», которая должна позволить нам применять все наработанные человечеством знания для создания новых искусственных продуктов и сис-

тем — артефактов. Основная идея этой теории базируется на том, что не существует реальных различий между процессами проектирования в области инженерных продуктов, в архитектуре или строительстве, химии, микроэлектронике или микромеханике и т.д. По мнению ее адептов, каждый искусственный объект в мире, т.е. все, что не естественно, должно быть спроектировано человеческими существами и задача такой Универсальной Теории Проектирования заключается в том, чтобы выработать общие методы, как это сделать²¹. Но тогда возникает вполне законный вопрос об определении границ такого рода проектирования, поскольку объектом проектирования становятся не только машины и технические или человеко-машинные системы, но и материалы, из которых они созданы, химические соединения и даже молекулы. Именно это и предлагает делать нанотехнология. На современной стадии научно-технического развития выяснилось, однако, что научное человеческое знание не способно все предвидеть, что можно лишь предусмотреть определенную степень риска новых научных технологий. Сфера проектирования захватывает сегодня и сферу биологических организмов и их подсистем, а также область социальных процессов. Такие системы, однако, нельзя проектировать, исходя лишь из технических требований и методов, т.е. их нельзя проектировать в традиционном смысле этого слова, и необходимо переосмысление самого понятия «проектирование».

4. Нанотехнология как становящаяся комплексная научно-техническая дисциплина

Фокус современного научного ландшафта все более и более сходится на развитии наукоемких технологий. Поэтому не случайно слово «технология» включено в само название таких новых областей научного знания, как биотехнология и нанотехнология, где фундаментальные и прикладные установки сочетаются самым причудливым образом, а наряду с научными публикациями важнейшую роль в качестве продуктов и фундаментальных исследований начинают играть патенты. Нанотехнология является междисциплинарным направлением науки и техники и в то же самое время в ней формируются отчетливые черты дисциплинарности.

Поэтому ее следует отнести к разряду современных комплексных научно-технических дисциплин типа системотехники, сочетающих в себе междисциплинарные проблемно-ориентированные исследования с системным проектированием.

Наиболее характерным примером и образцом для понимания развития нанотехнологии является, на наш взгляд, история радиолокационной науки и техники.

На примере радиолокации видно, что эволюция научно-технической дисциплины связана с выделением новых исследовательских направлений и областей исследования в рамках семейства однородных дисциплин. Процесс формирования «классической» технической науки происходит по схеме: «исследовательское направление — область исследования — научная дисциплина». Такой способ образования новой научно-технической дисциплины связан с прогрессивным ветвлением базовой научной дисциплины (внутри данного семейства дисциплин), которое приводит к формированию сначала нового исследовательского направления, а затем и области исследования и дисциплины. На следующем этапе радиолокация попадает в новое семейство научно-технических дисциплин, имеющих системную ориентацию; втягивается в орбиту обслуживающих системотехнику дисциплин и в результате сама трансформируется в новое качество, новую комплексную научно-техническую дисциплину, включающую в себя в качестве основы проблемно-ориентированное исследование и системное проектирование.

Перечислим основные особенности радиолокационной системотехники как современной «неклассической» научно-технической дисциплины, отличающей ее от «классической» радиолокации. Радиолокационная системотехника, как комплексная научно-техническая дисциплина, отличается от классических технических наук тем, что она формируется нестандартным путем. В классических научно-технических дисциплинах техническая теория строится под влиянием определенной базовой научной (естественнонаучной или научно-технической) дисциплины и именно из нее первоначально заимствуются теоретические схемы и образцы научной деятельности.

В случае развития современных комплексных («неклассических») научно-технических дисциплин такой единственной базовой теории не существует, поскольку они ориентированы на решение комплексных научно-технических задач, требующих участия представителей многих научных дисциплин, группирующихся вокруг единой

проблемной области. Синкретичность представлений современных комплексных научно-технических дисциплин, к которым принадлежит радиолокационная системотехника, выдвигает на одно из первых мест проблему синтеза используемых в них разнородных знаний, теоретических представлений и методов. Однако в основе такого синтеза лежит сложная задача координации, согласования, управления и организации различных деятельности, направленных на решение определенной комплексной научно-технической проблемы.

В радиолокации одно из важных мест занимает исследование деятельности человека-оператора и проектирование пульта управления радиолокационной системой. Переход к автоматическому сопровождению и к автоматической обработке радиолокационной информации привел к необходимости исследования и проектирования деятельности все радиолокационной системы, т.е. алгоритма ее функционирования, часть которого может быть реализована оператором. Кроме того, объектом исследования и проектирования становится не только создаваемая, но и создающая система. Сложный процесс координации разработчиков радиолокационной системы требует четкого описания этапов ее создания (алгоритмов разработки). Другими словами, объектом исследования и проектирования становится сама научно-техническая деятельность. Кроме того, процесс проектирования радиолокационной системы становится эволюционным и не прекращается со сдачей данного типа системы в эксплуатацию. Создаются даже «самоусовершенствующиеся» системы, которые целенаправленно наращивают свою структуру в зависимости от изменения окружающей среды. При разработке радиолокационной системы уже на стадии исследования и проектирования учитываются изменения характера «целей», которые обусловлены многими социальными и экономическими факторами. В современных «неклассических» научно-технических дисциплинах, к которым принадлежит радиолокационная системотехника, важнейшую роль начинает играть проектирование и имитационное моделирование на ЭВМ, позволяющие заранее, как бы в форме идеализированного (компьютерного) эксперимента, проанализировать и рассчитать варианты будущего функционирования сложной технической системы²².

В принципе все те же характеристики можно приписать и нанотехнологии. Точно так же, как радиолокационная системотехника стала ориентироваться на создание сложных технических систем большого масштаба (*large-scale systems*), современная нанонаука и нанотехнология рассматривают наноструктуры как сложные естественно-искусственные системы. Так называемые «квантовые точки», например, «состоят из массива атомных кластеров», говорят даже об «искусственных атомах» несмотря на большое количество атомов в кластерах (островках), обладающих оп-

ределенной формой и конечными размерами, хотя «для данного типа структур принят термин «наноточки»». В установке «молекулярно-лучевой эпитаксии», которая по сути дела является одновременно исследовательским прибором и средством конструирования можно управлять плотностью и размером этих островков²³. Таким образом «наноточки» являются также сложными системами, хотя и входят в качестве «далее неразложимых» элементов в системы более высокого уровня. «При построении микроскопических тел все меньших и меньших строительных элементов (наноматериалов, кластеров) значительно изменяются их оптические, электрические, магнитные, каталитические и механические свойства в зависимости от величины частиц ... Становится, например, возможным с помощью изменения величины частиц придавать поверхностям различный цвет, твердость, отражательную тепловую способность» и т.д., что открывает новые перспективы для производственной сферы. Причем наночастицы демонстрируют при величинах около нанометра принципиально иные свойства, чем их отношения в больших твердых телах. Например, полупроводники превращаются в изоляторы, а металлы в полуметаллы» и т.п.²⁴

Возможность влиять на наноуровне на осязаемые свойства различных материалов, задавая им заранее определенные качества, выводит на новый уровень старую философскую проблему первичных и вторичных качеств. «Атомизм ... возникает отнюдь не в результате эмпирических наблюдений (например, движения мельчайших пылинок в солнечном луче), а в результате развития определенных теоретических понятий... Именно физическое свойство атома — его твердость, плотность — не допускает разделенности его на меньшие части... Что же касается впечатления единства и качественности, которое мы получаем от тел чувственного мира, то оно, по Демокриту, есть лишь субъективное, лишь мнение, объективно же существуют атомы и пустота»²⁵. Эта проблема заново формулируется в Новое время как проблема различения *первичных и вторичных качеств* вещи. По Галилею, к первичным качествам относятся чувственные качества вещей, имеющие корни в объективных свойствах материи (но сами эти корни сводятся к количественным механическим элементам): величина, форма, количество материальных тел (протяжение) и их движение по законам механики. Знание о них дает математика. Вторичными же являются вкусы, запахи, цвета и т.д., имеющие своим источником только наши чувства. Данные качества присущи не объекту, а субъекту и с устранением живых существ были бы устранены и все эти качества. У Локка

первичные качества — это такие, которые неотделимы от тела, т.е. объем, форма, движение, сцепление. Они порождают в нас простые идеи — плотности, протяженности, формы, движения или покоя и числа — и находятся в телах, воспринимаем ли мы их или нет. Это — свойства материальных тел, не отличающиеся в принципе от ощущений этих свойств. Вторичным же качествам — цвета, звуки, вкусы и т.д. — ничего не соответствует в самих вещах, которые вызывают в нас эти различные ощущения своими первичными качествами. Беркли же признает все без исключения качества вещей вторичными. Он отверг наличие объективной основы у идеи первичных качеств, для него геометрические и механические характеристики тел также вторичны, полностью и целиком плод субъективной деятельности человека. Эти качества возникают только благодаря контрастности в структуре цветов, звуков и ощущений осязания. Таким образом, излишняя онтологизация качеств предметов привела к абсурдному заключению об их полной субъективности. В *теории систем* этот парадокс снимается тем, что *первичные* (функциональные, первого порядка) и *вторичные* (второго порядка) *свойства элементов различаются лишь относительно их функциональной роли в исследуемой системе*. При этом функциональные свойства элементов являются *свойствами первого порядка*, поскольку позволяют включаться в систему для выполнения общей цели, стоящей перед ней и всеми ее элементами. *Свойства же второго порядка* — это те нежелательные свойства, которые приносит с собой элемент в систему. В нанотехнологии между первичными и вторичными качествами устанавливается не столько онтологическое, сколько операциональное соответствие — влияя на первичные качества стало возможным детерминировать появление желаемых вторичных качеств. При этом становится совершенно безразличным, приписываем ли мы их субъекту или объекту. Важно, что с помощью построенных в нанонауке теоретических моделей первичных качеств нанотехнология конструирует требуемые для определенных целей вторичные качества «ощущаемых» нами или созданными нами приборами (например, радиолокаторами) вещей.

Важным этапом в развитии радиолокации как научно-технической дисциплины была организация системы подготовки научных и инженерных кадров и системы обеспечения исследований научно-технической информации.

На примере развития радиолокации в Советском Союзе хорошо видно, какие последствия для развития новой научно-технической дисциплины может иметь массированная поддержка государства. Научные и технические предпосылки развития радиолокации в СССР были созданы до и во время Второй мировой войны, но действительное развитие как новая область науки и техники и главным образом как отрасль промышленности она получила в первые послевоенные десятилетия. Любая область науки и техники, даже такая засекреченная во время и после войны, как радиолокация, не может развиваться

ся без интенсивного обмена научно-техническими идеями в международном масштабе. Этот же тезис подтверждало и успешное сотрудничество и координация работы в области радиолокации до и во время войны между Великобританией и США, а также послевоенный опыт привлечения к работе германских специалистов в СССР.

«В первые послевоенные годы огромное значение имели исследования распространения радиоволн — без этого невозможно правильно проектировать радиолокационную технику. Их проводили Введенский, Леонтович и Фок. Результатом стало создание методик измерений и расчетных формул для решения конкретных задач. ... Вопросы приема и излучения, канализации сантиметровых волн, процессы в различных узлах и звеньях РЛС, фильтры и резонаторы, антенно-фидерные системы и т.д. были всесторонне исследованы специалистами НИИ-108 и стали достоянием широкого круга разработчиков РЛС в нашей стране. Помимо отчетов по НИОКР ведущие специалисты написали ряд книг и пособий по важнейшим вопросам радиолокационной техники, по которым обучалось не одно поколение будущих специалистов»²⁶. Были целевым назначением созданы специальные кафедры для подготовки специалистов высшего звена в этой области науки и техники, учреждается Научно-технический совет и информационный центр а также подготовка специалистов среднего уровня. Все это создало беспрецедентную базу для развития за кратчайший срок на самом высоком мировом уровне радиолокационной науки, техники и промышленности, которая в итоге стала основой развития новых информационно-компьютерных технологий²⁷.

Относительно нанотехнологии в этом отношении можно сказать, что, являясь междисциплинарным направлением науки, она постепенно, тем не менее, консолидируется в новую научную дисциплину. Нанотехнология уже состоялась как новая область исследования, состоящая из нескольких исследовательских направлений и предполагающая развитие организационных форм научной коммуникации — советы, ассоциации, научные собрания, конференции и т.д. Однако для становления научной дисциплины требуется добавить к этому еще и организацию подготовки научных кадров (курсы и кафедры в высших учебных заведениях) и формирование особого эшелона публикаций — учебников. В этом отношении нанотехнология еще только вступает на стадию формирования системы подготовки научных кадров и специализированного *исследовательского сообщества*, хотя уже имеет частично сформировавшуюся (и активно в настоящее время формирующуюся) профессиональную организацию — лаборатории, научно-исследовательские институты, ученые советы и т.д.

Многие университеты США, Европы и Австралии уже проводят нанорелевантные курсы²⁸. Эти курсы классифицируются по их нахождению, например, в центрах нанотехнологии или же на физических факультетах, а также по их направленности на более фундаментальные темы или имеющие инженерную ориентацию.

Проведенный анализ курсов по нанотехнологии, читаемых сегодня на уровне подготовки магистра, ясно показал, что организовать систему обучения в этой области одновременно покрывающую все аспекты нанонауки и нанотехнологии практически невозможно. Более того, если осуществлять подготовку магистров согласно Болонскому процессу (1 год обучения или 60 кредитных курсов и 1 семестр проектной работы), невозможно подготовить полноценного специалиста в этой по сути дела междисциплинарной области науки и техники. Следовательно, академическое обучение в сфере нанотехнологии должно иметь *трехступенчатую* организацию:

- Получение степени бакалавра в одной из существующих областей науки, например, физики, биологии или технических наук.
- Обучение на уровне магистра в области нанонауки или нанотехнологии.
- Аспирантская программа по нанотехнологии/нанонауке²⁹.

Следующий вывод из проведенного исследования гласит, что учебный план подготовки нанотехнологов на соответствующих факультетах не сильно отличается от программ этих факультетов (например, физиков, химиков, биологов или специалистов в технической науке). Это отнюдь не исключает, но даже предполагает наличие особых курсов типа «Введение в нанотехнологию» вне факультетских программ для повышения мотивации студентов специализироваться именно в этой области. Учитывая опыт развития радиолокационной науки и техники, для дальнейшей консолидации нанонауки и нанотехнологии в современную комплексную научно-техническую дисциплину необходимо сконцентрировать внимание на целенаправленной подготовке научных и инженерных кадров различных уровней в этой новой области науки и техники.

Еще один важнейший стимул развития научно-технических дисциплин, который особенно рельефно виден на примере радиолокационной науки и техники и может быть аргументом для стимулирования развития нанонауки и нанотехнологии, является целенаправленная организационная и финансовая поддержка промышленной базы.

Стремительный рост промышленности, развитие массового производства стимулировали унификацию и стандартизацию аппаратуры и схемных решений, а также технической документации. Это оказало сильное влияние на совершенствование структурных схем теоретической радиолокации, формирование в ней нового однородного идеального объекта, облегчающего теоретический анализ и синтез различных технических систем типовыми методами, — идеальной РЛС. Разработки, которые проводились ранее, характеризовались тем, что они осуществлялись разрозненными группами инженеров в различных странах, относительно изолированных друг от друга. С ростом их числа возникает необходимость централизованной координации проводимых ими исследований и разработок. 4 июля 1943 г., было подписано постановление «О мероприятиях по организации производства радиолокационной аппаратуры», в соответствии с которым был образован Совет по радиолокации при ГКО, приступивший к созданию радиолокационной промышленности СССР, начато создание Всесоюзного института по радиолокации, Всесоюзного электровакуумного института, Центрального проектно-конструкторского бюро³⁰. Уже после войны 28 июня 1946 г. было создано Министерство промышленности средств связи, куда вошли основные радиолокационные предприятия страны. Советом по радиолокации была выработана стратегия развития радиолокации и радиоэлектроники в стране, началась организация научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и заводов. Советом по радиолокации был разработан план, предусматривавший создание нового поколения техники. Совет Министров СССР утвердил этот план и 10 июля 1946 г. принял постановление «Вопросы радиолокации», где были определены важнейшие задачи на пятилетний период с 1946 по 1950 гг.

Предстояло решить главную задачу: перевести промышленные предприятия на серийный выпуск новой техники. Как для атомной и ракетной промышленности, так и для развития радиолокационной промышленности необходимо было создать производственный комплекс в масштабах всей страны. На радиолокационную тематику переводились три научно-исследовательских института и шесть особых конструкторских бюро Министерства промышленности средств связи, три ОКБ Министерства вооружения, семь ОКБ Министерства авиационной промышленности, два НИИ и три ОКБ Министерства сельскохозяйственного машиностроения, а также ряд научных организаций Министерства обороны³¹. В феврале 1951 г. для координации этих работ было создано Третье главное управление (ТГУ) при Совете Министров СССР. Главной его задачей было создание системы противовоздушной обороны. Эта организация обладала огромными возможностями. Со всей страны в Москву переводились лучшие специалисты. К решению этой задачи были привлечены наряду с известными учеными и инженерами также, и в большом количестве, молодые ученые и специалисты. «От постановки задачи — создать принципиально новый вид вооружений... до ее решения... прошло менее трех лет... Создание за 4,5 года такой системы, какой яви-

лась московская зенитная ракетная система ПВО, – задача фантастическая для любого государства. Она не была бы выполнена, если бы... государство не предоставило для ее решения... неограниченные возможности. Руководство работами над системой было возложено на выдающихся ученых, конструкторов, организаторов производства. Опора делалась на талантливую, образованную молодежь. Были созданы специальные организации-разработчики и самые разнообразные производства...»³². Прорыв, совершенный в ходе проведенных работ в радиолокационной науке, технике, технологии, созданные коллективы квалифицированных разработчиков, эффективная кооперация промышленности стали фундаментом дальнейшего научно-технического развития нашей страны.

Проблема исследования научно-технического развития имеет большую актуальность для современной философии науки и техники, поскольку рассматривает новую область знания, которая еще не была предметом систематического исследования и философской рефлексии. Анализ этих явлений особенно важен на современном этапе как для европейского культурного развития, так и в особенности для России, переживающей преобразование всей системы социальных и экономических отношений. Однако осмыслить западный опыт и выработать рекомендации для российских условий возможно только на основе развития методологической базы оценки научно-технических проектов и анализа конкретных областей исследования, одной из наиболее ярких и современных представителей которых является нанотехнология, которая является сегодня образцовым примером новой, так называемой, техннауки.

Примечания

¹ Schmid G. et al. Nanotechnology. Assessment and Perspectives. Berlin, Heidelberg, 2006.

² Асеев А.Л. Нанотехнологи в полупроводниковой электронике // Вестник РАН. 2006. Т. 76, № 6. С. 606. «Возникающие при этом силы межатомного взаимодействия противоположно направлены и создают момент сил, изгибающий гетероструктуру» (там же. С. 609).

³ Schmid G. et al. Nanotechnology. Assessment and Perspectives. P. 206.

⁴ Paschen H., Coenen Chr. T. Fleischer u.a. Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung. Berlin, Heidelberg. N. Y., 2004. S. 1, 27.

⁵ Paschen H., Coenen Chr., Fleischer T. u.a. Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung. S. 27.

⁶ Из писем Герца швейцарскому физику Э. Саразину от 12.04.1891 г. и проф. Л. Цендеру во Фрайбург от 29.04.1893 г. из Бонна (HS 03141 и HS 03169 – Deutsches Museum in München).

- ⁷ См.: Климин А.И., Уралов В.А. Фердинанд Браун – лауреат нобелевской премии в области физик // Электросвязь. 2000. № 8 - <http://www.computer-museum.ru/connect/histral3.htm>
- ⁸ См.: *Veltmann. K.H.* Visualisation and Perspective // Leonardo e l'Eta della Ragione a cura di Eurico Bellone e Paolo Rossi. Milano: Scienza. 1982. P. 188 – 189.
- ⁹ См.: *Schmid G. et al.* Nanotechnology. Assessment and Perspectives. P. 149.
- ¹⁰ См.: *Paschen H., Coenen Chr., Fleischer T. u.a.* Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung.
- ¹¹ *Bachmann G.* Innovationsschub aus dem Nanokosmos – Technologieanalyse. Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Abteilung Zukünftige Technologien. 1998. S. 22.
- ¹² См.: *Paschen H., Coenen Chr., Fleischer T. u.a.* Op. cit.
- ¹³ *Heinze T.* Die Kopplung von Wissenschaft und Wirtschaft. Das Beispiel der Nanotechnologie. Frankfurt – N.Y., 2006. S. 109.
- ¹⁴ О структуралистской концепции науки см. подробнее: *Stegmüller W.* The Structure and Dynamics of Theories. N.Y. – Heidelberg – Berlin. 1976.
- ¹⁵ См.: Probabilistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science. Proceedings of the 1978 Pisa Conference on the History and Philosophy of Science. Vol. II. Dordrecht: Reidel, 1981. P. 211 – 237.
- ¹⁶ См.: *Grunwald A.* Converging Technologies for Human Enhancement. A New Wave Increasing the Contingency of the *conditio humana* // Assessing Societal Implications of Converging Technological Development. Berlin. 2007. P. 271 – 288.
- ¹⁷ Ibid.
- ¹⁸ Ibid.
- ¹⁹ Ibid.
- ²⁰ Ibid.
- ²¹ Universal Design Theory. Proceedings of the workshop, Karlsruhe, Germany, May 1998 / Ed. By Grabowski, S. Ryde, G. Grein. Aachen: Shaker Verlag, 1998.
- ²² *Горохов В.Г.* Научное исследование, развитие техники и хозяйственная поддержка государства: радиолокационная системотехника - <http://spkurdyumov.narod.ru/Gorohov.htm> – 2006; *Gorokhov V.* The Historical Development of RADAR Science and Technology as the Prelude to the Modern Information Revolution // ICON. Annual Journal of ICONTEC. 2007. Vol. 13/
- ²³ *Асеев А.Л.* Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. С. 606.
- ²⁴ *Bachmann G.* Innovationsschub aus dem Nanokosmos – Technologieanalyse. S. 22.
- ²⁵ См.: *Гайденко П.П.* Эволюция понятия науки. М., 1980. С. 79, 86, 88, 95 – 97.
- ²⁶ «В 1966 году ... он получает название Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт – ЦНИРТИ» (*Мажоров Ю.* ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2003. № 4. С. 56 – 59).
- ²⁷ При этом, однако, важно учитывать и отрицательные моменты в

организации такого рода научного исследования и проектной деятельности в рамках тогдашнего военно-промышленного комплекса: часто неоправданная секретность, корпоративность, ориентация на военные цели, дублирование работ и нерациональное использование финансовых, материальных и персональных ресурсов (об этом см., например: *Дроздов Н.Д.* Из истории создания системы противоракетной обороны в СССР. Рукопись. 1 июня 1998 г. — http://bookz.ru/authors/drozdvov-nd/drozdvov_nd01/1-drozdvov_nd01.html). В это время процветали протекционизм (без рекомендации изнутри или от вышестоящих организаций было практически невозможно устроиться на работу) и лоббирование собственных проектов в правительстве иногда в ущерб делу. Каждый главный или генеральный конструктор имел своего покровителя в Политбюро, каждый стремился иметь в своей организации родственников высших чиновников, чтобы иметь возможность получать внеочередное финансирование. Постоянные реорганизации и подковерная борьба за лидерство мешали работе, а стремление выжать из начальства побольше средств, приводило к раздутым штатам (фактически же к скрытой безработице), нерациональному использованию огромных ресурсов и замораживанию важных для страны, но конкурирующих проектов.

²⁸ См.: *Schmid G. et al.* Nanotechnology. Assessment and Perspectives. P. 440.

²⁹ Ibid.

³⁰ Главной стратегической задачей этого Совета было создание промышленной базы для оснащения армии и флота радиолокационной аппаратурой. Это постановление положило начало разветвлению производства радиолокационной техники. Становилось ясно, что без повышения технического уровня элементной базы и роста мощностей по ее производству, организовать выпуск радиолокационной аппаратуры в количествах, необходимых армии, будет невозможно. «Постановление фактически создавало новую для страны комплексную отрасль промышленности — радиоэлектронику. Речь шла именно о создании новой отрасли как единой структуры — отдельные НИИ, КБ, заводы существовали и ранее. Теперь же в одном Главном управлении наркомата электропромышленности объединялись системный радиоэлектронный институт ВНИИ-108, электро-вакуумный институт НИИ-160, проектно-конструкторское бюро ПКБ-170 (последние два образованы Постановлением), а также пять уже существующих заводов ... Впервые были объединены два традиционных направления электроники — компоненты и аппаратура» (*Пролейко В.* О значении электроники. Военный аспект. 2005. — <http://www.electronics.ru/197.html>).

³¹ *Первов М.А.* Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны. Интернет издание книги. Издательский Дом «Авиарус-XXI», 2003 — <http://www.aviarus-21.com/books/pvo/rus>

³² *Альперович К.С.* Годы работы над системой ПВО Москвы — 1950—1955. Записки инженера. М., 2003. С. 50. — <http://www.vko.ru/books/037-051.pdf>