

K. Eric Drexler

Radical Abundance

How A Revolution in Nanotechnology
Will Change Civilisation

PUBLIC AFFAIRS
NEW YORK 2013

Эрик Дрекслер

Всеобщее благодеяние

Как нанотехнологическая революция
изменит цивилизацию

Перевод с английского

Юрия КАПТУРЕВСКОГО

Научный редактор

СЕРГЕЙ ЛУРЬЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНСТИТУТА ГАЙДАРА

МОСКВА · 2014

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Фонда инфраструктурных и образовательных программ

Дрекслер, Э.

Всеобщее благоденствие. Как нанотехнологическая революция изменит цивилизацию [Текст] / пер. с англ. Ю. Каптуревского; под науч. ред. С. Лурье. — М.: Изд-во Института Гайдара, 2014. — 504 с.

Эрик Дрекслер — «отец-основатель» нанотехнологий, науки об инженерии на молекулярном уровне. В своей новой книге «Всеобщее благоденствие» он показывает, каким образом стремительный научный прогресс изменит наш мир. Благодаря атомарно точному производству мы вскоре сможем производить больше вещей, которые хотят люди, при меньших затратах. Это приведет к полному пересмотру оснований нашей экономики и окружающего мира.

Книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся проблемами современных нанотехнологий.

© Издательство Института Гайдара, 2014
Radical Abundance — Copyright © K. Eric Drexler, 2013
Настоящее издание опубликовано по соглашению
с *Loretta Barrett Books* и *Synopsis Literary Agency*.

А. Чубайс. Предисловие к русскоязычному изданию · 11

Необходимое вступление · 15

Замечание (октябрь 2012 г.) · 22

Глава 1. Атомы, биты и всеобщее благоденствие · 25

От информационной революции к АТП · 30

Глава 2. Путешествие к истокам идей · 33

О миссии, которая привела в библиотеки · 34; Наука и космос для промышленного производства · 43; Интерлюдия: Артур Кантровиц · 45; Культура количественно выраженных мечтаний · 48

Глава 3. От молекул к наносистемам · 51

Машины конфликта · 62; Интерлюдия. Проблемы и перспективы · 66

Глава 4. Три прошедшие революции и грядущая четвертая · 73

Первая аграрная революция · 74; Промышленная революция · 78; Информационная революция · 85; АТП-революция · 90

Глава 5. Как можно увидеть и почувствовать наноразмерный мир? · 98

Растяжение времени в равной пропорции · 102; Рассмотрение под увеличительным стеклом атомарных структур · 104; Текстура поверхности атомарно точных механизмов · 110; Почему АТП-системы на удивление тривиальны? · 121

Глава 6. Способы изготовления вещей · 123

Детали, машины и мощь автоматизированного производства · 124; Биты, атомы и мощь цифровых систем · 130; Биотехнологии и мощь молекулярных наномашин · 135; Атомар-

ная точность, достигаемая с помощью химии · 138; Механические, цифровые, молекулярные и точные · 141

Глава 7. Наука и бесконечный ландшафт технологий · 147

Великая история мира · 147; Технологии и законы физики · 148
Учебник науки проверяется каждый день · 152; Универсальное и в то же время ограниченное физическое знание · 155; От квантовой механики к пружинам и упругим сферам · 159; Противостояние неизвестности и непредсказуемости · 163; Инженерное искусство в пределах ограниченного знания · 168; Место АТП в пространстве технологий · 171

Глава 8. Противоречия между наукой и техникой · 173

К вопросу о слонах и автомобилях: две притчи о науке и технологиях · 173; Почему наука и техника смотрят в противоположные стороны? · 181; Нисходящая структура инженерного конструирования · 187; Стратегия системного инженерного проектирования · 189; Проблема противоречащих друг другу интересов · 193; Применение инженерного взгляда · 206

Глава 9. Изучая потенциал технологии · 209

Космос: 1899 г. · 210; Изучая опыт инженерной разработки космических систем · 214; Инженерная деятельность в случае, когда продуктом являются знания · 216

Глава 10. Механизмы полного изобилия · 231

Вид со стороны конечного продукта · 231; Рассматриваем процесс во всех подробностях · 234; Преодоление микроблочного порога · 237; От молекул к микроблокам · 239; Замечание об энергетических требованиях · 243; Вполне приемлемые ответы на текущий момент · 245

Глава 11. Продукты полного изобилия · 248

Три фундаментальных вопроса · 249; Источники полного изобилия · 252; Практическая сторона дела · 258; Источники резкого сокращения издержек · 261; Производительность, издержки и необходимость изменений · 271

Глава 12. Современные технологии атомарной точности · 274

АТ-инженерия и химия · 276; Инженерное проектирование с использованием природных инструментов и моделей · 280;

Методы обработки материалов, которые иногда являются атомарно точными · 285; Использование сканирующего зондирования для построения АТ-структур на кристаллах · 286

Инженерия молекулярных систем · 288

Совмещение отдельных фрагментов — составные молекулярные системы · 289; Критическая технология: вычислительные инструменты проектирования · 291

Пути к революции · 293

Глава 13. На пути в будущее произошло нечто странное... · 300

Два вида нанотехнологий · 302; Предназначение, успех и рождение чудовищного мема · 309; Наука, техника и возможность · 326

Глава 14. Как ускорить прогресс · 327

Создание дорожной карты · 329

Глава 15. Преобразование материальной основы цивилизации · 341

Несколько слов о потребительских продуктах · 342; Преобразование средств производства · 343; Преобразование информационных технологий · 345; Преобразование инфраструктуры · 347; Преобразование сферы энергетики, ресурсной области и сельского хозяйства · 349; Преобразование технологий безопасности · 358; Преобразование медицины · 361; Ряд неудобоваримых истин · 364

Глава 16. Управление катастрофическим успехом · 366

Вопросы о темпах и направлениях развития · 368; Прорывные решения глобальных проблем · 374; Согласованные ожидания, интересы и ответные действия · 390

Глава 17. Безопасность в условиях необычного будущего · 395

Прорывной потенциал: военные асимметрии · 396; Парадокс полной внутренней безопасности · 402; Более тесное соответствие национальным интересам · 406; Неопределенности, риски и направления дальнейших шагов · 410; Кооперативные стратегии ухода от ненужных рисков · 412

Глава 18. Изменение повестки дня в дискуссиях о будущем · 416

Об энтузиазме... · 418; АТП как один из видов производ-

ства · 419; АТП-системы — это производственные мощности, хотя и отличающиеся от современных заводов и фабрик · 420; Уменьшение размеров механизмов позволяет добиться выдающихся результатов · 421; Параллели между АТП и цифровыми технологиями · 422; Удивительный прогресс на пути к АТП · 423; «Нанотехнологии» превратились в бренд, используемый для обозначения совсем других направлений исследований · 424; Ближайшие достижения будут иметь мало общего с передовым АТП · 425; АТП опирается на хорошо известные физические и инженерные принципы · 426; Передовые технологии приведут к возникновению различных исследовательских проблем · 427; Мы не способны достоверно предсказать сроки создания технологий, пути движения к ним и способы применения · 428; Там, где «местность» становится труднопроходимой · 429; Большие и малые реальные дела · 431; Оглядываясь назад и заглядывая вперед · 432

Приложение I. Физические принципы молекулярного уровня в атомарно точном производстве · 439

Стереотактический синтез как инструмент достижения атомарной точности · 440; Физические требования к стереотактическому синтезу · 441; Широкий спектр потенциальных систем и методов · 444

Приложение II. Инкрементальный путь к АТП · 446

Применявшиеся в прошлом и современные метрики прогресса · 446; Исследование способов повышения доли АТ-технологий · 448; Оглядываясь назад · 459; Ускорение движения по спирали прогресса · 464; Открытое исследовательское проектирование · 466; В заключение · 473

Примечания · 477

*Моему другу и наставнику
АРТУРУ КАНТРОВИЦУ.
В этом году
ему исполнилось бы 100 лет*

Предисловие к русскоязычному изданию

ИМЯ ЭРИКА ДРЕКСЛЕРА известно всем, кто когда-либо интересовался историей развития нанотехнологий. Будучи одним из первых, кто предложил описывать новую область науки и техники этим термином почти тридцать лет назад, широкой публике он известен как популяризатор идеи нанотехнологической революции. Его книга «Машины созидания», вышедшая в 1986 году, произвела эффект разорвавшейся бомбы. Немалую роль здесь сыграл его писательский талант, который вы, я уверен, оцените при прочтении этой книги, — Дрекслер пишет очень просто, приводит легко понятные аналогии и примеры. К сожалению, тематика нанотехнологий, как это часто бывает с любой новой дисциплиной, сегодня обросла мифами и заблуждениями. В общественном сознании нанотехнологии иногда воспринимаются как символ несбыточных надежд, а в научной среде этот термин стараются применять лишь в случае крайней необходимости. Одна из главных целей «Полного изобилия» — отделить зерна от плевел, мифы от реальных фактов, несбыточные обещания от достижимых целей.

Сегодня национальные программы в области нанотехнологий есть во всех технологически развитых странах, в том числе в Японии, США, Китае, Южной Корее, Европейском союзе и России. И эти программы уже приносят ощутимые результаты — только в нашей стране созданы десятки новых современных предприятий

и тысячи новых рабочих мест. Не всегда продукцию нанотехнологий можно увидеть на полках магазинов, поскольку чаще всего речь идет о базовых производственных технологиях, например нанесения специальных покрытий, или о конструкционных и функциональных материалах. Но компоненты, произведенные с помощью нанотехнологий, уже вокруг нас — в компьютерах и телекоммуникационном оборудовании, осветительных приборах, в жилых зданиях и автомобилях.

Эрик Дрекслер предлагает нам заглянуть в будущее. В его понимании оно будет связано не просто с распространением этих компонент, а с преобразованием на этой основе самой технологической сути материального производства — переходу к тому, что он называет атомарно точным производством (АТП). Для автора речь идет при этом не об очередном технологическом усовершенствовании. Масштаб этого перехода Дрекслер описывает как четвертую технологическую революцию в истории человечества — после аграрной, промышленной и информационной. АТП для Дрекслера способно кардинально повысить энергоэффективность, снизить материалоемкость современной техносферы и на этой основе дать человечеству возможность выйти из мальтузианской ловушки ограниченных ресурсов нашей планеты и решить проблему «пределов роста» поставленную перед современной цивилизацией в работах Римского клуба.

Разумеется, к словам Дрекслера стоит относиться с определенной долей критичности — рисуя картину полного изобилия, автор должен учитывать, что мы еще не все знаем о технологических ограничениях. Являя собой яркий пример воспитанника инженерной школы MIT и демонстрируя блестящую междисциплинарную эрудицию, он довольно свободно относится к физическим и химическим терминам, и профессиональный читатель охотно вступит с ним в заочную дискуссию. Однако Дрекслера нельзя упрекнуть в непоследователь-

ности и несистемности. Целостный инженерный подход и умение воплощать свои идеи на практике — это то, чему он пытается научить читателей своей книги.

Думаю, у этой книги будут горячие сторонники и ярые противники. Именно поэтому она, по моему убеждению, должна быть доступна российскому креативному классу.

А. Б. Чубайс

ТОЛЬКО представьте себе, каким стал бы мир, если бы мы научились производить вещи по-настоящему хорошо — качественно, без ущерба для окружающей среды, недорого и в любой точке мира. Что если производство рекордно эффективных солнечных батарей будет обходиться не дороже выпуска картона или алюминиевой фольги? Что если столь же недорогим будет изготовление портативных суперкомпьютеров? Добавьте к этому списку экологичные автомобили, освещение и всю скрытую от глаз обывателя инфраструктуру промышленной цивилизации, создание которой требует минимальных затрат, а ее функционирование не сопровождается значительными выбросами углекислого газа.

Если бы мы были *настолько* хороши в производстве материальных благ, то смогли бы кардинально расширить ресурсные ограничения нашей планеты, придя к изобилию — полному, адаптивному и устойчивому. Объем производства существенно превысил бы потребности человечества, а издержки резко уменьшились — во всех смыслах этого слова, как экономическом, так и экологическом.

Пока же большинство людей готовится к принципиально иному будущему. Ощущение приближения к неизбежному выбору между экономическим развитием и глобальными ограничениями последовательно нарастало в течение последних нескольких десятков лет. Расширение промышленного производства в различных странах ведет к увеличению выбросов углерода в атмосферу. Нехватка ресурсов уже становится причиной

войн, а прогноз их истощения — основанием для подготовки к будущим вооруженным конфликтам. Так, растет напряженность вокруг пресной речной воды и разработки металлов в Африке, добычи нефти на Ближнем Востоке и недавно открытых нефтяных месторождений в Южно-Китайском море. Везде и всюду прогресс и экономический рост все больше напоминают игры с нулевой суммой. Многим из нас прогноз на ближайшее будущее видится в самых мрачных тонах.

В основе этих ожиданий лежит предположение о неизменности технологий, используемых сегодня для производства материальных благ. Однако что произойдет, если хорошо знакомое нам промышленное производство будет изменено до неузнаваемости или ему на смену придет что-то принципиально новое? Новая промышленная революция изменит все вокруг нас. И она уже не за горами.

Вообразите мир, в котором гаджеты и товары массового потребления являются не продукцией промышленного производства, включающего в себя множество стадий технологического процесса, а создаются с помощью компактных устройств, способных производить, например, компьютеры, прямо на вашем столе. Представьте себе, что для выпуска автомобиля больше не нужно огромных сборочных предприятий, требующих многомиллионных инвестиций в оборудование — достаточно помещения размером с гараж, самых обычных материалов и всего лишь нескольких минут времени. А теперь представьте, что технологии, способные превратить эти мечты в реальность, уже появляются — под различными наименованиями и, чаще всего, без особой помпы. Им еще предстоит пройти большой путь, но они уже развиваются с поразительной скоростью.

* * *

В 1986 г. я предложил миру понятие «нанотехнологии», которое сегодня получило широкое распространение. Имелась в виду перспективная технология, характе-

ризующаяся двумя ключевыми чертами: *производством с использованием наноустройств и изготовлением продуктов с атомарной точностью*. Эти черты тесно связаны друг с другом, поскольку атомарно точное изготовление (atomically precise manufacturing, APM) и основывается на использовании наноустройств, и предлагает способ их создания¹.

Наноразмерные детали и атомарная точность их изготовления открывают возможность атомарно точного производства (АТП), позволяющего добиться качественно новых свойств выпускаемых продуктов при одновременном снижении себестоимости. Диапазон новых свойств выходит далеко за рамки сегодняшних технологических ограничений и включает в себя и ультра-легкие конструкционные материалы для авиастроения, и портативные суперкомпьютеры, и микроскопические медицинские устройства, в том числе способные распознавать и уничтожать раковые клетки.

Концепция нанотехнологий предполагала революционные изменения в технологиях производства и свойствах продуктов, поэтому вскоре после 1986 г. эта идея начала жить своей собственной жизнью. Предлагая научному сообществу новые направления исследований и захватывающие воображение (в некоторых случаях совершенно нереальные) футуристические мечты нашей поп-культуре, она вызвала в равное мере восхищение и критику. Идея создания вещей на молекулярном уровне стала мощным стимулом к появлению новых направлений научных исследований. Десять лет спустя эти направления развились в ряд программ по исследованию нанотехнологий, на которые правительства разных стран потратили миллиарды долларов.

1. Если «перевести» нанометры или миллимикроны в сантиметры (что означает увеличение в 10 миллионов раз), то атомы выглядели бы как маленькие бусинки, как бисер, и электродвигатель, изготовленный из деталей с гладкой каплевой структурой, поместился бы в вашей ладони.

В то же время в 1990-х восприятие нанотехнологий обществом и видение ученых пошли в разные стороны. Футуристические популярные мечты все больше отрывались от реальности, дрейфуя в области, никак не связанные с наукой. Внимание ученых, напротив, сосредоточилось на исследованиях, на которые легче было получить финансирование, в основном, на тех, что могут дать быстрый результат. В итоге перекоса ожиданий в одну сторону, а тематики научных исследований — в другую, термин «нанотехнологии» стал восприниматься как символ несбывшихся надежд, но никак не наступающей революции, способной изменить наш мир до неузнаваемости.

В последние годы технологи значительно приблизились к критическому уровню, который станет поворотным пунктом на пути развития технологий АТП-уровня. Однако, по мере ускорения прогресса в атомарно точном производстве, и общественность в целом, и ключевые исследовательские сообщества все меньше понимают особенности его применения. В отношении значительной части важнейших исследований наименование «нанотехнологии» не употребляется вовсе, и эта простая, но важная проблема «маркировки» затрудняет понимание того, насколько далеко мы продвинулись вперед.

Невежество в этом вопросе может быть чрезвычайно опасным, поэтому важно знать и понимать, с чем мы имеем дело. Нанотехнологическая революция принесет с собой возможности, которые изменят наш мир, и эти изменения будут огромны. В числе их вероятных последствий — реакция на климатические изменения, глобальное экономическое развитие, кризис перенаселения и иные проблемы XXI столетия.

Как это часто бывает, сама по себе суть революционной концепции очень проста.

В ее основе лежит идея применения атомарно точных нанотехнологий для создания производственного оборудования. Крупномасштабное, высокопроизводительное атомарно точное производство — вот тот фун-

дамент передовых нанотехнологий, который способен радикально изменить наш мир в ближайшие годы.

АТП представляет собой разновидность производства. Но оно не тождественно *промышленному* производству. Мы видим существенные различия сверху донизу. На смену огромным, загрязняющим природу заводам и фабрикам должны прийти чистые компактные машины, способные производить более качественные продукты, потребляя при этом меньше энергии и материальных ресурсов.

В качестве моделей (и точек отсчета) могут служить Промышленная и Информационная революции, так как атомарно точное изготовление будет сочетать в себе и усиливать черты и первой, и второй. Системы АТП сыграют в производстве роль, подобную той, которую взяли на себя компьютерные системы в сфере обработке информации. Они позволяют создавать программируемые машины — быстрые, недорогие и чрезвычайно гибкие с точки зрения возможностей их применения устройства. По своему универсализму они будут во многом напоминать компьютеры. Но если компьютеры обрабатывают исключительно электронные сигналы, то системы АТП будут способны работать с веществом, производя реальные продукты.

Сравнение АТП с вычислительной техникой может показаться грубым. Однако АТП имеет много общего с цифровой электроникой. Мы можем проследить параллели, начиная от общей основы, заключающейся в дискретном быстродействии, до только проявляющихся сходных черт в масштабах, скорости, себестоимости и универсальности применения. Там, где цифровая логика имеет дело с последовательностями битов, АТП — с группами атомов. Там, где цифровая логика полагается на наноразмерную электронику, АТП — на нанозамерные механизмы. Если цифровая революция привела нас к полному изобилию информации, то АТП приведет нас к полному изобилию материальных благ. История подсказывает, что в результате произойдет каскад изменений, которые приведут к обновленной версии мировой

цивилизации — назовем ее «Версия 2.0». Эти изменения будут не менее глубокими, чем те, к которым привела промышленная революция, но произойдут они с той же скоростью, с какой в нашу жизнь пришел Интернет.

АТП-революция постепенно ускоряется, и нам, как обществу, стоит незамедлительно и трезво оценить грядущие технологические перемены, учитывая доступные нам знания и понимая их ограниченность. Пока же даже основные факты об этом новом типе технологий скрыты от большинства за завесой заблуждений и научной фантастики.

Представьте себе, что вы живете не в наши дни, а в конце 1960-х гг. и рассуждаете о перспективах создания микрокомпьютеров на основе достижений в микроэлектронике. А теперь вообразите, что микроэлектроника и микробиология в сознании общества поменялись местами — и оно ожидает, что микробы будут производить вычисления, а микрочипы — давать инсулин. Для завершения картины добавьте популярные фантазии о генной инженерии, ужасных мутантах и армиях клонов...

Микро-то, микро-это — так ли во многом отличаются разные типы крохотных объектов? Правильный ответ — практически во всем. Между валунами, собаками, газонокосилками и компьютерами нет почти ничего общего, за исключением размеров, лежащих в метровом масштабе. Вещи, измеряемые в микронах или нанометрах, не менее разнообразны.

Как ни печально, но это ошибочное понимание микроэлектроники, которое я вас попросил представить, очень схоже с той путаницей, что сопутствует нанотехнологиям с конца 1980-х.

Но не стоит винить общественность в этой неразберихе. В последние десятилетия концепция нанотехнологий была растянута далеко за изначальные пределы, чтобы включить в себя широкий класс различных технологий, действующих в наномасштабе. В 2000 г. пропагандисты американской национальной нанотехнологической программы «продали» это сложносоставное

видение конгрессу США. Но через короткий промежуток времени они предложили новое определение миссии, исключив из него молекулярный уровень (являющийся базисом для атомарной точности). Таким образом, в определении «нанотехнологии» оказалось опущено, а точнее — выкинуто, то, без чего невозможно достичь изначальной цели, ради которой все и затевалось.

А теперь вообразите себе прессу, которая пытается распутать эту историю и рассказать ее пребывающей в замешательстве публике. Это оказалось ей не под силу. Возникшая неразбериха заслонила собой и суть важнейших технологий, и прогресс на пути к созданию АТП. Многие читатели будут удивлены, узнав о том, насколько далеко мы продвинулись вперед и как близко подошли к реальному атомарно точному производству.

Пришло время попрощаться с бессмысленно прожитыми годами и начать все заново.

Я приглашаю вас взять в руки эту книгу и отправить ее вместе со мной в путешествие в мир идей. Оно начнется с изучения общедоступных сведений, но дальше поведет нас по неизведанным дорогам, пролегающим через концептуальную область, в центре которой возвышается идея АТП. Эту идею мы рассмотрим с самых разных точек зрения — от научно-технологической до культурной, исторической, когнитивной и организационной. На пути к нашей цели мы сделаем небольшую остановку на «смотровой площадке» и бросим взгляд в прекрасное будущее, а также на то, что предстоит сделать, чтобы его достичь.

Моя цель заключается не в том, чтобы убедить вас, но в том, чтобы поднять вопросы, требующие безотлагательных ответов; не в том, чтобы заставить читателей изменить взгляды на мир, но в том, чтобы показать — будущее может значительно отличаться от господствующих сегодня ожиданий. Как минимум на некоторые из многочисленных вопросов я дам четкие ответы. И мы сможем наконец-то начать долгожданное обсуждение того, каким будет наше будущее.

Замечание (октябрь 2012 г.)

Немногим более тридцати лет назад я печатал на пишущей машинке текст, посвященный созданию общедоступной технологии производства с атомарной точностью. В 1981 г. подготовленная на его основе статья была опубликована в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Она положила начало весьма плодотворным исследованиям в предложенном мною направлении.

На следующий год уже с помощью компьютерной клавиатуры я набирал новый текст, в котором описывались перспективы технологии атомарно точного производства. Для ее обозначения я использовал слово «нанотехнология». В 1986 г., после внесения в текст множества исправлений и дополнений, моя книга увидела свет. Начиная с этого момента, события нагромождаются друг на друга, подобно катящемуся с горы снежному кому.

Сегодня я работаю на другом компьютере. По сравнению с первой моей машиной, у него в десять тысяч раз более производительный процессор, в сто тысяч раз больше оперативной памяти, и в миллион раз больше места на жестком диске — и все благодаря устройствам, построенным почти в атомарном масштабе.

За это время, пусть не на наших глазах и не нашими руками, размер структур, создаваемых с помощью технологий атомной манипуляции, вырос с сотен атомов до миллионов атомов. Новые развивающиеся технологии, о которых я писал в 1981 г., достигли стадии зрелости, и с этого момента начинается более быстрый прогресс.

Мы прошли долгий путь и оказались на скоростной автостраде. Пора оглянуться на оставшиеся позади верстовые столбы, изучить установленные на магистрали указатели и знаки и взглядеться в открывающуюся перед нами даль.

Часть I
Неожиданный мир



ГЛАВА 1

Атомы, биты и всеобщее благоденствие

Новые способы соединения мельчайших частей способны преобразовать самые широкие сферы человеческой деятельности. Так было, и так будет, причем гораздо быстрее, чем ожидает большинство людей.

ЕЩЕ не в столь отдаленном прошлом, если бы вам захотелось послушать дома скрипку, для исполнения этого желания вам понадобился бы сам музыкальный инструмент и человек, умеющий играть на нем. Если бы вам вздумалось добавить в сопровождение к скрипке виолончель — вам понадобились бы виолончель и виолончелист. Чтобы услышать звуки флейты, потребовались бы флейта и флейтист. Если бы вы пожелали услышать целый оркестр, вам понадобились бы дворец для размещения музыкантов и королевское богатство, чтобы вознаградить их.

В наши дни для того, чтобы наполнить комнату звуками музыки в исполнении симфонического оркестра (или гитары, или барабана с жильной струной), достаточно небольшой коробочки. Домашнее собрание музыкальных записей предлагает полное изобилие симфонических и эстрадных произведений, огромное богатство звуков и мелодий, извлекаемых с помощью самых разных музыкальных инструментов.

Оглянувшись в прошлое, мы увидим четкую грань между нашим прошлым и настоящим. За каждой скрипкой стоял мастер — крайнее звено в цепочке поколений ремесленников, уходящей вглубь веков. Каждый стремился улучшить звучание, отталкиваясь от предыду-

щего поколения инструментов. За каждым же современным устройством стоит новая глобальная отрасль, специализирующаяся на выпуске музыкальных машин, не имеющих никакой связи с традициями отбора резонирующего дерева, струн, канифоли и смычков. Зато в каждом выпускаемом отраслью устройстве содержатся кремниевые микросхемы, окруженные затейливым узором из множества других наноразмерных цифровых элементов — миллионов, а иногда даже миллиардов транзисторов, соединенных тонкими полосками металла.

* * *

В недалеком прошлом для того, чтобы напечатать слова на листе бумаги, необходимо было сначала аккуратно упорядочить кусочки металла, каждый из которых имел форму той или иной буквы. Если бы вам захотелось поменять размеры букв или шрифт, вам пришлось бы брать литеры из другого набора. Для того чтобы отобразить на бумаге иллюстрации, использовались гравированные металлические пластины. Для получения бумажного оттиска требовалось смочить пластину и набор чернилами, а затем поместить под достаточно большой пресс. Изготовление книги требовало многих часов и дней напряженной работы. Для того чтобы заняться книгопечатанием, необходимо было располагать полностью оборудованной типографской мастерской, кругом потребителей и существенных доходом, который позволял бы оплачивать труд рабочих.

Сегодня нам доступны настольные механические устройства, способные печатать любой текст любым шрифтом с любыми картинками. Не нужна ни типография, ни потребители, ни мастера-печатники. Тем самым появление принципиально нового устройства означало резкое расширение доступности бумажной печати.

В течение веков книгопечатание оставалось сферой, в которой, как и в случае с музыкой и традицией изготовления скрипок, секреты мастеров передавались

по цепочке от поколения к поколению. Мы сталкиваемся с появлением новой отрасли, означавшим полный разрыв с традициями прошлого. В «сердце» каждой печатной машины мы обнаруживаем цифровые элементы на кремниевых микросхемах.

* * *

Много лет назад, когда я еще учился в школе, чтобы провести научное исследование, нужно было обязательно посетить библиотеку, в которой были собраны различные печатные работы. Если библиотека находилась на расстоянии нескольких километров, это было не слишком удобно. Сегодня общедоступные устройства дают возможность ознакомиться с содержимым любых библиотечных журналов за считанные секунды. И снова за этим современным чудом скрываются кремниевые микросхемы и цифровые устройства.

Мгновенная отправка или получение почты, для которой не нужны ни грузовики, ни почтальоны? Возможность незамедлительно посмотреть кинофильм, без похода в кинотеатр? Разговоры с друзьями, находящимися за тысячи километров, без волшебства или магии? Все эти современные технологии были бы невозможны без наноскопических цифровых устройств, размещенных на кремниевых микросхемах.

Каждая из упомянутых выше технологий несет в себе двойной сюрприз. Во-первых, если мы попытаемся взглянуть на них из доиндустриальной эпохи, то сюрпризом является само их существование. Во-вторых, еще более глубокий сюрприз заключается в способах существования этих технологий в наши дни — имеется в виду их общая технологическая основа и огромное разнообразие решений.

Представьте, что вы вдруг оказались в далеком доиндустриальном прошлом. Как воспринимались бы современные технические достижения в то время? Скрипичных дел мастеру портативный проигрыватель iPod, скорее всего, показался бы явной нелепостью. Мастера-

печатника из XVII столетия наповал сразили бы функциональность и одновременно внешняя простота настольного принтера. Он воспринял бы это печатное устройство как нечто недоступное пониманию человека.

Перенесемся в середину XX в. — время накануне цифровой революции. Все современные технические решения уже не казались невероятными. Более того, в то время уже использовались устройства в значительной степени напоминающие современные:

- Воспроизведение музыки без музыкальных инструментов? — Фонографы.
- Бумажная печать без использования металлических литер? — Офсетная печать.
- Моментальная почта через многокилометровые расстояния? — Телеграф и телетайп.
- Разговоры через моря и океаны? — Кабели и телефоны.
- Просмотр фильмов на дому? — Кинопроекторы.

Библиотечные журналы на заказ? Такую возможность предвидел Ванневар Буш, незадолго до окончания Второй мировой войны предложивший настольное устройство для получения постраничных изображений документов, хранящихся на микрофильмах. Впрочем, создание библиотеки микрофильмов потребовало бы огромных затрат.

Для каждого из упомянутых выше технических решений концептуальным камнем преткновения были не цели, а средства; не идея прогресса в целом, а форма, которую он должен был принять, и то, насколько далеко он должен был бы зайти. Конечно же, в свете истории инженерного дела передовой музыкальный проигрыватель должен был стать улучшенной версией машины по воспроизводству звука, а не телетайпа, библиотеки или кинопроектора. И уж наверняка он вряд ли бы заодно выполнял функции пишущей машинки, чертежной доски, калькулятора, шкафа для хранения до-

кументов и фотоальбома, а также фотоаппарата, фильмотеки и прекрасно оборудованной «темной комнаты», да еще и вмещаая все эти устройства в одном небольшом корпусе.

В то же время все упомянутые мною функции (за исключением того случая, когда нам не достаточно экрана и нужно печатающее устройство) способна выполнять машина, которая в данный момент находится у меня под рукой. Вот что более всего поразило бы инженера, жившего в середине XX столетия, — предельная общность лежащих в основе всего цифровых устройств и машин, которые могут быть построены с использованием этой технологии.

До начала цифровой революции прогресс происходил в традиционных, довольно предсказуемых направлениях. Но бурное развитие цифровых информационных систем в сочетании с появившимся разнообразием периферийных устройств в корне изменило технологическую, экономическую и культурную составляющие нашей жизни.

Каждая составляющая этих систем функционирует на основе одного и того же принципа: синтеза сложных объектов из простых составных частей — нарезки звука из сэмплов, изображений — из пикселей. Эти составные части, в свою очередь, представляются в виде последовательностей двоичных битов, которые обрабатываются множеством элементарных наномасштабных устройств — транзисторов. Двоичный код — вот что объединяет все цифровые электронные системы.

Если компоненты ваших устройств имеют наноскопические размеры, то вы можете разместить на одной микросхеме миллиарды транзисторов, которые будут работать на частоте в несколько гигагерц. Такие микросхемы являются одним из примеров продукции нанотехнологий, в данном случае созданной для производства вычислительных устройств общего назначения.

В этом узком смысле наноразмерная цифровая технологическая революция уже произошла. Она принесла

нам полное изобилие, которое мы называем информационной революцией. Эти же фундаментальные цифровые основы открывают путь новому перевороту, также сулящему полное изобилие, причем не только информации, но и осязаемых, материальных благ.

От информационной революции к АТП

Атомарно точное производство (*atomically precise manufacturing*, АРМ, или АТП) способно сделать в отношении материальных объектов все то же самое, что цифровые технологии сделали для информации, звука и изображений. Это утверждение поднимает целый ряд вопросов, но сначала поговорим о возникающих параллелях.

Рассмотрим следующее описание цифровых технологий:

Цифровые технологии обработки *информации* используют наноразмерные *электронные* устройства, работающие на высоких частотах и производящие последовательности *битов*.

Изменяя время и заменяя некоторые слова, мы можем применить то же самое описание к технологиям, основывающимся на АТП:

АТП-технологии обработки *материалов* будут использовать наноразмерные *механические* устройства, работающие на высоких частотах и производящие последовательности *атомов*.

В первом приближении давайте воспринимать формирование молекулярной связи как детерминированную дискретную операцию, которая либо есть, либо нет — подобно тому как двоичный бит принимает значение либо «1», либо «0». АТП-система в этом приближении будет своего рода принтером, создающим объекты из образуемых атомами последовательностей — точно так же, как принтер рисует изображение капельками чернил. Возможности такого принтера ограничены лишь диапазоном имеющихся на входе материалов —

точно так же, как количество цветов ограничено количеством чернил. Хотя продукты изготавливаются с атомарной точностью (каждый атом помещается на определенное место), это не обязательно означает перемещения отдельных атомов. Вспомним, что в химии известны регио- и стереоспецифические реакции, в которых всегда образуются определенные молекулярные соединения, причем без «жонглирования» единичными атомами.

Параллель между АТП-процессами и цифровой логикой может быть расширена и на лежащие в их основе физические процессы, так как для достижения точных надежных результатов обоим необходима защита от помех. В инженерном смысле помехозащищенность означает, что в системе возможны незначительные искажения на входе, не влияющие на результат. Примером такой помехозащищенной системы является воронка, способная направить немного неправильно помещенный шар в единственно верное отверстие. В механически направляемых химических процессах траектория движения молекулы ограничена упругим взаимодействием, эффективно направляющим молекулу к желаемой цели. Таким образом, упругое взаимодействие играет роль барьера, способного экспоненциально подавлять термодинамические флуктуации координат. И в нанoeлектронных, и в наномеханических системах может быть спроектирован такой запас помехоустойчивости, который будет превосходить величину возмущений, в результате чего количество ошибок снижается до менее чем одной на триллион.

Как и в случае с цифровыми системами, потенциальная мощь АТП обусловлена способностью производить сложные объекты из элементарных частей. Если представить, что музыкальное устройство (в широком смысле) способно воспроизводить любой набор звуков, а печатная машина (в широком смысле) обладает неограниченным набором чернил, то и АТП-система (в широком смысле) может создавать любой физиче-

ский объект, давая непревзойденную материальную свободу.

Однако есть ключевое отличие.

Аудиосистемы воспроизводят сложные полифонические звуки. Но наш мир не состоит только из звуков.

Печатные системы способны печатать сложные чернильные рисунки. Но наш мир не состоит только из чернил.

А вот атомарно точные производственные системы будут способны производить сложные материальные объекты, аудиосистемы, принтеры и технологическое оборудование. В общем, все то, что изготавливается нами сегодня, и многое-многое другое.

Возможно, даже скрипки.

* * *

Читатели имеют полное право задать вопрос: «Если АТП действительно может найти широкое практическое применение, и если она имеет прекрасные перспективы в обозримом будущем, почему нам известно о ней так мало?» Ответ на этот вопрос можно получить только через призму истории ключевых идей, науки и политики, которые тесно переплелись между собой. Понимание прошлого поможет нам правильно оценить современное состояние мира и разглядеть перспективы неожиданного будущего.

Путешествие к истокам идей

ИСТОРИЯ нанотехнологий уходит в прошлое более чем на 25 лет, напоминая мне ткань, сотканную из множества нитей: науки, технологий, мифов, достижений, отсрочек, денег и политики. В ней есть место и появлению идей, и их противостоянию поп-культуре, и развитию научных дисциплин, и их столкновению с научными традициями, и обещаниям, и их нарушению, и в результате — появлению нового видения. Я был в гуще событий с самого начала.

Надежды, возлагаемые на нанотехнологии, как реальные, так и мнимые, во многом определены ее прошлым. Для того чтобы понять выбор тех или иных направлений развития и трудности, которые предстоит преодолеть, необходимо оглянуться в прошлое. Наша история начнется с открытия потенциала будущей технологии, вытекающей из известных физических принципов.

В начале этой истории не было ничего особенного. Идея, послужившая отправной точкой развития нанотехнологий, впервые была представлена в моей научной статье, опубликованной в 1981 г.¹ В ней я описывал вероятные пути развития атомарно точного производства, начинавшиеся с биомолекулярной инженерии и подведшие нас к фундаментальному принципу АТП: использованию наноразмерных устройств для направле-

1. «Molecular Engineering: An Approach to the Development of General Capabilities for Molecular Manipulation», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 78, no. 9 (1981): 5275–5278.

ния движения реакционно-способных молекул с целью сборки крупных комплексных структур и механизмов. Эта концепция, которой сразу нашлось немало применений, быстро привела меня к большему.

В 1986 г. вышла в свет моя книга *Engines of Creation* («Машины созидания»), в которой я представил свои идеи широкой общественности. В ней давалось имя новой области и описывалось мое первоначальное видение нанотехнологий. Через шесть лет я предложил обновленное видение, изложив его в техническом анализе (по объему сравнимом с книгой) по результатам моей диссертационной работы в Массачусетском технологическом институте. Тем не менее «искрой», из которой разгорелось «нанотехнологическое» пламя, остаются *Машины созидания*². Высказанные мною идеи привлекли всемирное внимание и подняли волну небывалого ажиотажа, способствовавшего образованию новой области научных исследований и выделению средств на ее изучение. По мере развития сюжета, мы увидим, как пересеклись друг с другом начальное видение и развивавшаяся область исследований.

О миссии, которая привела в библиотеки

Путь, по которому я пришел к концепции АТП, был путешествием идей. Движущей силой стало любопытство, а выбор направления был обусловлен ощущением моего собственного предназначения, сформировавшимся под влиянием тревог за судьбы Земли, нараставших во всем мире на протяжении нескольких поколений. Впервые я осознал его как необходимость участия в усилиях, требующихся для того, чтобы предотвратить будущую ми-

2. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* (New York: Doubleday, 1986); *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (Hoboken, NJ: Wiley/Interscience, 1992).

ровую катастрофу, неизбежную в том случае, если промышленная цивилизация столкнется с ограниченностью ресурсов нашей планеты. В чем оно могло бы состоять? В исследовании технологий, способных изменить сложившуюся ситуацию, в тщательном их изучении с помощью инженерных и научных инструментов и в распространении полученных знаний другими людьми.

Ощущение собственного предназначения пришло ко мне еще в старших классах школы (прекрасное время для грандиозных планов, не правда ли?), окончательно сформировавшись в 1970 г., когда впервые отмечался День Земли.

Мне вспоминается утренняя велосипедная поездка длиной в 65 км в инженерную библиотеку и обратно. Эта поездка, повторявшаяся не раз в течение лета, служила прекрасной иллюстрацией того, о чем стоит беспокоиться, — среди залитых солнечным светом, изнывающих от жары сельских холмов Орегона оставался лишь небольшой кусочек спасительной древесной прохлады как память о давно исчезнувших лесах.

Сельскохозяйственные земли заняли всю долину Вилламетт, от холмов и до дальних гор. Мне казалось, что я вижу, как промышленный рост истощает ресурсы, поглощая все больше плодородных земель, как растущее население все сильнее приближается к истощению ресурсов планеты.

В то время мне казалось, что я вижу возможный выход. Совсем недавно человек сделал первые шаги по лунной поверхности и надежды освоения дальних планет достигли своей наивысшей точки. Мне казалось, что наиболее заманчивые перспективы открываются нам не на бесплодной поверхности таких планет, как Марс (схожих с Землей, но непригодных для обитания человека), а в Большом Космосе, на залитых солнцем пространствах с новыми ресурсами, ожидающих прикосновения земной жизни, подобно тому как земные континенты ожидали выхода на поверхность жизни, впервые зародившейся в океанских пространствах.

Это видение человеческого будущего, известное как «освоение космоса», основано на прогрессе во множестве отраслей науки и техники. Изучение возможностей, открывающихся для человечества в космосе, с самого начала потребовало ответов на вопросы, получить которые можно было только посредством анализа и количественной оценки различных технологических концепций, которые, в свою очередь, многим послужили пищей для воображения.

В то время вычислительные мощности компьютеров не слишком превосходили счетные способности людей. В поиске знаний и ответов на возникавшие вопросы я отправился по библиотекам. Действительно полезная библиотека должна быть сравнительно крупной. Находившаяся ближе всех к моему дому открытая библиотека Орегонского педагогического колледжа не могла похвастаться подборкой книг по космическим научным дисциплинам. Но дорога, пролежавшая через сельскохозяйственные угодья, вела меня в Университет штата Орегон. В университетской библиотеке можно было найти книги, посвященные наукам о космосе, а также проектированию и использованию космических систем. Из них я узнал о принципах создания космических аппаратов и о вечных физических принципах, лежащих в основе всех инженерных наук.

Исследования космоса были для меня не «пунктом назначения», но своего рода картой. Для освоения космоса потребовались бы новые методы производства, применимые в новых средах, и нужно было понять, какие существуют возможности для дальнейшего развития. Говоря отвлеченно, изучение перспектив освоения Вселенной стало для меня дорожной картой, приведшей меня из космоса в наномир.

Оглядываясь назад на 40 лет научной работы, я вижу одно общее направление. Одно и то же чувство предназначения направляло меня по жизненному пути сначала в сторону космических исследований, затем — в сторону передовых нанотехнологий, а сегодня — к компьютер-

ной клавиатуре, которая поможет мне поделиться своими знаниями с читателями.

Так откуда взялось это чувство предназначения? Отчасти оно было связано с широко распространенными тревогами относительно состояния мира, отчасти — с определенным периодом в развитии науки и технологий. Если мы обратимся к истории развития космической технологии и молекулярной науки, то за три года до моего рождения Джеймс Уотсон и Фрэнсис Крик построили спиральную модель ДНК, а первый искусственный спутник был запущен на околоземную орбиту командой под руководством Сергея Павловича Королева всего через два года после моего появления на свет. Моя мама, Хейзел, думала, что я непременно заинтересуюсь новостями о первом спутнике. Поэтому она вырезала эти публикации из газет и бережно хранила. К тому же в детстве мама «посадила» меня на диету из научной литературы и научной фантастики. Я был обречен на интерес к космосу.

Эта книжная диета сформировала мое видение будущего. Но чувство цели возникло у меня благодаря зарождавшемуся в то время экологическому движению. На моей книжной полке рядом с трудами о космическом пространстве нашлось место книгам на такую тревожную тему, как совокупный экологический эффект от распыления на сельскохозяйственных угодьях миллионов тонн хлорорганических пестицидов, количество которых многократно превышало необходимую дозу для уничтожения вредных насекомых. Эти ядовитые вещества не распадались годами, накапливались в тканях животных, становившихся добычей хищников, и передавались дальше по пищевой цепочке, причем с увеличивающейся концентрацией в каждом последующем звене. Я узнал об этом из опубликованной в 1962 г. и приобретшей широкую известность книги Рэйчел Карсон *Silent Spring* («Молчаливая весна»), которая, как принято считать, положила начало экологическому движению. Сначала ее прочитала Хейзел, а по-

том и я. Знакомство с «Молчаливой весной» возымело должный эффект, и в апреле 1970 г. мы с одноклассниками приняли участие в первом Дне Земли в форме небольшого школьного мероприятия.

Через два года я познакомился с книгой, глубоко изменившей мое мировоззрение. Это был опубликованный в 1972 г. доклад Римскому клубу под названием «Пределы роста» (*Limits to Growth*)³. Его авторы поставили перед собой дерзкую цель: они попытались смоделировать динамику глобального роста, рассматривая его как взаимосвязанный процесс и исходя из предположения, что технологии, ресурсы и реакция природной среды будут оставаться в оправданных границах. В соответствии с «Пределами роста» первоначальный экспоненциальный рост экономики должен был закончиться катастрофой, ожидавшей человечество уже в середине XXI столетия. Вопреки утверждениям позднейших критиков, авторы не настаивали на абсолютной точности своих прогнозов. Они достаточно скромно заявляли, что использовавшиеся модели «указывали на тенденции в поведении системы»: рост, истощение и крах. Изменение начальных параметров в разных сценариях приводило к столкновению с одним или несколькими пределами, но ничем не стесненный рост неизменно приводил к катастрофе.

Впоследствии критики предпринимали попытки опровергнуть выводы «Пределов», указывая, что их авторы ошибочно предсказали крах мировой экономики в конце XX в. Критики были не правы — катастрофа не предусматривалась даже в наихудшем сценарии. Более того, предложенный авторами основной сценарий во многом правильно описывает ситуацию, сложившуюся в мире в начале XXI столетия.

В начале 1970-х гг. мальтузианские по своему характеру прогнозы «Пределов роста» выглядели более чем

3. Donella H. Meadows, *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind* (New York: Universe, 1972).

вероятными. Те, кто воспринимал их всерьез, были уверены, что в крышку гроба для человечества вколочен последний гвоздь. Но, на мой взгляд, каждой из рассматривавшихся в «Пределах» моделей был присущ один общий недостаток, имевший решающее значение: в своих моделях мирового экономического развития авторы рассматривали только ресурсы нашей планеты. Иными словами, авторы «Пределов» оставили без внимания всю Вселенную — и это в то время, когда люди делали первые шаги по Луне и пытались изучать с помощью космических аппаратов другие планеты, Национальное агентство по авионавтике и исследованию космического пространства США (НАСА) обещало сделать доступ в космос более дешевым. Это было время дерзких мечтаний. Казалось, еще немного и человечество покорит другие миры за пределами Земли.

Видение авторов «Пределов роста» показалось мне ограниченным. И я взялся за изучение того, что могло бы находиться за пределами очерченного в «Пределах» мира — сначала вовне, в глубоком космосе, а затем внутри, где я наткнулся на потенциал технологий наноразмерного мира.

По окончании школы я поступил в Массачусетский технологический институт (МТИ). Мои школьные оценки были не слишком высокими, но экзамены я сдал хорошо, и этого оказалось достаточно.

Совсем скоро я почувствовал себя в МТИ как дома; окружающие прекрасно понимали то, о чем я говорил, и помогали мне пополнить запас знаний, а библиотечные полки мне казались бездонными.

Не так много людей в МТИ разделяли мое убеждение о том, что следует в первую очередь концентрироваться на освоении ресурсов дальнего космоса, относясь к планетарным поверхностям лишь как промежуточной цели. Почему-то мои слова не вызывали особого интереса, и я начал сомневаться в своей правоте. Не ошибся ли я в своих оценках космических перспектив? Или мои более информированные старшие коллеги упускали

из виду нечто важное, потому что искали ответы на неправильно поставленные вопросы?

Я обнаружил, что действительно очень немногие задают себе правильные вопросы и немногие анализируют правильность ответов на них. В НАСА и других космических агентствах инженеры и специалисты по планированию искали ответ на вопрос: «Каким образом мы будем исследовать другие планеты, более всего похожие на Землю, и выживать на них?» Мой вопрос звучал совсем иначе: «Где мы могли бы найти такие внешние условия, которые позволили бы устойчиво развиваться промышленной цивилизации?» На разные вопросы давались отличные друг от друга ответы. Я полагал, что освоение космического пространства не имеет непосредственной связи с освоением далеких планет.

В поисках ученого, который разделял бы мое видение скрытого потенциала мира за пределами Земли, я попросил куратора первого курса направить меня к человеку, который мог бы знать хоть кого-нибудь, кому было бы известно хоть что-то о подобных идеях. И сам куратор, и профессора, к которым он меня направлял, предложили обратиться к весьма уважаемому в МТИ физику Филипу Моррисону. После второй рекомендации я набрался смелости постучать в дверь его кабинета. Моррисон действительно разбирался в теме и знал нужных людей.

Он направил меня к профессору физики Принстонского университета Джерарду О'Нейлу, который как раз в то время, так уж получилось, занимался организацией конференции, посвященной освоению космического пространства. Наши точки зрения по этому вопросу имели много общего. Дж. О'Нейл рассматривал в качестве места для земной жизни не другие планеты, а само космическое пространство, предлагая различных способы предотвращения катастрофического столкновения человеческой цивилизации и пределов роста, которые ставит нам Земля. Его не слишком интересовали проблемы материалов и производства. Основное внимание

уделялось идее, поражавшей воображение публики — грандиозному и в высшей степени *наглядному* образу новых «земель», которые человечество будет создавать в открытом космосе⁴. Используя данные о свойствах солнечного света, стекла, зеркал и стали, использовавшейся для строительства мостов, Дж. О'Нейл провел и опубликовал расчеты геометрии, освещенности, атмосферного давления, центростремительного ускорения и структурной массы огромных цилиндрических структур, имевших характерные размеры порядка километров. Как предполагалось, космические места обитания будут открытыми пространствами, достаточно большими, чтобы здесь создавались города и фермы, залитые солнечным светом. Предусматривалось создание искусственной гравитации и посадки саженцев, чтобы через некоторое время здесь появились собственные леса. Вероятно, самым важным было то, что идея Дж. О'Нейла вдохновила художников на создание картин, на которых космос был очень похож на Землю, изображений, захвативших воображение публики.

Я был первокурсником, и моя роль в организации первой Принстонской конференции по колонизации космоса (впоследствии по просьбе Государственного департамента НАСА изменила это понятие на «заселение космоса») была совсем незначительной. Одним из ее результатов стало формирование особого сообщества, представлявшего собой эклектичную смесь студентов, университетских исследователей, инженеров авиакосмической отрасли и экологов. Впоследствии были созданы научные группы, проводились летние школы,

4. По Дж. О'Нейлу материалы для строительства должны были добываться из источника, постоянно «маячившего» перед людьми — имела в виду Луна. Я выступал за использование более привлекательных ресурсов, извлекаемых из менее харизматичных астероидов. Первоначально идея добычи полезных ископаемых на астероидах пользовалась незначительной поддержкой. Но в наши дни полеты на астероиды вошли в планы НАСА до 2025 г., до возвращения человека на Луну.

публиковались доклады, материалы конференций, обзоры в прессе, критические статьи. Возникло довольно популярное движение.

Идея заселения космоса вступила в сильный резонанс с общественными идеями в период, когда внимание человечества было привлечено к вопросу о материальных основах собственного существования. Общая озабоченность земными пределами роста придавала импульс космическому движению. Космос — это бескрайнее пространство, в котором достаточно места и ресурсов для жизни тысячам планет, подобных Земле. Этот физический потенциал предлагает новый путь для цивилизации, которая способна в течение ближайших нескольких столетий исчерпать ресурсы планеты, оказавшись перед лицом неминуемой катастрофы⁵. Более того, освоение свободного космического пространства могло бы помочь снять с биосферы бремя промышленности, открывая тем самым возможность для восстановления природы Земли.

В середине 1970-х гг. в мире начался «энергетический кризис». Возникшая благодаря действиям стран — членов ОПЕК нехватка нефти наглядно показала идею ограниченности ресурсов Земли и подстегнула поиск путей выхода за их пределы. Инженеры выступили с идеей о том, что солнечная энергия, получаемая из космоса, способна конкурировать с наземными источниками. НАСА и Министерство энергетики США выделили авиакосмическим фирмам средства на проведение исследований, проектирование и анализ потенциальных возможностей околоземных солнечных электростанций. Идея создания крупных искусственных спутни-

5. Но и он, конечно же, не бесконечен, ведь в главном Т. Мальтус был прав. Но, выигрыш времени для десятков поколений представляется полностью оправданным. Возможно, приобретенные человечеством в этот период знания и опыт позволят преодолеть и будущие ограничения. На длинной дуге истории случались и более странные вещи.

ков из доступных в околоземном пространстве ресурсов оказалась заманчивой, и вскоре она стала частью концепции создания космических поселений.

Широкомасштабное космическое строительство потребовало бы размещения в космосе производственной базы и комплексной инфраструктуры, необходимой для космической индустриализации.

Наука и космос для промышленного производства

Промышленное производство — основа существования современного общества. Продукты питания и одежда, жилье, путешествия и другие удобства повседневной жизни — все это и многое другое основывается на продукции промышленного производства, степень автоматизации которого постоянно возрастает. Космические общества должны будут еще больше зависеть от промышленности, так как в космосе, помимо всех необходимых материалов, нужно производить еще почву и воздух. Поэтому в центре внимания исследований по заселению космоса очень быстро оказались вопросы добычи различных материалов, их очистки и обработки.

В МТИ я специализировался на изучении программы под названием «Междисциплинарная наука», в значительной степени вращавшейся вокруг промышленности и сельского хозяйства — их функционирования на Земле и возможности изменения для соответствия принципиально иной внешней среде. Изучение этой области требовало понимания фактов и методик, относившихся к большому числу различных областей науки. Некоторые из принципов описывали макроскопические феномены, такие как физика тепло- и массопереноса, а другие относились к молекулярному миру и основам материаловедения. Иные темы включали в себя изучение метеоритов и планетоведение, физиологию растений, создание и управление экосистемами, фотоволь-

таику и солнечную энергетику, вакуумную металлургию и ректификацию стали, свойства материалов, способных выдерживать температуру солнечной «печи», и способам адаптации земных промышленных процессов с целью изготовления стекла и выплавки металлов из лунного грунта.

Одно из изучавшихся нами направлений привело меня в наноразмерный мир. Это было проектирование солнечных парусов — вращающихся структур, шириной несколько километров, покрытых листами из тонкой металлической пленки, способные использовать давление солнечного света для перемещения космических аппаратов в течение многих лет с небольшим, но устойчивым ускорением без использования топлива.

Солнечными парусами я занимался в течение нескольких лет, результатом которых стала защищенная мною в МТИ диссертация. Физические расчеты показывали, что для эффективного захвата и отражения солнечного излучения солнечные паруса должны были состоять из листов алюминия толщиной не более 100 нанометров (примерно 300 диаметров атома). Расчеты и библиотечные исследования привели меня к выводу, что пленки такой толщины будут выполнять свое предназначение только в том случае, если они изготавливаются и устанавливаются в космическом вакууме. Но расчеты не смогли убедить меня, что столь тонкие пленки способны «пережить» процесс производства. Поэтому я изучил возможность их изготовления с помощью вакуумного оборудования, в котором алюминий атом за атомом осаждался из газовой фазы на подложку. Обращаться с полученными пленками необходимо было очень осторожно. Пытаясь освободить полученный продукт, я разрывал одну пленку за другой. Стоило прикоснуться к ней, как тонкая пленка оборачивалась вокруг кончика пальца, заполняя каждую впадинку в коже. При этом ее присутствие на пальце вообще не ощущалось. Оказавшись в воздухе, фрагменты пленки свободно парили, подобно пыли, но отражали свет как алюми-

ниевая фольга. В конце концов я научился поднимать и монтировать эти тонкие пленки в специальные рамки (и даже продемонстрировал несколько образцов на презентации в Лаборатории реактивного движения НАСА в Пасадене). Благодаря полученному практическому опыту, я узнал достаточно для того, чтобы прийти к заключению, согласно которому размещенное в космическом пространстве автоматизированное оборудование могло в огромных количествах производить металлическую пленку для солнечных парусов.

Источником метода, который я применил, были книжные полки Научной библиотеки МТИ, а полученные в институте научные знания открыли мне возможность создания вещей «снизу-вверх», атом за атомом.

Интерлюдия: Артур Кантровиц

Много лет назад мой доклад о заселении космоса привел к созданию в МТИ группы по исследованию условий жизни в космосе. Большинство ее членов были студентами. Но однажды вечером к нам на заседание пришел человек с седой головой. С тех пор он занял уникальное место в моей жизни.

Артур Кантровиц был физиком и инженером, приглашенным профессором МТИ, основателем и руководителем Исследовательской лаборатории Авко-Эверетт. Я полагаю, он был мудрым человеком. Артур родился в 1913 г., и когда мы познакомились, он был старше, чем я теперь. Он стал моим наставником и другом.

В течение многих лет Артур участвовал в формировании моих взглядов на мир, на то, как он функционирует, и на то, что является действительно важным. Он помог мне понять глубинную природу научных знаний и научных норм, а также беспокойный процесс, ведущий к созданию новых технологий. Артур поделился со мною знаниями о грязной стороне этого процесса, о секретности и коррупции, которые могут процветать в точ-

ке пересечения политики, денег и технологий. Помимо этого он рассказывал о своем понимании глубинных стимулов и культурных проблем, а также о собственном опыте попыток институциональных реформ.

Оглядываясь назад, я вижу, насколько сильно мое мироощущение отражает ценности моего наставника.

Артур добился огромных достижений в различных технологических сферах. В 1950-х гг. его изобретения помогли решить проблему сверхзвукового входа в плотные слои атмосферы (газета *New York Times* назвала его «одним из первых технологических героев космической программы»). И это при том, что в его юности практическая авионавтика концентрировалась на создании бипланов из дерева и ткани.

Возглавляя ведущие научно-исследовательские группы, Артуру удалось одним из первых добиться прогресса в целом ряде областей, включая создание лазеров большой мощности, сверхзвуковых молекулярных пучков, магнетогидродинамических генераторов и внутриаортального баллонного насоса, который он создал вместе со своим братом Адрианом. Этот аппарат искусственного кровообращения сегодня широко применяется во всех крупнейших кардиологических центрах.

Дерзновенность мышления была присуща Артуру с юности. В 1939 г. он с коллегами, работавшими в лаборатории, известной сегодня как Исследовательский центр НАСА в Лэнгли, создал первый прибор для изучения перспектив магнитно удерживаемого термоядерного синтеза; в 1963 г. он пришел к выводу, что использовавшийся подход уперся в «кирпичную стену» в виде нелинейной неустойчивости плазмы. Через пятьдесят лет, в наши дни, физикам так и не удалось найти решение проблемы неустойчивости. Артур был смелым и настойчивым исследователем, но знал, когда приходит время остановиться.

Артур получил опыт участия в космических программах и как рядовой сотрудник, и как руководитель. На начальном этапе осуществления программы «Апол-

лон», он был членом президентской комиссии, оценивавшей денежные и временные затраты, а также риски разработки конкурирующих подходов к высадке человека на Луну. В 1970-х Артур проявлял пристальный интерес к различным проблемам освоения космического пространства, участвовал в дискуссиях, деятельности различных, связанных с космосом организаций, участвовал в разработках и проектировании высокоэффективных систем запуска небольших полезных нагрузок, а также консультировал студента МТИ, усвоившего, по крайней мере, часть знаний, которыми он мог поделиться.

Артур посоветовал мне познакомиться с трудами философа науки Карла Поппера, предложившего принцип, согласно которому наука способна проверять те или иные идеи, асимптотически приближаясь к истине, но не имея возможности выдвинуть универсальную количественную теорию. По мнению К. Поппера, интеллектуальная жизнь состоит из выдвижения смелых предположений и их критики, основывающейся на результатах строгих всесторонних проверок. В результате попыток разобраться с точкой зрения К. Поппера на эпистемологию (а также с работами его критиков) у меня выработалась привычка всегда тщательно проверять основные знания и в науке, и в инженерной сфере. Внимание к методологии стало неременным атрибутом всех моих исследований, посвященных выявлению потенциала физических технологий.

Артур одновременно принадлежал и прошлому, и будущему. Во времена усиливавшейся специализации он оставался ученым с широким кругом интересов. В пору нараставшей осторожности он оставался смелым исследователем. Несмотря на непрерывно усиливавшуюся зависимость науки от финансирования и политики, Артур публично защищал глубинные ценности, лежащие в основе научной работы.

В то же время общение с Артуром стало причиной того, что у меня сформировалось ошибочное представление о мире. По умолчанию, бессознательно, я пришел

к выводу, что в науке гораздо больше людей, похожих на моего наставника, чем на самом деле.

Артур Кантровиц умер в Нью-Йорке от сердечного приступа в возрасте 95 лет. Как мне рассказали, свои последние часы он провел в окружении членов семьи, будучи в сознании. Его жизнь поддерживалась благодаря устройству, с которым Артур был прекрасно знаком — внутриаортальному баллонному насосу. Сегодня мне не хватает его гораздо сильнее, чем я когда-либо мог предположить.

Культура количественно выраженных мечтаний

За годы совместной работы с Артуром и другими членами сообщества космических систем я научился мышлению, основанному на сочетании творческого видения и материального, количественного обоснования, позволяющему реально оценить возможные достижения в новых областях инженерного дела.

Эволюция инженерного сообщества космических систем происходила параллельно развитию самих этих систем. Ракетносители и лунные корабли выросли из количественно выраженного инженерного видения, системных идей, которые переносились в чертежи, оценивались и отбрасывались или принимались. Это эволюционное развитие в чем-то напоминало дарвиновский процесс естественного отбора. В «награду» самые лучшие идеи получали время и внимание, необходимое для детальной проработки, оптимизации конструкций и более тщательного анализа. После всех доработок и проверок концепты вступали в конкуренцию на новом уровне. Главным призом становилась детальная спецификация, воплощавшаяся «в железе» на заводе. А затем на космодроме раздавался грохот и поднимался столб огня. Конструкция уносилась в небо, означая, что первоначальное видение стало реальным.

Например, прежде чем президент Дж. Кеннеди принял решение о начале осуществления в США программы «Аполлон», были проведены исследования сотен различных способов сборки ракетных двигателей и топливных баков, чтобы создать системы, способные достичь Луны. Каждую важную космическую миссию предваряла схожая борьба идей за выживание.

Участие в этих играх требует сочетания творческого подхода и скептической оценки, когда внимание уделяется и знаниям, и неопределенности. В инженерном проектировании на системном уровне критической оценке должны подвергаться все предположения, все расчеты, а также диапазон неопределенности, идет ли речь об эскизах или более детальных спецификациях. Неопределенности могут быть и фатальными, и незначительными. Часть из них может быть компенсирована, в то время как другие становятся основанием для начала новых исследовательских программ. Например, в одной из программ, осуществлявшихся в рамках исследований, предшествовавших первым космическим полетам, было установлено, что спускаемый аппарат должен будет на сверхзвуковой скорости войти в плотные слои атмосферы, в результате чего его обшивка разогреется до температуры, сравнимой с жаром на поверхности Солнца. Эта проблема возвращения была успешно решена Артуром Кантровицем, ответив на вопросы скептиков и сузив диапазоны инженерной неопределенности, открыв возможность более детальной и достоверной разработки систем.

Мои воззрения на взаимосвязь проблем сложности, неопределенности и дизайнерского эксперимента во многом сформированы этой культурой инженерной разработки космических систем. Так я обратил свое внимание на молекулярные технологии.

В те годы сообщество инженеров, занятых освоением космоса, получало финансовую поддержку федерального правительства и имело возможность разрабатывать рассчитанные на десятилетия планы создания спут-

ников, преобразовывавших солнечную энергию в электрическую, а также космических жилых модулей. Их результаты были использованы нашими наследниками, теми, кто, получая меньшие средства, спроектировал и построил космический челнок. В том мире нашлось бы место и солнечным парусам. Но меня заинтересовало другое исследовательское направление. Я отвлекся от космических проблем и переключился на изучение потенциала меньших по размеру, но более сложных вещей — не протяженных, но тонких листов алюминия, а наноразмерных устройств и механизмов, которые могли в будущем стать плодами прогресса в сфере молекулярных технологий⁶.

И вновь, уже в молекулярной области, у меня возникло чувство, что внимание экспертов сосредоточено на сиюминутных вопросах, а не на важнейших проблемах долгосрочного развития. Мне казалось, что будучи погружены в свою работу, специалисты не замечают всей картины, не видят, куда привели бы их исследования, если бы результаты были обобщены и использованы для достижения других целей. Как и в случае с исследованием потенциала космического пространства, чтобы задать вопросы и получить ответы, необходимо было задействовать принципы системной инженерии, а также изучить возможности изготовления вещей в незнакомом мире. И вновь я обнаружил последствия для человеческого будущего такого масштаба, который невозможно было игнорировать.

То же самое чувство предназначения, которое подвигло меня на изучение потенциала космоса, затиало меня в молекулярный мир. Объем научных знаний об этом мире был огромен и непрерывно пополнялся.

6. На этот путь меня натолкнуло знакомство со статьями, публиковавшимися в журналах *Science* и *Nature*, а также изучение материалов специализированных изданий, таких как *Angewandte Chemie*, которые можно было найти на полках библиотеки МТИ.

ГЛАВА 3

От молекул к наносистемам

ДОВОЛЬНО часто идея создания вещей с атомарной точностью воспринимается людьми как дело далекого будущего, хотя в действительности она была осуществлена гораздо раньше, чем идея полетов в космос или по воздуху на деревянных бипланах. История атомарно точного производства начинается более ста лет назад, в самом начале эпохи ускоряющегося прогресса.

К 1899 г. химики уже научились создавать различные структуры с атомарной точностью; при этом они хорошо понимали природу своих действий, атом за атомом, связь за связью правильно отражая их на рисунках. Например, было известно, что атомы углерода образуют четыре связи, как правило, направленные к углам тетраэдра, а образуемые ими молекулы характеризуются хиральностью, то есть могут принимать право- и левосторонние формы. Химики знали, что углерод способен образовывать двойные связи, а молекула бензола состоит из кольца, образуемого шестью эквивалентными атомами углерода. Известно было, что к этим кольцам могут быть присоединены метиловые группы, в результате чего у соединений могут быть различные молекулярные изомеры. Это был замечательно высокий уровень знаний, учитывая, что еще никому не удалось увидеть молекулу.

В то время были разработаны первые систематические методы изменения молекулярных структур и хи-

мики использовали эти методы для установления структур самих молекул — сегодня такой подход мы называем опытным обучением.

Конечно же, идея атомов известна с античных времен. Приблизительно в 400 г. до н.э. древнегреческий философ Демокрит утверждал, что в конечном счете материя должна состоять из неделимых частиц вещества — что почти соответствует современному пониманию атомов, за вычетом нашего знания о ядерных реакциях. В Древнем Риме поэт и философ Тит Лукреций Кар (около 50 г. до н.э.) предположил, что «танцы» частиц пыли, которые мы можем наблюдать в солнечных лучах, в действительности представляют собой то, что мы сегодня называем «броуновским движением», то есть результат столкновений атомов (и он был совершенно прав в отношении некоторых форм движения). В наши дни самые передовые методы атомарно точного производства опираются на эти заставляющие молекул перемещаться броуновские «танцы».

Со времен античности прошли столетия, прежде чем был сделан следующий шаг вперед в понимании атомарной основы материального мира. Важная веха была пройдена в начале XIX столетия в Англии, когда Джон Дальтон, наблюдая за химическими реакциями, заметил, что участвующие в них вещества сочетаются в постоянных пропорциях, и объяснил устойчивость этих соотношений в терминах атомов. Дж. Дальтон постулировал, что каждое чистое химическое соединение состоит из частиц — «молекул», содержащих в себе постоянное количество атомов одного или нескольких видов. Опираясь на знание наблюдавшихся пропорций, химики установили атомарный состав молекул различных веществ. Таким образом, были выведены формулы углекислого газа (CO_2), воды (H_2O) и так далее. Важные результаты были достигнуты и в другом направлении исследований. Были открыты законы расширения и сжатия газов в результате изменения давления и температуры, объяснявшиеся с точки зрения перемещения

молекул под воздействием тепловой энергии — то же самое тепловое движение, что является причиной броуновского движения.

Круг полученных косвенных фактических свидетельств непрерывно расширялся благодаря наблюдениям за результатами различных химических реакций (их счет шел на десятки, сотни и тысячи). Тем самым химики получили возможность выдвигать и проверять гипотезы об атомарной структуре молекул. Систематические эксперименты послужили исходным пунктом создания технологии органического синтеза — атомарно точного производства различных веществ, изменившего промышленность, медицину и, как следствие, повседневную жизнь людей. Еще более впечатляющие примеры атомарно точных структур демонстрирует биология — некоторые функциональные устройства стали именоваться молекулярными машинами.

Концепция молекулярных механизмов возникла в середине XX столетия. Она родилась из попыток понять принципы функционирования энзимов и соответствия биомолекул друг другу. Но еще в начале 1890-х гг. немецкий химик Герман Эмиль Фишер, изучавший процесс отбора энзимами специфических молекулярных субстратов из моря содержащихся в клетке различных молекул, предложил модель, получившую известность как «ключ-замок». Это предположение Г. Фишера стало первым шагом в познании механизмов, позволяющих комплементарным макромолекулярным формам добиваться соответствия друг другу специфических частей и выполнять полезные действия.

Исследования по молекулярной биологии, проводившиеся с начала 1950-х, способствовали расширению и углублению знаний об установлении связей, движении и целевых функциях крупных молекул, таких как протеиновые наноразмерные объекты, способные копировать цепочки ДНК в ядрах клеток или натягивать белковые волокна в мышцах. В начале 1950-х Френсисом Криком, Джеймсом Уотсоном и Морисом Уилкин-

сом было установлено строение молекулы ДНК, за что они получили Нобелевскую премию. Такой же награды за использование методов рентгеноструктурного анализа для создания первых атомарно точных карт белковых структур были удостоены Джон Кендрю и Макс Перуц. С течением времени была установлена атомарная структура все большего количества биомолекул, и сегодня их счет идет на десятки тысяч.

Появление новых знаний о биомолекулярных механизмах заинтриговало Ричарда Фейнмана. В 1959 г., выступая на проходившей в Калифорнийском технологическом институте сессии Американского физического общества, он упомянул о физике искусственных микро- и наноразмерных механизмов, на создание которых исследователей «вдохновляет биологический феномен, когда химические силы вновь и вновь используются для продуцирования разнообразных удивительных эффектов (одним из которых является выступающий)». В докладе «Там внизу — много места» Р. Фейнман предложил идею использования механически направляемых перемещений для сборки молекулярных структур с атомарной точностью.

Таким образом, уже в то время Р. Фейнман сформулировал фундаментальный физический принцип атомарно точного производства. Но на протяжении последующих пятнадцати лет, пока биомолекулярные дисциплины развивались семимильными шагами, идея использования механизмов, способных создавать различные объекты с атомарной точностью, оставалась невостребованной.

К середине 1970-х инжиниринг биомолекулярных механизмов уже был виден на горизонте. Ученые начали писать инструкции, закодированные в ДНК, что положило начало развитию новой области, названной «генной инженерией». Используя эту технологию, исследователи научились перепрограммировать молекулярные механизмы клеточных ядер для производства новых белков. Или, если быть более точным, они научились

программировать клетки ядер на выпуск белков, уже синтезируемых в ядрах других клеток.

Генетическая инженерия и молекулярная биология стали передовыми областями науки и техники. Но мы можем с полным основанием рассматривать их и как открывшуюся дверь, за которой находится возможность создания новой среды в масштабе, имеющем огромное значение для будущего человечества. Я пристально следил за развитием этой сферы, и уже в 1976 г. начал искать ответ на вопрос, куда она нас может завести. И снова я нашел подсказку в библиотеках. Как информационно всеядное животное, я то и дело закидывал свой невод в океан знаний, покоившийся на журнальных полках Научной библиотеки МТИ.

Следующей весной, после того как я вдоволь наигрался с идеями о вычислениях с помощью молекулярных устройств, у меня возникло несколько очень важных вопросов. Один из них звучал так: «Что можно создать, программируя природные механизмы?». И, в продолжение этого вопроса: «Что можно построить, используя механизмы, созданные перепрограммированными природными машинами? И что можно сделать с помощью устройств, созданных этими механизмами?». Подобные вопросы можно задавать бесконечно, уходя все дальше по спирали усложнения технологий производства.

Эта восходящая спираль ведет нас ко все более развитым производственным способностям, не только атомарно точным, но и имеющим небиологическое происхождение. Они будут ограничены не свойствами биомолекулярных материалов и механизмов, созданными природой в ходе эволюции, а свойствами материалов и устройств, ограниченными только физическими законами. Другими словами, концепция восходящей спирали означает движение от современных технологий к передовому АТП — путь, основывающийся на использовании технологий атомарно точного производства для создания более совершенных инструментов изготовления структур с атомарной точностью. И у нас уже

есть инструменты, с помощью которых можно начать двигаться по этому пути.

Достигнутый с начала 1970-х прогресс в значительной степени основан на использовании биомолекулярных механизмов и материалов и включает в себя появление такой области, как «белковая инженерия». Но для того, чтобы правильно понять весь смысл инжиниринга белков, нам необходимо избавиться от одного естественного заблуждения.

Мы привыкли думать о белковых молекулах как о водянистых желеподобных образованиях, таких как, например, мясо. Это ошибочное представление. Белковые молекулы представляют собой твердые наноразмерные объекты, похожие на кусочки пластика, но имеющие более разнообразное и сложное строение. Они состоят из уложенных полимерных цепочек, отличающихся друг от друга формой, размером и физическими свойствами — при том что все они собраны из одного и того же набора двадцати различных мономеров. Различные комбинации и последовательности этих мономеров могут принимать форму таких материалов, как мягкая резина, твердый пластик и волокна, превосходящие по прочности сталь. Так, например, и паутина, и рог быка представляют собой белковые образования. Но инженера более всего интересует ответ на вопрос — что способны *делать* эти наноразмерные объекты?

Некоторые из возможностей подсказывает нам природа. Обратив взор на молекулярные механизмы жизни, мы увидим, что белковые соединения способны образовывать двигатели, датчики, структурные основы и каталитические устройства, умеющие преобразовывать молекулы. Основанные на белках устройства умеют копировать и считывать данные, хранящиеся в ДНК. Что самое важное, построенные из биомолекул комплексы способны функционировать как программируемые производственные системы, выпускающие различные компоненты для новых молекулярных механизмов.

Из этих примеров с самого начала становится понятным, что генетическая инженерия предлагает доступ к инструментам, способным создавать не только эти, но и многие другие вещи. Необходимо только овладеть искусством инжиниринга белков.

Столкнувшись с этими фактами, ход моих мыслей принял примерно такое направление:

1. Обратившись к природе, мы видим, что комплексы молекулярных механизмов могут быть запрограммированы посредством закодированных в ДНК инструкций на создание сложных, атомарно точных структур, включая соответствующие друг другу компоненты, необходимые для образования молекулярных механических систем.
2. Природа показывает нам, что молекулярные механические системы могут связывать и позиционировать самые разные химически активные молекулы, направляя их с целью создания атомарно точных биомолекулярных структур и компонентов механизмов.
3. Схожие механические комплексы могут быть использованы для связывания, позиционирования и соединения еще более широкого диапазона молекул, не только биологических, тем самым давая возможность создавать атомарно точные структуры, в том числе с более сильными химическими связями, обеспечивая более высокую механическую жесткость.
4. Эти более жесткие компоненты следующего поколения могли бы использоваться для создания износостойких высокопроизводительных механизмов, которые, в свою очередь, могли бы применяться для создания еще более широкого диапазона компонентов, из которых изготавливались бы еще более производительные механизмы, и так далее, что означало бы расширение горизонта их применения далеко за пределы биологии.

Попытка заглянуть за этот горизонт означает поиск ответа на вопрос о том, что в принципе может быть достижимо в рамках фундаментальных физических законов. С этой точки зрения и рассматривая открывающуюся картину через призму системной инженерии, я получил первое представление о потенциальной мощи и разнообразии атомарно точного производства.

Открывшиеся перспективы были потрясающими. Первоначально мне было трудно поверить в них. Со временем, изучая различные концепции, расчеты, а также читая учебники и журналы, я убедился в том, что поразительные перспективы полностью реалистичны.

В 1981 г., движимый ощущением необходимости поделиться знанием о потенциале технологий, способных изменить мир, я опубликовал научную статью¹, по прошествии пяти лет и трех вариантов, последовала книга «Машины создания», предназначенная широкой общественности.

Благодаря «Машинам создания», увидевшим свет в сентябре 1986 г., в широкую публичную дискуссию была «вброшена» новая идея и обозначающее ее слово — «нанотехнологии». Средства массовой информации сформировали собственное представление о том, что это слово могло бы означать, и оно пошло в массы.

Уже через два месяца, миллионы читателей научно-популярного журнала *OMNI* увидели вынесенный на обложку заголовок: «Нанотехнологии: молекулярные механизмы, имитирующие жизнь».

Автор статьи Фред Хэпгуд был членом основанной мною за год до описываемых событий Группы исследований в области нанотехнологий МТИ. Столь мощный (и нежелательный) старт породил целую волну газетных

1. Отдельные положения этой статьи, опубликованной в *Proceedings of the National Academy of Sciences*, широко цитировались в научной литературе, так как в ней описывались основы идей белковой инженерии и передовых нанотехнологий, основывавшихся на механизированной молекулярной сборке.

и журнальных материалов, призванных разъяснить широкой читательской аудитории новую научную концепцию. В то же время биологический уклон статьи, выраженный в заголовке «Механизмы, имитирующие жизнь», задал тенденцию трактовки нанотехнологий исключительно через призму биологии, что привело к неприятным последствиям сравнения наномеханизмов с наножучками.

Время шло, и по мере своего распространения в обществе, идеи нанотехнологий менялись и становились все более разнообразными, позволяя прибегать и к другим аналогиям. В 1990-х гг. начальное революционное видение нанотехнологий запустило волну энтузиазма ко всему с приставкой «нано-». Эта волна принимала разные формы, но одна из них стала центральной. По мере признания новых идей научным сообществом, фокус нанотехнологий постепенно сместился на наноразмерные явления — как в научной среде, так и в обществе, постепенно дав толчок к поддержке новых исследовательских инициатив.

Понятие «нанотехнологий» существенно расширилось, и сегодня оно включает в себя гораздо больше, чем просто наномеханизмы и атомарно точное производство. Оно превратилось в общее обозначение, определяемое в первую очередь размерами, стало новым общим брендом нанотехнологий (хотя во многих случаях было бы лучше использовать понятие «нанонауки»), распространившимся на множество дисциплин, в которых изучаются наноразмерные структуры, а также объединившим большое количество исследователей, работающих с материалами, поверхностями, малыми частицами и электронными устройствами. Исследователи делились друг с другом идеями и методиками, формировали коллаборации и расширяли границы научного знания. Долгосрочное видение передовых нанотехнологий пробудило интерес общественности, а углубляющееся понимание практической важности феномена наноразмерности стимулировало расширение и тематик исследований, и финансирования.

Вскоре история нанотехнологий и АТП начала смешиваться с заблуждениями, как это часто бывает на границе между наукой и техникой. Проблемы были вызваны глубинными, но далеко не всегда признаваемыми различиями между первой и второй.

В целом между учеными и инженерами есть глубокие отличия, и в первую очередь — различный подход к знаниям. Ученые исследуют, а инженеры проектируют. Ученые изучают физические объекты, а затем описывают их; инженеры описывают материальные объекты, после чего создают их. Ученые и инженеры задают разные вопросы и ищут различные ответы на них.

Это довольно грубая картина, нарисованная не кисточкой живописца, а малярной кистью. Вдаваясь в нюансы, мы увидим, что во многих случаях исследование и дизайн следуют одной и той же исследовательской логике, смешиваясь друг с другом в человеческом сознании, следующему единому ходу мысли. В главе 8, посвященной изучению противоречивых движущих частей прогресса современного мира, я более точно очерчу контуры проблем знаний, практики и культуры.

Как показывает опыт, смешение инженерных и научных вопросов может привести к концептуальной путанице. В молекулярной науке есть и те и другие, но они тесно связаны друг с другом и их границы сильно размыты. Следствием этой путаницы становятся упущенные возможности в применении научных знаний для открытия новых областей.

Проведенные много десятилетий назад научные исследования позволили открыть фундаментальные принципы молекулярной физики, что позволило проводить точные расчеты и получать достоверные прогнозы. Однако экспериментальная наука позволяет получать знания (и технологии), не обращаясь к точным математическим расчетам. Во многих случаях исследователи-экспериментаторы разрабатывают собственные методы создания атомарно точных наноразмерных структур, и в процессе проводимых ими исследований

идеи получения новых знаний и изготовления тесно переплетаются между собой. Например, исследования молекул позволили химикам открыть атомы и установить связи между ними задолго до того, как квантовая механика предложила их теоретическое объяснение.

Поэтому, когда моя работа привела меня в дебри молекулярных наук, я встретился с культурой, в которой вопросы исследований и дизайна часто смешивались друг с другом, с культурой, в которой большинство исследователей во многих случаях не признавали идеи и методы инженерии системного уровня. И все же я обнаружил, что абстрактные идеи инженерного дела могут найти непосредственное применение в молекулярной сфере.

Например, в чем заключался принятый в то время в науке о белке образ мышления? Научная проблема состояла в том, чтобы правильно предсказать, как будет уложен белок из данной последовательности мономера. Напротив, инженерная задача заключалась в анализе желаемой укладки и определении последовательности мономера, которая позволяла бы ее получить. В то время проблема предсказания сворачивания белка оставалась нерешенной (да и сегодня она решена лишь частично), и исследователи неявным образом исходили из допущения, что успешное предсказание укладки должно предшествовать ее проектированию.

В опубликованной в 1981 г. статье я объяснял, почему проектирование и предсказание являлись принципиально разными проблемами и почему первое должно быть менее трудным. Вскоре проектирование укладки получило название «обратной проблемы сворачивания», и принятие этой глубокой начальной идеи стало исходным пунктом развития такой области, как белковая инженерия.

Однако белковая инженерия остается «встроенной» в науку. Десять лет спустя, выступая на конференции, я попросил поднять руки тех ее участников, кто считает себя учеными. Передо мной поднялся «лес» из сотни рук. В ответ на аналогичную просьбу, обращенную к ин-

женерам, руки подняли всего три человека. И это на конференции, которая называлась «Белковая инженерия»!

Конечно, многое зависит от особенностей той или иной научной области. Если бы я выступал перед аудиторией, состоящей из физиков-экспериментаторов, то многие из них в ответ на мою просьбу, скорее всего, подняли бы руку дважды. То же самое произошло бы в зале, заполненном специалистами по космическим исследованиям, перед которыми, например, поставлена задача отправки исследовательского аппарата на Марс.

В то же время принято считать, что инженерам и ученым присущи противоположные когнитивные привычки, интеллектуальные ценности и культуры; особенно сильно контраст проявляется в научных центрах. Если инженеры занимаются созданием комплексных систем, таких как космические корабли или ускорители заряженных частиц, то исследователи используют оборудование, соответствующее требованиям молекулярных наук (вспомним мензурки, пипетки, коммерчески доступные инфракрасные спектрометры и тому подобное). В этом случае ученым нет никакой необходимости заниматься разработкой систем низкого уровня.

Образ мышления, лучше всего соответствующий потребностям молекулярных исследований, менее всего подходит для постижения сути или вынесения суждений относительно абстрактного инженерного анализа. В то же время ученые, способные легко постичь научную основу атомарно точного производства, испытывали немалые трудности с тем, чтобы понять его идею саму по себе и правильно ее оценить. В результате столкновения когнитивных концепций легко сползти в концептуальную яму.

Машины конфликта

Видение, представленное в «Машинах создания», освободило силы, вскоре вступившие в конфликт. Первой из них, конечно же, была сила видения самого по себе,

подхлестнувшая исследования, позволившие углубить наше понимание перспектив. Частью соответствующих усилий с моей стороны стала подготовка докторской диссертации, за которой последовала книга *Nanosystems* («Наносистемы»).

Однако многосторонняя сила популяризации пользовалась шестилетним гандикапом. Идеи, представленные в «Машинах», отражались эхом в прессе и Интернете в форме ярких упрощенных сюжетов и образов. Тем самым наука и техника превращались в фантастику, незаметно переходившую в магию и волшебство. Идеи принимали форму утопий и сенсаций, набиравших все большую силу. Через некоторое время концепции, изложенные в «Машинах», оказались погребены под толстым слоем прямых искажений и ненаучной фантастики.

Риск, связанный с чрезмерным возбуждением и популяризацией был обусловлен тем, что в кратком или искаженном описаниях АТП-технологии выглядели как очковтирательство. Усиленные массовым энтузиазмом, эти идеи воспринимались как еще одно коллективное помешательство. Важность АТП-технологий определяется огромным диапазоном их применения. Но, по иронии судьбы, это обстоятельство и было главным фактором недоверия, по крайней мере, на протяжении 99% времени. Впрочем, в некоторых случаях, и в рассматриваемом нами, в частности, ошибается даже эвристика.

Когда все только начиналось, мне казалось, что энтузиазм сыграет преимущественно положительную роль — он должен был стать, и это действительно произошло, каналом, поддержки научного прогресса, а ученые, в свою очередь, должны были помочь направить энергию масс к реальности, постепенно отодвигая в сторону бессмыслицу и чепуху.

В какой-то степени так и произошло, и критическое мышление продолжало наступать. Студенты, прочитавшие «Машины», выбирали в качестве продолжения своей карьеры нанотехнологии; ученые в Калифорнийском технологическом институте и других университетах при-

меняли вычислительные методы для моделирования новых атомарно точных механизмов; я выступал на научных конференциях, корпоративных встречах, в Управлении по науке и технологиям Белого дома, в Пентагоне, в Агентстве национальной безопасности, в Управлении по оценке технологий конгресса и на сенатских слушаниях, проводившихся по инициативе сенатора Эла Гора.

К концу десятилетия исследователи, занятые в самых разных областях, преимущественно в материаловедении, собрались под знаменем нанотехнологий, продвигая и расширяя ассоциировавшееся с этим словом видение. В конце 1990-х завоеванная благодаря их усилиям поддержка нанотехнологий (в широком понимании), достигла порогового уровня запуска федеральной программы. Это означало получение нанотехнологиями приза в миллиарды долларов.

Текущие исследования и долгосрочные цели были (или должны были быть) полностью совместимы друг с другом. Но по мере того, как события набирали ход, между ними возник конфликт, подпитывавшийся столкновениями между получившим широкое хождение видением перспектив развития и научными реалиями того времени. В процессе его поляризации конфликт стал звучать, как «мы против них» и «наука против фантазий». При этом различие между фантазиями и подлинными перспективами все глубже тонуло в общих криках и шуме. Поворотным пунктом стало принятие новой федеральной программы, гарантировавшей финансирование разработок в области атомарно точного производства. Однако вскоре ее инициаторы начали пропагандировать необходимость изменения первоначального видения, принятого американским конгрессом, повторно сформулировали миссию и начали странную и беспорядочную борьбу идей, эхо которой слышно и в наши дни. Я еще вернусь к этой истории в главе 13.

Рассматриваемый конфликт имел в высшей степени отрицательные последствия. В восприятии публики нанотехнологии оказались отделены от концепции ато-

марной точности и ее естественных корней, уходящих в молекулярные науки. Я предложил в качестве основного направления развития АТП как цель для совершенствования имевшихся на тот момент технологий, но достигнутый на этом пути огромный прогресс каким-то образом ускользнул от внимания публики. Узнав о нем, мир пришел в изумление.

Как далеко мы уже продвинулись? В 1986 г. мы не знали ни белковой инженерии, ни технологий определения структуры ДНК. Мы не умели использовать механизмы для перемещения отдельных атомов. Неудивительно, что чуть больше четверти века назад размеры самых крупных сложных искусственных атомарно точных структур не превышали нескольких сотен атомов. С тех пор нам удалось значительно продвинуться вперед по всем фронтам развития технологий атомарно точного производства:

- Использование различных сканирующих инструментов для получения изображений и перемещения отдельных атомов, а также манипуляции отдельными молекулами и установления связей между ними вошло в повседневную исследовательскую практику. Выход на данный уровень контроля иллюстрирует принцип автоматически задаваемой атомарно точной фабрикации.
- Наряду с молекулярными моторами и другими механизмами химии-органики успешно и устойчиво строят крупные и более сложные структуры; используемые ими технические структуры образуют обширный арсенал, позволяющий создавать молекулярные системы. В свою очередь, специалисты по неорганической химии и материаловеды успешно расширили дополняющий его инструментальный набор наноразмерных структур.
- Инжиниринг белков процветает благодаря программному обеспечению систем автоматизированного проектирования; его внедрение позволяет осуществлять

рутинное проектирование сложных атомарно точных наноразмерных объектов, включая структурные компоненты и функциональные устройства.

- Началось развитие технологий ДНК-оригами, использование которых позволяет быстро и систематически изготавливать требуемые атомарно точные структуры размером в сотни нанометров и миллионы атомов.
- Рука об руку с развитием квантовых методов в химии шло увеличение мощности компьютеров и алгоритмов, что открыло возможности использования в научном моделировании и молекулярной инженерии мощных инструментов физического расчета.
- Современные методы молекулярной механики, все более широко применяемые в химии, позволяют описывать структуру и динамику молекул в масштабах, достигающих миллионов атомов (диапазон, открывающий возможность проектирования и разработки сложных атомарно точных систем).

Текущий уровень технического мастерства и квалификации специалистов достаточен для обеспечения движения следующего поколения молекулярных систем по дороге, ведущей к атомарно точному производству. Я убежден, что достижения последних лет являются надежной основой дальнейшего быстрого поступательного развития. В наши дни самая большая трудность заключается в том, чтобы собрать воедино кусочки мозаики — не только компоненты и вычислительные инструменты, но и инженерные идеи, а также исследовательские группы, способные воплотить их в физическую реальность.

Интерлюдия. Проблемы и перспективы

Давайте остановимся, чтобы ответить на вопрос: «Мы рассматриваем технологические возможности, связанные с АТП, способные изменить наше будущее. Но где мы

находимся в настоящее время?» Ответ на него выходит далеко за пределы лабораторий, политики и молекул.

Вкратце, основывающаяся на АТП революция в производстве сулит нам преобразование материальной основы человеческой жизни, что будет иметь далеко идущие последствия, включая и новые глобальные решения, и новые глобальные проблемы.

Рассмотрим проблемы ограниченности ресурсов (минералы, нефть, вода) и комплекс экологических вызовов от выбросов ядовитых металлов до глобального изменения климата. Все они представляют собой материальные проблемы, потенциально имеющие и материальные решения. Посредством цепочки материальных и экономических связей производственная революция, основывающаяся на АТП, способна трансформировать глобальные проблемы, так как одним из ее следствий становится резкое сокращение потребления ресурсов и токсичных выбросов. Одновременно она способствует созданию инфраструктуры, необходимой для генерации дешевой солнечной энергии и росту экономики с нулевыми выбросами углекислоты, но что еще более замечательно, она предлагает доступные средства для сокращения объема уже имеющегося в атмосфере углерода.

Эти материальные производственные мощности открывают перспективы устранения важнейших проблем и значительного резкого повышения материального благосостояния людей на всей Земле. В то же время рука об руку с рассматриваемыми нами решениями идут проблемы. В частности, быстрое создание необходимых производственных мощностей, скорее всего, приведет к глубоким спадам в различных отраслях мировой экономики, начиная с добычи полезных ископаемых и обрабатывающей промышленности до торговли и так далее.

Действительно ли внедрение АТП способно повлечь за собой столь далеко идущие последствия? В обрабатывающей промышленности АТП-технологии позволяют производить более совершенные продукты с более низ-

кой, чем сегодня, себестоимостью. Их использование открывает предприятиям возможность превзойти в конкурентной борьбе представителей уже существующих отраслей. Что касается добычи полезных ископаемых, то АТП, естественно, потребляет и производит различные соединения материалов (исчезает необходимость в использовании железа и хрома для выпуска нержавеющей стали или свинца и олова для выпуска припоя). При этом в большинстве случаев в АТП-технологиях применяются элементы, имеющиеся на Земле в избытке, включая углерод, азот, кислород и кремний. Изменения в соотношении затрат и результатов приведут к значительным переменам даже в размещении предприятий, занимающихся добычей общих конструкционных материалов. (В главе II мы более глубоко рассмотрим вопросы, связанные с качествами продукции АТП, издержками и ресурсными требованиями к производству.)

Современная экономика выстраивает глобальные цепочки поставок от шахт и скважин до металлургических заводов и химических комбинатов, перерабатывающих различные материалы фабрик, заводских комплексов, на которых изготавливаются различные компоненты и осуществляется сборка конечной продукции. Мы увидим, что внедрение АТП-технологий способно привести к резкому уменьшению протяженности подобных цепочек, их сокращению до нескольких звеньев, соединяющих местные производства, продвигаясь вперед от общеупотребительных материалов до простого химического исходного сырья; от простого исходного сырья — до общих микромасштабных строительных блоков; а затем, от общих компонентов — до бесконечного круга продуктов (во многом подобно тому, как принтеры позволяют упорядочивать общие единообразные пиксели в бесконечный ряд изображений).

Протяженные специализированные цепочки поставок направляют и обеспечивают движение материальных потоков торговли, объединяющих наш мир в глобальную экономику. Разрывы этих цепочек, скорее всего,

приведут к значительному уменьшению объемов торговли. Легко вообразить, что подобные разрывы могут оказать воздействие на уровень жизни, по меньшей мере, половины населения планеты. Не менее легко представить себе уровень страданий и дефицита различных продуктов в разгар всеобщего изобилия.

Я полагаю, что эта перспектива еще раз привлекает наше внимание к необходимости изучения политики управления процессами, способными привести к «катастрофическому успеху». Другими словами, необходимо начать дискуссию, в которой были бы проанализированы перспективы нашего мира, начиная с того момента, когда физический потенциал технологий АТП-уровня пересечет пороговое значение в объективной реальности. Мы обязаны возобновить обсуждение, прерванное более десяти лет назад.

В частности, необходимо пристально рассмотреть последствия внедрения АТП в военной сфере, так как легковесная недостаточно продуманная политика чревата никому не нужными высокими рисками. В данном случае сама природа потенциальных продуктов (а также потенциальная динамика их разработок, производства, распределения и использования) определяет будущие глубокие последствия, что требует свежего взгляда на проблемы. Аналогично, экономические последствия перехода к АТП предполагают такую же глубокую и широкую переоценку национальных интересов, как и возможные изменения в материальной экономике.

Наше современное понимание является достаточно глубоким для того, чтобы мы смогли пересмотреть глобальные проблемы и оценили ожидающие нас в будущем трудности. Мир идет по пути глубоких преобразований, и ситуация, в которой мы находимся, требует необычных вопросов о наших перспективах и возможных действиях — новых вопросов о том, как избежать ненужных рисков, как справиться с глобальными проблемами, как воспользоваться неожиданно возникшими возможностями и как управлять подрывными изменениями.

Короче говоря, необходимо расширить повестку дискуссии о будущем. Никто не требует немедленного изменения представлений, получивших широкое распространение. Но нам следовало бы попытаться оценить перспективы технологий АТП-уровня и ответить на возникающие в связи с ними вопросы относительно вероятных проблем и разумности тактических решений относительно того или иного выбора.

* * *

У меня не было и нет желания изменить чье бы то ни было мировоззрение. Перспективы полного изобилия несут с собой множество трудно перевариваемых истин — хотя, возможно, это исключительно мое, сиюминутное их восприятие. Усвоение и успешное применение новой информации потребует немало времени и усилий множества умов.

Моя цель проста. Я хотел бы изложить факты о том, что реально возможно в действительности, и обсудить потенциальные результаты развития технологий в самом ближайшем будущем, а также рассмотреть некоторые пока остающиеся без ответа важнейшие вопросы. В свете грядущих перспектив, я полагаю, что пришло время для нового разговора о нашем будущем, разговора, который станет началом исследований перспектив полного изобилия.

Часть II

Революция в контексте



Три прошедшие революции и грядущая четвертая

ПОЯВЛЕНИЕ и распространение новых технологий неоднократно приводили к изменениям направлений развития истории человечества, сопровождавшимся невообразимыми прежде последствиями. Аграрная революция неолитической эпохи знаменовала собой переход к образу жизни, основывавшемуся на относительно высокой плотности оседло живущего населения, способного устойчиво получать продукты питания, что открыло путь к развитию цивилизации. Промышленная революция привела к возникновению огромной волны новых для всего мира материальных продуктов. Продолжающаяся в наши дни Информационная революция соткала новую ткань бытия, состоящую из знаний, коммерции и общества, подготовив почву для формирования будущего, которое пока находится вне пределов нашего понимания.

Результатом приближающихся АТП-преобразований будет появление движущей силы четвертой революции, которая, как и все предшествующие, приведет к трансформации повседневной жизни, труда и структуры общества на всей Земле.

Уроки, извлеченные из прошедших революций, помогают нам понять природу грядущих преобразований. Каждая из них оказала всепроникающие воздействия на человеческий мир, сопровождавшиеся глубокими и далеко идущими изменениями. Сама природа новых

для своего времени технологий способна помочь нам сопоставить АТП-революцию и ее предшественниц.

Если аграрная революция основывалась на молекулярных механизмах, пусть и не спроектированных заранее, то промышленная революция — на сконструированных людьми машинах и механизмах (чрезвычайно далеких от молекулярного уровня). Информационная революция, в свою очередь, использовала цифровые наноразмерные устройства, обрабатывающие только информацию и ничего более. В некотором смысле АТП-революция имеет общие черты с каждой из своих предшественниц, так как она движима искусственными молекулярными наноразмерными механизмами, функционирующими на цифровых принципах, но на этот раз предназначенными для обработки материи. В сущности, нет ничего удивительного в том, что из каждой предшествовавшей революции были извлечены уроки, полезные для понимания АТП-преобразований, а наступление новой волны перемен, вероятно, будет означать взятие более высокого рубежа в истории человечества.

Уинстон Черчилль однажды заметил: «Вероятно, чем дальше в прошлое ты способен заглянуть, тем более далекое будущее предстанет твоему взору». Итак, мы начинаем с неолита.

Первая аграрная революция

Первая аграрная (или неолитическая) революция определяет наступивший более десяти тысяч лет назад рассвет неолита.

Она открыла людям перспективу использования производственных возможностей наноразмерных машин, функционировавших в живых организмах. Имеется в виду механика молекулярного метаболизма. Благодаря ее работе для создания сложных структур было достаточно только воды, земли, воздуха и солнечного света. Ведение сельского хозяйства позволило в сот-

ни раз увеличить продовольственную продуктивность земли, а переход к аграрному образу жизни знаменовал собой начало целого каскада изменений. Например, начало неолитической революции датируется доисторическими временами по одной простой причине: знаковая система передачи данных, благодаря которой стала возможна письменная история, появилась значительно позже.

Тем не менее наши знания об этих давно ушедших днях непрерывно углубляются и расширяются. Археологи и генетики расшифровывают записи о происходивших в те времена событиях с последовательностей артефактов, найденных при раскопках, и информации, записанной в человеческие гены. Находки, относящиеся к неолиту, свидетельствуют о зарождении в то время новой технологии, основывавшейся на использовании орудий труда. Наши предки изготавливали из камней различные инструменты, с помощью которых можно было свалить и обтесать дерево, натолочь зерно. Это были новые орудия труда, более надежные, по сравнению с острыми, но хрупкими кремневыми пластинами, на протяжении многих поколений использовавшихся племенами охотников для изготовления наконечников стрел.

Наряду с этими неолитическими орудиями археологи находят и другие свидетельства происходивших изменений — остатки выращивавшихся в полях зерновых культур и ямы на местах жилищ, благодаря остаткам давно сгнивших бревен. Археологические находки позволяют ученым относительно точно датировать события аграрной революции. Она началась свыше десяти тысяч лет назад в конце ледникового периода эпохи плейстоцена. Потепление климата, который становился более благоприятным для жизни людей, постепенно переходивших от собирания произраставших поблизости различных злаков к сбору, сохранению и *выращиванию* определенных зерновых культур. При этом лучшая часть урожая оставлялась для посева в будущем году. Ар-

хеологические данные свидетельствуют об эволюции, о постепенном появлении более продуктивных, более близких к современным форм зерновых культур, вследствие искусственного, а не естественного отбора. В Месопотамии в результате повторявшихся циклов сбора урожая и сева зерновых, были выведены культуры, известные нам как однозернянка (вид пшеницы), ячмень, чечевица и нут.

Независимо от Месопотамии сформировались такие центры сельского хозяйства, как Китай, Новая Гвинея, Африка, а также Северная и Южная Америки. Но только месопотамскому сельскому хозяйству удалось «покорить» Европу. Генетические и почвенные маркеры свидетельствуют о расселении земледельцев на север и запад континента, вплоть до его окраин. По мере распространения ранних технологий люди оседали в районах с наиболее плодородными землями и на смену образу жизни охотников-собирателей постепенно приходил земледельческий образ жизни.

Почему земледельческий образ жизни вытеснил предшествовавшую форму организации? Не только потому, что он оказался лучшим и для отдельных людей, и для семей или племен. Необходимость обработки земли и возделывания зерновых культур означали уменьшение свободного времени и возрастание потребности в упорном тяжелом труде для создания запасов продовольствия. В тех случаях, когда уже приближавшаяся к пределам роста группа людей сталкивалась с неурожаем, по весне ее члены были обречены на голод, независимо от трудовых усилий в прошлом. Охота и собирательство, напротив, приносили то выигрыш, то проигрыш. Их результаты зависели не столько от труда, сколько от удачи. За изобильным охотничьим сезоном мог последовать такой же богатый на добычу. Но с равной вероятностью удача могла и отвернуться от группы. Результат никак не зависел от количества труда в предшествовавшем сезоне. На охотничье-собирательской стадии развития ограничения, с которы-

ми сталкивались люди, принимали формы, отличные от современных. Они выражались в периодах нехватки, изобилия, питания и свободного времени, формировавших и отличавшихся друг от друга образы жизни людей и их самих.

Земледельческий образ жизни принес с собой отрицательные последствия и для здоровья людей, и для их свободного времени. Охотники и собиратели питались довольно разнообразно, а рацион питания земледельцев основывался на нескольких видах зерновых культур, которые они могли выращивать в больших количествах. Изменения рациона и режима питания привели к уменьшению роста людей и порче зубов.

В то же время значительно *возросла* концентрация населения и усилилась привязанность людей к участкам земли. Устойчиво растущая численность населения означала, что, несмотря на более низкую способность к труду, земледельцы постепенно переходили на новые земли, расширяя пространство сельского хозяйства.

Охотники-собиратели, конечно же, могли оказывать вооруженное сопротивление экспансии земледельцев. Однако последние обладали значительно большим запасом основного ресурса как для защиты, так и для нападения — людьми. Таким образом, распространение сельского хозяйства никак не было связано с благосостоянием человека. Одним из его результатов стало постепенное распространение аграрной революции на другие континенты. Но были и другие последствия.

Новые орудия и тяжелый труд позволили земледельцам создавать запасы зерна на случай неурожая, что неожиданно придало новый импульс социальному развитию. Наличие запасов продовольствия означало возможность возникновения нового образа жизни, когда урожай собирается не на полях с помощью орудий труда, а отбирается у земледельцев силой оружия. В этом случае уже сами земледельцы уподобляются зерновым культурам. Подобно растениям, земледельцы были укоренены в земле, образуя ресурс для

набегов и разграбления или защиты и обложения налогом. Возможность торговли и потребность в защите придали импульс к возникновению и развитию городов, империй и цивилизаций. Этот процесс включал в себя стадии роста, краха и наследования, сопровождавшиеся расширением масштабов и все более сложным общественным устройством. Вместе с городами и торговлей пришли специализированные задачи, инструменты, навыки и умения, а также знания. Общество постепенно продвигалось по пути технологического развития.

Технологии вышли из богатых городов; богатые города — из прикрепленности крестьян к земле; крестьянский образ жизни — из сбора зерновых культур, сохранения и взращивания семян. Все это, вплоть до завоевания континентов, проистекало из требований к сельскохозяйственным методам производства продукции и необходимости ее хранения.

Таким образом, важнейшей движущей силой изменений, происходивших на заре цивилизации, была материальная сущность технологии — сельскохозяйственного производства, и предъявлявшиеся ею требования к земле, почве, воде и труду, как необходимым условиям использования энергии солнечного света для выращивания продукции на одних и тех же участках земли из сезона в сезон. Общая потребность в этих ресурсах, в свою очередь, вытекала из материальной природы метаболизма — условий обработки молекул с атомарной точностью наноразмерными машинами различных типов.

Промышленная революция

Новое время, современную эру, связывают с промышленной революцией, начавшейся через несколько тысячелетий после аграрной революции. Впрочем, по меркам истории разрыв между этими двумя эпохальными событиями был подобен мгновению. По своей продолжительности временной отрезок, разделяющий начало

промышленной революции и наши дни, укладывается всего в три человеческие жизни.

Технический прогресс, достигнутый в рамках развития индустриального общества (в Англии оно началось на рубеже XVIII–XIX вв.) привел к более чем стократному увеличению производственных способностей во всем мире (если, конечно, никто не возражает против сопоставления таких не слишком похожих друг на друга продуктов, как фургоны и самолеты или книги и компьютеры). Еще более поразительным, чем увеличение объемов производства, является широчайшее разнообразие продукции — промышленность выпускает не просто больше одежды и повозок, но и нейлоновые такни, безлошадные экипажи, а также такие экзотические продукты, как самолеты, телефоны, программное обеспечение и атомные бомбы.

Для того чтобы организовать и упорядочить непрерывно возрастающую сложность, промышленная революция привлекла мириады машин и производственных методов, новых методов инженерного конструирования сложных систем, а также новых способов менеджмента и государственного управления. Если попытаться отыскать стержень современных технологических способностей — базис мира, в котором изготавливаются такие вещи, как самолеты и смартфоны, — мы обнаружим, что эти знакомые всем продукты производятся с помощью машин, построенных с помощью других машин. Те, в свою очередь, созданы посредством третьих машин и механизмов — инструментов, применяемых для создания инструментов в рамках неразрывной цепочки, сначала уводящей нас на дальние заводы, а затем погружающей в глубины времени.

Отслеживая ее историческое начало, наш взгляд может остановиться на железных инструментах, изготавливавшихся кузнецами с помощью молотов и клещей. Проходя через века и этапы познания, эти инструменты совершенствовались и улучшались учениками и учениками учеников. Чтобы создать высокоточные машины

и инструменты, нужно было сначала придумать механизированные инструменты, а затем — более совершенное станковое оборудование. Этот процесс продолжается и по сей день.

Стержень прогресса в производстве, а значит и в технологиях, подобен стволу дерева, уходящего корнями в глубокую древность. Продукты которые мы видим изо дня в день, подобны его листьям и плодам, а находящиеся за сценой фабрики и заводы, на которых они выпускаются, — ветвям, отходящим от ствола, то есть от технологической инфраструктуры, образуемой точными машинами и механизмами, коллективно производящими все точные компоненты, необходимые для создания машин такой же или более высокой точности.

В наши дни ствол этого дерева технологий почти невидим. Представьте себе, что вы открываете капот автомобиля, разглядываете внутренности телефона или, вооружившись электронным микроскопом, изучаете устройство микросхемы. Детали и компоненты, предстающие вашему взору, изготовлены отнюдь не на базовом оборудовании. Последнее обеспечивает производство машин, используемых для изготовления механизмов, с помощью которых выпускается все, что находится у нас перед глазами. Скрытые под оболочкой, образуемой множеством переплетающихся связей, базовые производственные технологии образуют платформу, на которой происходит развитие промышленной цивилизации. Одновременно сама платформа продолжает увеличиваться в размерах.

Промышленная революция, разворачивавшаяся по мере расширения платформы, принесла с собой перемены и в сельском хозяйстве. Подобно тому как племена охотников-собирателей уступили свои места агрокультурным деревням, небольшие крестьянские общины не устояли перед индустриализированным сельским хозяйством. Даже там, где города остаются подобием сельских общин, потребности, инструменты и труд их жителей трансформировались настолько сильно, что

они находятся вне пределов понимания земледельца полилитической эпохи, вручную пропалывавшего свои участки, или крестьянина, использовавшего для пахоты пару волов.

Промышленная революция оказала наиболее глубокое воздействие на жизнь человечества в том смысле, что, начиная с определенного момента времени, рост производства продуктов питания обгоняет рост численности населения планеты. В прошлом цивилизации неизбежно попадали в старую мальтузианскую ловушку, когда расширение производственных возможностей вело к росту численности населения, но не уровня его благосостояния. Несмотря на краткосрочные флуктуации (например, отсрочку, предоставленную Черной смертью, то есть эпидемией чумы, охватившей Европу в XIV в.), население всегда наталкивалось на пределы роста, ограничивавшие его потенциальное увеличение. Возможность избежать мальтузианской ловушки открыла перед человечеством новые горизонты.

Распространение механизации оказало и прямое положительное воздействие на сельское хозяйство. Например, на смену конным косилкам, использовавшимся для уборки пшеницы в XIX столетии, сначала пришли косилки на тракторной тяге, через некоторое время вытесненные комбайнами, способными скашивать, обмолачивать и провеивать различные зерновые культуры. На многие обрабатываемые с помощью машин поля уже немало лет вообще не ступала нога человека. В дальнейшем решающее воздействие промышленной продукции проявилось в создании условий для внесения в почву химических удобрений. Незадолго до начала Первой мировой войны Фриц Габер разработал процесс получения аммиака из водорода и атмосферного азота. С точки зрения производства взрывчатых веществ для военных целей это было одним из самых важных открытий. В то же время новый процесс позволил организовать выпуск важнейшего ингредиента, необходимого для производства азотных удобрений, широко

используемых для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур на всех континентах. Сегодня большая часть азота, поступающего в ваш организм вместе с пищей, скорее всего, производится с использованием габеровского процесса.

В странах, население которых почти забыло и о годе, и о сельском хозяйстве, промышленный способ производства обусловил трансформацию едва ли не каждого аспекта жизни: того, как мы трудимся и как питаемся, того, где мы путешествуем, а также того, кого мы можем видеть и слышать — не только ныне живущих и находящихся поблизости людей, но и лица и голоса людей с других континентов или давно оставивших наш мир.

Быстрое развитие промышленности повлекло за собой непрерывно увеличивавшуюся потребность в представителях различных специальностей, которые владели бы всеми необходимыми знаниями. В начальный период аграрной революции лишь небольшое количество умельцев занимались изготовлением практически полезных вещей, таких как топоры и корзины из камня, дерева и камыша. Через несколько тысячелетий их круг расширился за счет мастеров, умевших изготавливать вещи из бронзы, железа и стали. На заре Промышленной революции степень сложности производства резко возросла. К тому времени ремесленники освоили обработку железа и стали, изготавливая самые разные продукты от наковален до часов и выпускавшихся мануфактурным способом булавок (самый известный пример). Как отмечал Адам Смит, специализированные инструменты и разделение труда привели к увеличению производительности в сотни и тысячи раз.

Еще одним неожиданным следствием значительного увеличения количества специальностей в промышленности стало ускоренное развитие науки. Производству требовались не только новые научные инструменты, оно предъявляло огромный спрос на научно обоснованные практические знания.

Возникавшие в металлообработке вопросы породили науку о металлургии. Уже на ранней стадии развития металлургия, в свою очередь, привела к появлению едва ли не бесконечного количества специальностей: изучение сплавов, термальной обработки и упрочнения дисперсными частицами; коррозии и образования оксидной пленки; роли дислокаций кристаллической решетки в пластической деформации и усталости металла... И число специальностей непрерывно росло по мере появления новых материалов, инструментов и возможностей их применения. В наши дни достойные ряды молотков и гвоздей, заклепок и двутавровых балок образуют общую область с такими разными материалами, как тонкие металлические пленки и продукты монокристаллического литья. Последние, в свою очередь, находят применение в самых разных сферах. Например, они используются для изготовления наноразмерной проводки в кремниевых микросхемах и подвергающихся экстремальным нагрузкам высокотемпературных турбинных лопаток реактивных двигателей. Изучая материалы, подвергающиеся механическим воздействиям, современные металлурги широко используют химический анализ, электронные микроскопы и рентгеноскопию, разнообразные технические приемы, позволяющие раскрывать свойства и строение объектов, размеры которых варьируются от самолетных крыльев до атомарных кластеров.

Подобно ученым, ведущим исследования в тысячах других областей, специалисты в области металлургии полагаются на способности инженеров, производителей инструментов и издателей журналов, не говоря уже о всех тех, кто обеспечивает им возможность встречаться и делиться знаниями (строители отелей и их менеджеры; авиаконструкторы, изготовители заклепок и летчики), и, конечно же, об относительно узком круге лично знакомых им людей — коллегах, с которыми они, работают в одном здании, или ученых из других стран мира.

Современное разделение знаний дополняет классическое разделение труда. Деревенский кузнец делился объемом своих знаний с другими мастерами кузнечных дел, до которых он мог дойти пешком или доехать на лошади. Современные научные конференции собирают исследователей со всего мира, каждый из которых обладает специфическими экспертными знаниями. В определенном смысле специализация приблизилась к своему пределу, когда каждый эксперт располагает знаниями особого рода и решает соответствующие задачи, что является несомненным преимуществом с точки зрения проникновения в глубину и постижения мельчайших деталей сущего. Но это же самое преимущество одновременно является и барьером, препятствующим пониманию того, как те или иные части сочетаются друг с другом, образуя единое целое. Обращаясь к физическим примерам, мы видим, что важнейшие атомарно точные структуры, созданные разными исследователями в сфере молекулярных наук, хорошо иллюстрируют это несоответствие, поскольку почти никак друг с другом не сочетаются.

Сам процесс систематического научного исследования является продуктом промышленности, поскольку первые научно-исследовательские лаборатории начали появляться при промышленных корпорациях. Так, одной из первых в конце 1800-х стала лаборатория, созданная в концерне Круппов в Германии для изучения свойств легированных сталей. В других лабораториях концерна разрабатывались методы атомарно точного создания субнаноразмерных структур (иначе говоря, методы органического химического синтеза). Другой моделью организации исследований стала «фабрика изобретений» Томаса Эдисона в Менло Парке, в США. В начале XX столетия было создано довольно много и других промышленных научно-исследовательских лабораторий (в частности, в корпорациях *General Electric*, *Westinghouse*, *Bell Telephone* и *DuPont*). Во время Второй мировой войны федеральное правительство США под-

держало расширение исследований в различных областях науки и технологий, выступив учредителем ряда национальных лабораторий, а в послевоенное время — Национального научного фонда в 1950 г. Похожим путем следовали и другие отрасли промышленности и государства, и в некоторых отраслях они преуспели даже больше. В наши дни глобальные расходы на исследования и разработки превышают \$1 трлн в год.

Взаимодействия научных направлений на различных уровнях оказалось весьма продуктивным. Например, квантовая физика обязана своему рождению научным исследованиям, не имевшим практического предназначения. Однако полученные учеными знания привели к преобразованию основ технологии. Например, в применении к исследованиям полупроводников квантовая физика предложила ученым из компании *Bell Laboratories* идеи, благодаря которым был изобретен первый в мире транзистор. Это стало важнейшим шагом на пути к созданию наноразмерных устройств — движущей силы революции в цифровых информационных технологиях.

Преодоление нехватки продуктов питания и увеличение промышленного производства открыли человечеству двери к новым достижениям на пути прогресса. Сельское хозяйство сделало возможным создание цивилизации, а промышленность ее перестроила.

Информационная революция

Аграрная революция начала происходить еще в доисторический период, в то время как промышленная революция с точки зрения истории начала разворачиваться буквально вчера. Отрезок времени, на котором мы стали свидетелями информационной революции, начавшейся с первых вычислителей на электронных вакуумных лампах и приведшей к непостижимому ускорению глобальных изменений в наши дни, укладывается в продолжительность человеческой жизни.

Мне уже трудно представить свою жизнь без доступа к интернет-поиску, хотя я начал пользоваться им, будучи далеко не молодым человеком. «Википедия» на более чем сорока языках, свыше миллиарда пользователей Facebook, глобальный доступ к бесплатным интернет-курсам Массачусетского технологического института — все это и многое-многое другое относится к приметам нашего времени, наряду с деструктивным, но не обязательно вредным давлением на традиционные средства массовой информации и розничную торговлю, полезным давлением онлайн-репутационных систем, дрейфом от реальности в сторону информационных «мыльных пузырей», а также потоками интернет-дискуссий, как весьма поучительных, так и оторванных от реальности. Развитие средств массовой информации обеспечивает обмен слухами и новостями между Нью-Йорком и Новой Зеландией, скорость которого намного превышает быстроту передачи еще в недавнем прошлом отфильтрованных новостей с окраин города до центра Манхэттена.

Информационная революция, переплетаясь со своими предшественницами, уже изменила науку, технику и производственные технологии, обеспечивавшие материальные аспекты перемен. Она сама по себе опиралась на достижения в этих областях и делала их возможными, способствуя осуществлению различных программ в науке, инженерном деле и изготовлении полупроводников, что позволило микроскопическим, практически невидимым устройствам заменить собой светящиеся электронные вакуумные лампы размером с ваш большой палец.

Первые компьютеры с хранимыми в машинной памяти программами были построены в Великобритании в Манчестерском (1948 г.) и Кембриджском (1949 г.) университетах. В первых электронных вычислительных машинах для построения цифровых систем использовались электронные вакуумные лампы; первый полностью транзисторный компьютер был введен в эксплуатацию в 1955 г., в год моего рождения.

По сравнению с машиной на моем столе, первые практические вычислительные машины хранили в миллион раз меньший объем данных, обрабатывая их в 100 тысяч раз медленнее. Многие из них потребляли больше энергии, чем необходимо для освещения жилого дома, весили более тонны и стоили более миллиона долларов (в современных ценах).

Начальная мощность электронных вычислительных машин была низкой, но она стала отправной точкой для последующего экспоненциального роста производительности. И сейчас, несмотря на то, что прошло уже полвека, используемая в компьютерах технология по существу остается неизменной — все те же транзисторные цепи на поверхности¹ кремниевых микросхем. Темпы прогресса задаются скоростью миниатюризации элементов. Экспоненциальный прогресс, продолжающийся уже в течение десятилетий, описывается законом Мура: непрерывная миниатюризация обеспечивает в течение каждых двух лет удвоение количества размещаемых на микросхеме транзисторов. Эти темпы роста означают, что за десять лет количество транзисторов увеличивается в тысячу раз, а за двадцать лет — в миллион раз. В 1971 г. корпорация *Intel* (одним из основателей которой был Гордон Мур, автор знаменитого закона) построила первую вычислительную машину, в которой все компоненты процессора размещались на одной микросхеме (4004). При этом ее производительность была выше, чем результаты многотонных вычислительных машин, демонстрировавшиеся в недалеком прошлом.

Сельскохозяйственное производство поддерживает существование агрокультуры в материальном смысле, а промышленное производство представляет собой материальную основу промышленности. В этом смысле

1. На самом деле не только на поверхности, но и в толще — полупроводниковые микросхемы, созданные по современным технологиям производства, содержат несколько слоев с активными элементами. — *Примеч. ред.*

информационная революция является производным продуктом, результатом прогресса отраслей, обеспечивающих выпуск полупроводников. Ее фундаментальные достижения относятся не к сфере *информации*, а к области *материального производства*. Речь идет о комплексе тесно связанных друг с другом достижений в таких областях, как источники света, оптика и маски, а также проекционные системы, формирующие наноразмерные фотошаблоны на микросхемах. Нельзя не упомянуть и о достижениях в ионном легировании, осаждении из газовой фазы и избирательном травлении, которые преобразуют фотошаблоны в металл, диэлектрик и кремниевые транзисторы.

С материальной точки зрения информационная революция стала результатом традиционной промышленности с традиционной экономической структурой: производство и обработка материалов, сложная цепочка поставок, а в результате — продукты, которые дорого производить и дорого покупать. В то же время с информационной точки зрения информационная революция предлагает человечеству первый пример полного изобилия и демонстрирует возможность выхода за пределы обычной экономической структуры. Неудивительно, что мы до сих пор толком не умеем учитывать результаты интеллектуального труда в бухгалтерской отчетности.

Я полагаю, что инвесторы, вкладывавшие свои средства в надувание «мыльного пузыря» интернет-компаний в конце 1990-х, правильно воспринимали огромную ценность предоставляемых в Сети услуг. Их ошибка была в том, что они переоценили возможности материализации этой ценности в денежной экономике доходов, расходов и корпоративной выручки. Большая часть создаваемой людьми ценности попросту не замечается традиционным бухгалтерским учетом.

Сколько стоят услуги, предоставляемые «Википедией»? По любым разумным меркам — многие миллиарды долларов в год. Какой доход она получает как органи-

ация и какой вклад вносит в увеличение ВВП? Ответ: в обоих случаях равный нулю или очень близкий к этому значению. Аналогично обстоят дела со всем бесплатным контентом, который находится в Сети и в мире открытых источников данных и программного обеспечения. Конкурируя с весьма дорогими продуктами, бесплатные программы предлагают пользователям сравнимую ценность. Но открытые источники информации и продуктов не оставляют следов ни в корпоративной отчетности, ни в консолидированной финансовой статистике. Если использование бесплатных продуктов ведет к сокращению показателя ВВП в расчете на душу населения, то это очень плохо для идеи измерения ВВП как показателя ценности.

В основе рассматриваемой экономической аномалии лежит простой фундаментальный факт. Во многих случаях предельные издержки копирования и доставки информационных благ настолько близки к нулю, что даже коммерческие фирмы не требуют за их предоставление ничего, кроме внимания публики и потребителей к своим именам и достижениям. Помимо внимания, наградой им становится чувство удовлетворения, испытываемое от того, что фирма оказала помощь людям, столкнувшимся с теми или иными проблемами.

Изменилась сама концепция «производства». В материальном мире изготовители несут не только издержки разработки продукта (результатом чего становится техническое задание, записанное в виде некоторого объема данных), но и затраты, связанные с производством и поставкой каждой единицы физического товара. В мире цифровой информации, напротив, результатом того, что мы называем «производством», является собственно некоторый набор данных, в действительности и представляющий собой некий дизайн, в то время как истинное «производство» в смысле изготовления — это процесс копирования данных из одного места в другое, затраты на которое не превышают стоимости используемой электроэнергии.

АТП-революция

Что можно сказать о грядущей АТП-революции с точки зрения трех предшествовавших ей «переворотов»? Как выясняется, очень многое — и сходства, и отличия дают нам богатую пищу для размышлений.

Биологические машины аграрной революции, цифровая наноэлектроника информационной революции и внутренние механизмы АТП-систем — все они демонстрируют нам различные способы, посредством которых наноразмерные устройства могут использоваться в макромасштабных системах, обеспечивая получение полезных результатов. Другими словами, три из четырех революций опирались, прежде всего, на наноразмерные устройства. Единственным исключением была промышленная революция.

Да, в аграрной революции использовались атомарно точные наноразмерные устройства. Однако человек не имел отношения ни к их функционированию, ни к их проектированию. Эти устройства состоят из мягких структур, находящихся в броуновском движении, скручивающихся и переворачивающихся в неупорядоченной внутриклеточной среде. В общем, подобно АТП, эти биологические системы обрабатывают молекулы с атомарной точностью. Но, если рассматривать их как системы, то они имеют слишком мало общего с упорядоченными массивами машин в наноразмерной фабрике.

Подобно системам АТП (но в отличие от клеток), машины информационной революции используют наноразмерные устройства, связанные в устойчивые упорядоченные схемы. К тому же эти устройства изготовлены из твердых материалов, весьма похожих на используемые при производстве традиционных механизмов. Конструкции наноразмерных электронных устройств далеки от атомарной точности и способны обрабатывать только информацию.

Как определить место АТП с точки зрения перспективы трех предшествовавших революций? В нем исполь-

зуются наноразмерные устройства, обрабатывающие материалы с атомарной точностью, но изготовленные из твердых материалов и связанные в постоянные упорядоченные структуры, в большей степени похожие на контуры микросхем, чем на рассеянные в клетках молекулы. Безусловно, поскольку производственные задачи требуют независимых от размеров матриц движения, естественная организация машин и механизмов внутри АТП-системы позволяет провести параллели с той, которая применяется на современных заводах и фабриках.

В то же время, в отличие от промышленных систем, в АТП реализуется сущность цифрового принципа, на котором основываются вычисления. Подобно тому как аналоговые электронные устройства не способны абсолютно точно воспроизвести входной сигнал, промышленные процессы никогда не позволят в совершенной точности повторить заданную форму. И точно так же, как цифровые электронные устройства позволяют точно производить матрицы битов, АТП-механизмы обладают способностью производить точные матрицы атомов, представляющие собой очень крупные, но точные молекулярные структуры. С этой точки зрения АТП означает переносимую в материальный мир цифровую революцию, так как обе они основываются на принципе дискретных шумостойких операций, когда результат достигается посредством соответствия правильно выбранных инженерных ограничений, проистекающих из физических законов.

Подобно АТ-механизмам биологического метаболизма и в противоположность промышленности, АТП не нуждается в охватывающей всю Землю инфраструктуре. Необходимая АТП цепочка поставок может быть такой же короткой, как цепочка от солнечного света и земли до травы и сена, а потом до молока и шерсти. Метаболическая цепочка поставок, если мы проследим ее во всех молекулярных деталях, будет довольно длинной, но, с точки зрения пастуха, она сокращается до не-

скольких простых связей. Как и сельскохозяйственные процессы, АТП способно опереться на общедоступные локальные материалы и солнечную энергию, относительно дешево преобразуемую в электрическую посредством фотоэлектрических элементов. Тем самым появляется возможность избежать выбросов CO_2 .

Все это резко контрастирует с мировой потребительской экономикой современности. Расширение современных отраслевых цепочек поставок обусловлено тем, что производственная деятельность фабрик и заводов основана на использовании рабочей силы и завозимых издалека сырья и материалов. Технология АТ-производства позволяет выпускать более совершенные по качеству продукты без привлечения этих входных ресурсов.

Во всех четырех революциях человеческий труд играл и играет разные роли. В традиционном сельском хозяйстве труд мог быть продолжительным и тяжелым, но он лишь изредка требовал использования новых идей. Повседневный труд в промышленности мог носить такой же рутинный характер, как и крестьянский труд, но динамика конкуренции и непрерывное технологическое развитие обусловили непрерывное возрастание роли новых производственных решений и продуктов; в информационном мире происходит дальнейшее изменение соотношения традиционности и новизны в пользу второй. И для областей использования АТ-производства, и для информационных технологий, решающее значение приобретает созидательный характер труда. В обоих случаях, если инновация сведена к цифровому описанию, она может воспроизводиться бесконечно в любом месте посредством общих и полностью автоматизированных процессов. В информационном мире программа или изображение должны всего лишь копироваться, что требует незначительных затрат труда или ресурсов. В АТ-производстве, вероятнее всего, будут предъявляться примерно такие же требования. Для производства самых современных продуктов, не совсем таких, как в информационном мире, но достаточно близ-

ких к ним, чтобы проводить экономические параллели, будет достаточно небольших затрат труда и недорогих ресурсов.

Сельское хозяйство, цифровые системы и АТП объединяет одна общая черта: в нормальных условиях производственная система не требует, чтобы человек погружал руки во «внутренности» производственной системы, — и фотосинтез, и вычисления, и АТ-обработка прекрасно обходятся без ручного труда. Если бы растения и животные были более кооперативными (и менее уязвимыми перед лицом болезней, сорняков, вредителей и хищников), мы имели бы все основания рассматривать их, наравне с цифровыми системами и АТП, как производственные системы с минимальным участием в них труда.

На этот путь вступает и промышленное производство. На протяжении более ста последних лет промышленность вбирала в себя непрерывно растущую часть совокупного труда. В последнее время эта тенденция обратилась вспять. Многие из современных крупномасштабных производственных систем нуждаются лишь в эпизодических прикосновениях человеческих рук, и степень автоматизации непрерывно возрастает. К тому же ультрачистые «внутренности» систем обработки полупроводников — части, работающие с кристаллическими пластинами, — после контакта с человеческой кожей либо становятся бесполезными, либо даже разрушаются.

Однажды мне довелось посетить расположенный в Пхохане металлургический завод южнокорейской компании POSCO, на котором производится одна тонна стали в секунду. Взобравшись на узкую площадку, расположенную под потолком огромного цеха, я увидел линию огромных механизмов прокатного стана. Я искал глазами рабочих, но лишь спустя некоторое время в самом конце корпуса я увидел поднимавшегося вверх по лестнице одного-единственного человека.

Производство, основывающееся на АТП, по самой своей природе (высокопроизводительный капитал, не-

значительная потребность в труде и бережливое использование недорогих материалов) способно обеспечить резкое сокращение производственных затрат до уровня, не имеющего почти никакого отношения к величине современных издержек. Но издержки — это лишь один из аспектов полного изобилия. Внедрение АТП в производственные процессы приведет не только к радикальному расширению круга современных промышленных товаров. Последние будут изготавливаться из самых лучших материалов и компонентов, что в некоторых случаях позволит добиваться несоизмеримо более высоких результатов их использования. В частности, замена недорогих стальных конструкций более легкими и прочными материалами могла бы привести к десятикратному удешевлению строительства. Аналогично замена и модернизация портативных электронных устройств способна привести к тысячекратному снижению издержек при одновременном увеличении вычислительной мощности в миллион раз.

С исторической точки зрения производство, основанное на АТП, обещает нам еще одну великую революцию, которая потребует пересмотра подходов к истории человечества и будет сопровождаться невиданными по масштабам вызовами и возможностями. Аграрная революция позволила обеспечить пропитанием большее количество людей, что потребовало распространения тяжелого труда и нехватки ресурсов, одновременно запустив процессы, приведшие к появлению цивилизаций, войнам и технологическому прогрессу. Промышленная революция привела к увеличению объемов производства всего необходимого людям — продуктов питания, жилья, транспортных услуг и домашних вещей. Человечество вступило в эпоху экономической и глобальной конкуренции, результатами которой стали довольно шаткая мировая экономика и изменение военного равновесия в мире.

Промышленная революция открыла возможность увеличения производства продукции темпами, превос-

ходящими рост численности населения, что позволило преодолеть возрастные ограничения, избежать мальтузианской ловушки и добиться невиданного прежде процветания. Но сегодня все громче раздаются голоса о том, что революция подошла к своему завершению, приблизившись к пределам экспоненциального роста. Производство, основанное на АТП, способно предложить альтернативу, приподнимая наш мир над мальтузианской ловушкой и открывая перед человечеством (если мы проявим должную осторожность) далекие горизонты будущего.

Темпы роста внедрения инноваций все более возрастают, и информационная революция подсказывает, что может нас ожидать в будущем. Рассматриваемые в совокупности параллели между производством, основанным на АТП, и цифровыми информационными системами позволяют предположить, что новая эра атомарно точного изготовления может наступить сравнительно быстро. Едва ли эра АТП растянется на тысячелетия, как это произошло с сельским хозяйством, или столетия, как в случае с промышленностью, и даже на десятилетия, как в случае с созданием материальной инфраструктуры Интернета. Наша перспектива — революция, которой не придется иметь дело с «бутылочным горлышком» производства, поскольку его методы будут примерно такими же, как при совместном использовании видеофайла. Другими словами АТП обладает таким потенциалом материальной революции, который в отсутствие ограничений способен обеспечить его распространение со скоростью новых цифровых медиа.

Прежде чем мы окажемся в реальных волнах грядущей революции, хорошо было бы попытаться понять, какими могли бы быть наши впечатления и ощущения от наноразмерного мира. Каким бы воспринимался этот мир, если бы наши чувства и физика позволили бы проникнуть в него? Пришла пора учиться думать о малом — если быть точным, то о том, что меньше малого в десять миллионов раз.

ТАБЛИЦА 1. Четыре революции в сравнении

Сущность	Воздействие на человека
АГРАРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ	
Предоставила новые средства производства продуктов питания и материалов посредством использования производственных возможностей молекулярных наносистем живых организмов	Распространение постоянных поселений и инвестиций в земельные участки привело к более чем сто-кратному увеличению плотности населения. Открылась возможность развития городов и цивилизации
ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕВОЛЮЦИЯ	
Предоставила новые средства производства материальных объектов посредством использования производственных возможностей искусственных механических систем человеческого масштаба	В течение двухсот лет производственные мощности увеличились более чем в сто раз. Открыла возможности производства новых продуктов, появления новых образов жизни и непрерывных изменений в структуре цивилизации
ИНФОРМАЦИОННАЯ РЕВОЛЮЦИЯ	
Предоставила новые способы обработки информации с помощью высокочастотных наноразмерных устройств, используемых для обработки и доставки последовательностей битов	Привела к экспоненциальному росту мощностей по обработке информации (в настоящее время они возросли более чем в миллиард раз). Открыла возможность создания новых информационных продуктов и новых способов организации материального и человеческого мира на основе непрекращающихся изменений в структуре цивилизации
АТП-РЕВОЛЮЦИЯ	
Предоставит новые средства производства материальных объектов	Как и каждая из предшествовавших революций, она приведет к глубоким изменениям в продуктах, производительности, средствах производства и в человеческом обществе.
Как и в аграрной революции, будут использоваться атомарно точные производственные машины	Способна обеспечить увеличение производительности в сельском хозяйстве, промышленности и вычислениях в 10–1 000 000 раз
Как и в промышленной революции, для производства различных вещей будут использоваться искусственные механические системы	Способна привести к резкому расширению масштабов и увеличению

ТРИ ПРОШЕДШИЕ РЕВОЛЮЦИИ

Сущность	Воздействие на человека
Как и в информационной революции, для обработки и доставки последовательностей (но состоящих скорее из атомов, чем из битов) будут использоваться высокочастотные наноразмерные устройства	видов производства продукции, трансформации материального базиса цивилизации и сокращению воздействия деятельности человека на климат и Землю в целом

Как можно увидеть и почувствовать наноразмерный мир?

ОБЫЧНОМУ человеку довольно трудно понять, как именно взаимодействуют друг с другом молекулы, потому что этот процесс визуализируют очень большим количеством разных способов. Молекулярные взаимодействия представляют и в виде капель или облаков плотности, и в виде шариков на стержнях, и как скелетные структурные диаграммы, и как рисунки в популярной прессе, на которых одновременно изображаются и микробы, и превосходящие их в десять тысяч раз машины. В отсутствие контекста эти изображения способны легко ввести зрителя в заблуждение. Для того чтобы взглянуть на суть АТП-систем ясным взором, было бы полезно принять логически последовательную точку зрения на наноразмерный мир.

В молекулярных науках исследователи часто используют в отношении молекул хорошо знакомые механические термины, описывая их как мелкие подвижные объекты, характеризующиеся размером, формой и прочностью. И хотя некоторые виды молекул обладают необычным разнообразием и демонстрируют отличное от большинства поведение, для части молекулярных объектов можно легко установить набор характерных признаков. Это твердые устойчивые молекулярные объекты такого типа, который в наибольшей степени подходит для создания высокопроизводительных наноразмерных механизмов; отметим, что машины, изготовленные из подобных деталей, обладают удивительным сходством с более крупными, используемыми

и повседневной жизни механическими устройствами. Для того чтобы визуализировать технику атомарно точного производства мы можем использовать способ, являющийся одновременно и качественно интуитивным, и количественно реалистичным.

Искомый вид наноразмерных объектов и механических устройств нам способны предложить правильно выбранный ракурс и должное увеличение. Условием надежного обоснования необычных концепций является осознание того, насколько много из относящегося к делу может быть понято с помощью здравого смысла и нескольких ключевых фактов.

Например, АТП имеет дело с жесткими молекулярными структурами. Даже самые современные вычислительные модели, используемые в молекулярных науках, описывают такие структуры в терминах механики как материальные объекты, каковыми они и являются. Безусловно, они могут быть осознаны человеком посредством нейронных механизмов. Ведь их эволюция в течение десятков тысяч лет была направлена как раз на то, чтобы люди могли бы справляться с материальным миром.

Магнитно-резонансная томография мозга человека показывает, что на клеточном уровне в процессах обработки визуальной информации и визуальной памяти задействованы одни и те же нейроны. Почти сто лет назад электромиография показала, что воображаемые действия вызывают такие же мышечные реакции, которые имели бы место при реальных движениях; возможно, поэтому игроки в теннис, проигрывая в уме правильные действия на корте, улучшают свою игру. Для того чтобы понять надвигающуюся революцию в атомарно точной нанотехнологии, мы можем использовать эту человеческую способность для активации тех частей нашего мозга, которые направляют наши руки в момент работы с инструментами.

Когда ученые изучают модели молекулярных структур посредством компьютерного интерфейса, они достигают не только визуального, но и кинестетического понимания поведения этих объектов. Эксперименталь-

ные методы и вычислительная химия способны предложить не только количественные данные, но и интуитивно точное физическое ощущение молекул как объектов. Интуитивное восприятие способно дополнить и уточнить прогноз, полученный в результате расчетов и применения правил масштабирования¹.

Молекулы характеризуются размером, формой, массой, импульсом, силой, жесткостью и так далее, и сегодня более крупные молекулярные объекты выглядят все более и более понятно². Некоторые крупные молекулы прекрасно известны всем; например, единственной молекулой является алмаз³, равно как и большая часть автомобильной резиновой шины.

Нет никакого смысла представлять какие-либо объекты как «малые и невидимые». Мы не способны увидеть ни атомы, ни молекулы, ни красные кровяные тельца.

1. Одно из них заключается в том, что увеличение линейных размеров вдвое означает возрастание площади некоей области в четыре раза; в соответствии с другим — изменение площади поперечного сечения предполагает пропорциональное масштабирование силы.
2. В действительности, в контексте наномеханической инженерии АТП-уровня, понятие «молекула» во многих случаях используется в отношении устойчивых ковалентных структур, состоящих из соединенных колец. В отсутствие конформационной свободы эти структуры могут принимать четко выраженные и очень жесткие, устойчивые формы. Конечно же, существуют молекулы и многих других типов. Некоторые из них могут быть смоделированы как цепочки связанных вращающихся звеньев (например, молекулярные нити типичных полимеров). Сегодня наибольший практический интерес в контексте наномеханической инженерии вызывают гораздо более пригодные к химическому синтезу уложенные полимерные цепочки (более подробно потенциал этих наиболее доступных механизмов рассматривается в главе 12 и приложении II).
3. Это не совсем точное определение, допустимое для инженера, каковым является Э. Дрекслер, но недопустимое для физика или химика, который в этой точке справедливо отметит, что у алмаза можно выделить области в толще кристалла и вблизи поверхности, и в этих областях алмаз будет обладать разными физико-химическими свойствами. — *Примеч. ред.*

При этом по массе и сложности они могут отличаться друг от друга в триллион и более раз. Ключом к формированию полезного и понятного визуального образа является последовательное увеличение.

Представьте себе, что мы увеличиваем наноразмерный мир в 10 миллионов раз, «растягивая» нанометровые объекты до размеров, измеряемых в сантиметрах. Мы увидим, что типичный атом представляет собой сферу диаметром примерно 3 миллиметра (размер, равный бусинке или прописной букве О в шрифте небольшого кегля). Размеры простых частей атомарно точных машин, таких как шестеренки и подшипники, увеличиваются до нескольких сантиметров в длину. Более сложные АТ-устройства (наноразмерные моторы, планетарные передачи и сборочные машины с кулачковым механизмом) имеют большие размеры, но остаются относительно малыми, помещаясь на ладони. Если мы взглянем на мир через это увеличительное стекло, то обнаружим, что наноразмерные и традиционные машины стали полностью сопоставимы в размерах.

Когда мы смотрим на мир через увеличительное стекло, изображения нано- и макромашин становятся близки по своим размерам. А что происходит с микроразмерными объектами? В нашем мире, увеличенном в 10 миллионов раз, человеческие белые кровяные тельца, размером 10 микрон, разрастаются настолько, что они способны заполнить собой стадион; человеческий волос, диаметром в 100 микрон, превращается в цилиндр диаметром в 1 километр; а человек обретает способность охватить своими увеличившимися в размерах руками земной шар.

Условно говоря, при таком увеличении наномеханическая система, сравнимая по сложности с фабрикой, приобретает размеры реального предприятия. Используя увеличительное стекло, мы видим, что АТП-системы на удивление тривиальны. В большинстве своем они представляют собой сочетания хорошо знакомых нам вещей. Некоторые их аспекты действительно являются новыми, но в них нет ничего таинственного.

Растяжение времени в равной пропорции

Давайте сделаем еще один шаг вперед и «растянем» в выбранной нами пропорции время, как это происходит в замедленной съемке, используемой для «захвата» движений, слишком быстрых для человеческого глаза. Применение того же самого масштаба (10 миллионов раз), когда нанометры растягиваются до сантиметров, означает что наносекунды превращаются в сентисекунды, а микросекунды увеличиваются примерно до полутора минут. Этот шаг — масштабирование времени — является ключом к двери, за которой нас ожидают удивительные результаты.

При равномерном растяжении пространства и времени такие свойства, как масса, сила и скорость, масштабируются в точности так, чтобы механические движения оставались одинаковыми. Скорость один нанометр в наносекунду в точности получается равна скорости один метр в секунду. Просто она измеряется в других единицах. Поэтому для деталей машин геометрически подобной формы, независимо от их размеров, будут проследиваться геометрические схожие траектории в пространстве-времени.

Рассмотрим два обычных колеса разных размеров, которые катятся по одной и той же дороге. Если диаметр и длина окружности одного из них в два раза меньше, чем у другого, то для преодоления одной и той же дистанции, первое должно будет совершить в два раза больше оборотов, чем второе — то есть частота его вращения должна быть в два раза выше. Таким образом, если мы поддерживаем равенство скорости качения, когда количество оборотов в секунду обоих колес обратно пропорционально их размерам, то, растягивая пространство и время, мы получим идентичное движение качения. Этот закон масштабирования распространяется на все без исключения преобразования; в данном случае мы имеем дело с простым геометрическим подобием.

Перейдем к рассмотрению двух колоколов, изготовленных из идентичных материалов, но различающихся по размерам (один из них в два раза превосходит другой). Ударим в оба и увидим, что частота звучания меньшего колокола будет в два раза выше, чем аналогичный показатель большего колокола. Если мы растянем пространство и время в два раза, то меньший колокол будет звучать ровно так же, как изначально звучал больший колокол, в той же самой тональности, с теми же самыми звуком и частотой. Другими словами, при постоянных модулях плотности и упругости, шкала частоты механических колебаний обратно пропорциональна размерам колокола⁴.

И наконец, рассмотрим две струны, изготовленные из одного и того же материала. Длина и диаметр одной из них в два раза меньше, чем аналогичные показатели другой. Представим себе, что мы растягиваем их до одной и той же степени натяжения — на величину, составляющую половину от предела прочности. Если мы щипнем обе струны, то меньшая из них издаст звук на октаву выше. Иначе говоря, частота ее звучания будет в два раза выше. И вновь мы видим, что частота колебаний обратно пропорциональна размеру.

Наши колеса, колокола и струны иллюстрируют прекрасный по своей простоте принцип. Если некие объекты изготовлены из схожих материалов (равных по плотности, жесткости и прочности), то в случаях, когда скорость и механическое напряжение остаются постоянными, их движения при масштабировании будут пропорциональны друг другу в пространстве и времени. Тональности и частоты колоколов, динамика массы и силы струн, и даже напряжение и деформации, вызванные центростремительными силами, возникаю-

4. В общем случае отношение частот колебаний колоколов обратно пропорционально кубическому корню их масс, однако в случае геометрического подобия, о котором идет речь, сводится к обратному отношению линейных размеров. — *Примеч. ред.*

щими в катящихся колесах, — все они становятся идентичными, когда мы растягиваем пространство и время с помощью волшебного увеличительного стекла. Все то, что справедливо в отношении колес, колоколов и струн, в равной степени справедливо и для механизмов.

Мы приходим к удивительно простому результату в условиях постоянных скорости, механического напряжения и свойств материала, — большие и малые машины ведут себя одинаково. Уменьшение масштаба машин в 10 миллионов раз означает увеличение частоты всех движений — то есть количества операций, выполняемых в одну секунду — в те же 10 миллионов раз. Другими словами, в нашей воображаемой замедленной съемке поведение машин было отображено абсолютно точно и с количественной, и с качественной стороны.

Простое отношение масштабирования играет ключевую роль в понимании мира наномашин, что является важнейшей чертой основы полного изобилия.

И все же представления о масштабировании недостаточно для того, чтобы нарисовать картину размеров и скоростей машин в наноразмерном мире. Для более полного проникновения в сущность АТП, нам необходимо представить, как будут *осязаться*, ощущаться их компоненты. Прежде чем перейти к рассмотрению будущих наномашин, давайте бросим взгляд на атомарные структуры поверхностей знакомых нам вещей.

Рассмотрение под увеличительным стеклом атомарных структур

Как предполагали еще наши далекие предки и подтвердили химики, все, что нас окружает, состоит из одних и тех же основных компонентов. Но если на интеллектуальном уровне нам может быть известно, что атомы и молекулы образуют все сущее, до чего мы способны дотронуться (даже наши тела), то связь между тем, что мы видим, и молекулярными свойствами далеко не все-

гда очевидна. Впрочем, при более близком изучении эти связи прослеживаются весьма наглядно.

Благодаря усилению в 10 миллионов раз мы можем наглядно разглядеть глубинное устройство повседневных вещей, прежде чем наше внимание сосредоточится на совершенно тривиальных свойствах наномашин. Для того чтобы понять, как знакомые нам материалы могут отражать характеристики своих атомарных компонентов, рассмотрим четыре очень сильно отличающихся друг от друга объекта: воду, рыболовную леску, рыбу и бензиновый двигатель для моторной лодки.

Почему вода является жидкой, текучей средой? Ведь отдельные ее молекулы никак не назовешь жидкими, и при низких температурах они объединяются в твердый лед. Вода образует текучую среду потому, что ее молекулярные части (фрагменты нанометровых размеров) способны перемещаться, присоединяясь на время друг к другу, но вскоре переходя к другой молекуле, не останавливаясь подолгу на одном месте. Каждая отдельная молекула воды движется непредсказуемым образом, совершая случайные термодинамические флуктуации. Однако в более крупном масштабе вода ведет себя настолько предсказуемо, что физикам не нужно задумываться об отдельных молекулах. Вместо этого они используют для описания и расчетов такие понятия *гидродинамики*, как давление, скорость, сжимаемость, плотность и вязкость. Вода может описываться как *жидкость* вплоть до масштаба, измеряемого в нанометрах; лишь после этого атомарная структура поверхности заставляет нас перейти к мышлению в терминах *молекулярной* динамики.

В этом нанометровом масштабе вода предстает перед нами совсем иначе. Разглядывая наноразмерный мир через увеличительное стекло, мы увидим, что вода сохраняет текучесть, только она перестает быть плавной. Если бы могли видеть движения молекул, то поверхность наблюдаемой жидкости предстала бы перед нами как совокупность танцующих, перемешивающихся, колеблющихся (в результате термодинамических

флуктуаций) бусинок, чаще сцепленных друг с другом, но иногда вырывающихся на свободу и присоединяющихся к рюю летающих молекул, который мы называем «водяным паром».

Наш второй объект — нейлоновая рыболовная леска. Важнейшей ее характеристикой является прочность — материал должен сохранять целостность независимо от того, провисает леска или испытывает огромное напряжение по всей своей длине. Ее макроскопические свойства описываются с использованием лексики механики упругого тела, в то время как микроскопические параметры переключаются с использовавшимися нами в гидродинамике. На смену вязкости и внутреннего трения в жидкости для нейлона мы используем показатели твердости и эластичности. Как и в случае с водой, молекулярная структура поверхности нейлона различима только в нанометровом масштабе. Благодаря нашему увеличительному стеклу мы видим, что прочность макроскопической нити обусловлена прочностью звеньев цепочек, формирующих длинные полимерные молекулы, которые могут простираться на сотни метров в поле нашего вооруженного увеличительным стеклом зрения. Таким образом, прочная макроразмерная нить превращается в пучок прочных молекулярных нитей, сцепленных между собой и удерживающих друг друга. Каждая полимерная молекула напоминает нитку бисера, настолько тонкую, что вы можете зажать в кулаке несколько десятков нитей. В увеличенном изображении ширины лески будет сравнима с шириной озера.

Мы можем довольно легко отобразить внешний вид жидкостей и полимеров. Гораздо более сложная картина возникает в случае, когда объектом нашего изучения становятся видимые только наноразмерным зрением организмы или его отдельные клетки.

С рыбой все не так просто. В своей повседневной водной жизни рыбы осязают и ощущают, передвигаются, в них происходит обмен веществ, у них заживают разного рода повреждения. Наконец, рыбы растут. Но, как

и в случае с простыми жидкостями и твердыми телами, то, что происходит с рыбой на макроуровне, является результатом процессов, происходящих в мелких масштабах — деятельности отдельных клеток различных типов, которые и сами по себе способны осязать, двигаться, метаболизировать, восстанавливать утраченные части и расти. Если всмотреться более внимательно, мы увидим, что микромасштабное клеточное поведение проистекает из соответствующих видов деятельности в молекулярном масштабе. Клетки ощущают воздействие внешних раздражителей посредством молекулярных устройств (в сетчатке, например, это чувствительные к свету молекулы опсина и имеющиеся во всех тканях рецепторы, чувствительные к гормонам); движение клеток происходит благодаря молекулярным моторам (таким как миозин в мышцах и динеин в жгутиках); для преобразования простых молекул в процессе обмена веществ клетки используют ферментные механизмы (и АТФ-синтазу в качестве двигателя для этих производственных механизмов). Наконец, клетки замещают поврежденные части и растут посредством построения крупных, более сложных молекулярных компонентов с помощью программируемых молекулярных механических систем (в частности, рибосом).

То, как работают эти механизмы, нам незнакомо и непонятно. Они функционируют иначе, чем привычные нам устройства макромасштабного мира. Некоторые из них служат механизмами, но движения этих устройств тесно связано с тепловым движением окружающих их молекул воды. Поэтому они характеризуются значительной степенью текучести.

Через наше десятиллионнократное увеличительное стекло мы увидели бы, что молекулярные машины состоят из множества молекулярных компонентов — гибких, неправильных по форме, но структурированных с атомарной точностью. В большинстве случаев эти молекулы невелики по размерам и помещаются в ладони руки. Иногда они связаны друг с другом, образуя сборки, которые могут варьироваться от десятков сантиметров в диаметре

(размер рибосомы) до десятков или сотен метров в длину (например, микротрубочки и волокна цитоскелета — мобильной структуры, определяющей форму клеток).

Погрузившись столь глубоко в нашу рыбу, мы оказались в мире молекулярной биологии, основы для создания инструментов молекулярного производства, сыгравших важную роль в прогрессе современной АТ-инженерии. Клетки, с их мягкими изменчивыми структурами, совсем не похожи на АТП-заводы. Но используемые ими инструменты подтвердили свою полезность при создании молекулярных компонентов, необходимых для создания новых инструментов, которые в свою очередь, шаг за шагом, могут быть применены для строительства систем АТП-уровня.

Будущие наноразмерные инструменты неизбежно будут иметь довольно много общего с современными макромасштабными машинами. Приглядимся к последним более внимательно.

В отличие от остальных рассматривавшихся нами примеров, в наноразмерной структуре бензинового двигателя отсутствуют четко выраженные молекулярные компоненты, и глядя на нее, сделать выводы о макромасштабном применении устройства затруднительно. Подвижность воды вытекает из подвижности ее молекул; прочность нейлоновых нитей вытекает из прочности полимерных нитей, из которых они состоят; молекулярные моторы позволяют двигаться организмам и клеткам, из которых они образованы; молекулярные датчики позволяют глазам и их клеткам ощущать свет, и так далее. Количество подобных примеров бесконечно. Какое место в этом ряду занимает бензиновый двигатель и его металлические компоненты?

Если сфокусироваться на материале, то свойства используемой в двигателе стали вне всяких сомнений отражают свойства металлов в молекулярном масштабе, свойства так называемой металлической связи между слоями атомов. Если бы мы могли проникнуть взглядом внутрь стального листа в момент удара по нему молот-

ком, мы увидели бы, что слои атомов способны скользить один по другому, проявляя пластичность под напряжением; напротив, в листе стекла отсутствуют слои молекул и ему не свойственна пластичность. Поэтому если при ударе на металлическом листе образуется вмятина, то стекло разлетается на мелкие кусочки.

В то же время мощность двигателя в целом никак не вытекает из молекулярных свойств стали, ни из свойств смазочных жидкостей, ни из выделения тепла в замкнутом пространстве, когда молекулы топлива соединяются с кислородом⁵. Если в мышцах молекулярная энергия преобразуется в движение посредством молекулярных машин, то в двигателе ничего подобного не происходит. Его макроскопическое действие является сугубо макроскопическим эффектом, а наноразмерная структура не повторяет поведения самого двигателя.

Разработка механизмов, необходимых для развития АТП предполагает перевод функциональных устройств макромасштабного оборудования на язык наноразмерного мира. Функции жестких металлических структур, таких как шестерни или валы двигателя, могут выполняться жесткими атомарно точными наноразмерными структурами. При этом они будут иметь целый ряд ключевых отличий. Например, поскольку масштабирование теплового потока отличается от масштабирования механического движения (в частности, в наноразмерном контейнере газы охлаждаются почти мгновенно), процесс внутреннего сгорания должен будет уступить дорогу нетепловым методам использования химической энергии. Схожим образом, в силу различий в мас-

5. Автор прав в том, что характеристики двигателя внутреннего сгорания в целом нельзя вывести простым масштабированием всех происходящих в нем отдельных процессов, однако выделяемая мощность на единицу рабочего объема действительно зависит от всех перечисленных характеристик как от совокупности факторов. — *Примеч. ред.*

штабировании электромагнитных сил и механического движения (уменьшение сечения проводов и силы тока приводит к значительному ослаблению магнитных сил), в электромоторах естественным образом на смену магнитным полям идут электрические. Как только это происходит, альтернативные способы использования химической энергии и электрической мощности демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с современными двигателями и моторами, что сопровождается повышением значений потенциальных показателей плотности энергии до уровней, ограниченных по большей части способностью к охлаждению в макромасштабе⁶.

Замещение двигателей внутреннего сгорания технологиями преобразования энергии, базирующимися на АТФ, завершило бы упоминаящуюся выше симметрию. В этом случае функция макромасштабного мотора получит отражение на молекулярном, наноразмерном уровне, и двигатели встанут в один ряд с жидкостями, лесками и рыбами.

Текстура поверхности атомарно точных механизмов

Ни нейлон, ни сталь, ни рыба не имеют частей, схожих с деталями известных нам сегодня машин, которые принципиально отличаются даже от биологических молекулярных машин, состоящих из гибких полимерных компонентов неправильной формы и перемещающихся посредством теплового движения. Применяемые в развитых АТФ-технологиях наномашин будут напоминать

6. В соответствии с механическими законами масштабирования (вновь высокая частота), эти наноразмерные устройства способны достигать высокой энергии посредством движений, перемещающих молекулы и электроны на наноразмерные расстояния за время, измеряемое в наносекундах.

знакомые нам механизмы по форме и функциям, отличаясь структурой поверхности.

Функции этих наномашин могут показаться до абсурда знакомыми. И на это есть веская причина. Задачи заводских машин заключаются в перемещении и позиционировании используемых для сборки деталей; они практически не зависят от размеров. В соответствии с законами механического масштабирования выполнение этих задач с помощью наномеханических систем не требует внесения принципиальных изменений в процесс изготовления.

Отличие наноразмерного мира заключается в способе взаимодействий материалов при их соприкосновении. Данное обстоятельство имеет важнейшее значение, так как беспрепятственное движение частей машины является залогом ее правильной работы. Однако наличие на поверхностях деталей атомарных выступов и впадин ставит под сомнение возможность их гладкого движения относительно друг друга.

В машинах большинство движущихся частей имеют поверхности, которые либо прижаты друг к другу без проскальзывания, либо скользят друг по другу с минимальным трением. Например, в двигателях валы удерживаются с помощью шариков или цилиндров или, в более простых случаях, посредством использования гладких смазанных поверхностей, скользящих одна по другой; предназначение подшипников состоит в том, чтобы скользить с минимальным трением. К шестерням и приводным ремням предъявляются противоположные требования; поверхности этих деталей должны обеспечить отсутствие скольжения при соприкосновениях или зацеплениях.

В наноразмерном мире не может быть идеально плоских поверхностей. При увеличении в 10 миллионов раз выясняется, что даже самые ровные, самые гладкие поверхности представляют собой совокупности теснящихся рядом бугорков, каждому из которых соответствует атом. Возможно ли функционирование наномашин с бугристыми поверхностями? Чтобы ответить на этот во-

прос, рассмотрим, что происходит при соприкосновении атомарно структурированных поверхностей⁷.

Предположим, перед вами находится гладкая поверхность, состоящая из плотно упакованных рядов атомов. Вам необходимо дотронуться до нее рукой, одетой в перчатку, пальцы которой заканчиваются единичными атомами. За мгновение до того, как вы дотронетесь до поверхности, вы почувствуете, что ваши пальцы вдруг сами устремились к объекту. Такие же ощущения возникли бы у вас в том случае, если бы вы попытались установить сильный магнит на двери домашнего холодильника. Когда вы поднесете его достаточно близко к поверхности двери, магнит устремляется к ней, едва ли не вырываясь из рук. В нашем случае поверхности и перчатки имеет место схожий эффект. Однако вызван он отнюдь не магнетизмом. Его причина — возникающее на малых расстояниях притяжение, существующее между всеми формами материи и известное как дисперсионное, сила Ван-дер-Ваальса или Лондона (знаменитая сила Казимира представляет собой более слабый аспект того же самого взаимодействия, проявляющийся на более значительных расстояниях⁸).

Когда кончик пальца руки вступит в контакт с поверхностью, вы ощутите, что она так же тверда, как сам материал — как если бы вы ощупывали стальную плиту. В то же время, если бы кончики ваших пальцев обладали повышенной чувствительностью, в точке соприкосновения с бугорками вы могли бы ощутить некую податли-

7. Эти замечания относятся только к прочным материалам с инертными неполярными поверхностями. Специалисты по поверхностям, возможно, напомнят о графене или о пассивированных ковалентных поверхностях, таких как алмаз с концевыми водородными группами, или кремний.

8. Это не совсем верно, поскольку сила Казимира является вторичным квантовым эффектом, проявляющимся при наличии граничных условий в решении задачи вторичного квантования и, в отличие от силы Ван-дер-Ваальса, не имеет классического объяснения. — *Примеч. ред.*

вость, как если бы на их поверхности имелся тонкий мягкий слой миллиметровой толщины. Это легкое мягкое сопротивление вытеснению одного атома другим называется «перекрывающимся выталкиванием», благодаря которому, например, мы не можем проходить сквозь стены.

Чтобы получить представление о том, как воспринимается эта сила, увеличим атомы до размеров мячика для пинг-понга и возьмем один из них в руку. Каждый атом будет восприниматься как твердая сфера, окруженная мягким скользким слоем толщиной несколько миллиметров. Если вы попытаетесь катнуть две такие сферы навстречу так, чтобы они разошлись на очень небольшом расстоянии друг от друга, они будут вести себя подобно отталкивающимся магнитам, сохраняя дистанцию и не соприкасаясь. Каждый атом образует бугорок в свободном от трения силовом поле.

Итак, теперь, когда все атомы вернулись к своим стандартным размерам, кончик вашего пальца лежит на ровной поверхности. Верхние слои перчатки и поверхности состоят из колонок и рядов маленьких гладких атомарных бугорков. Если бы перчатка была абсолютно гибкой, вы могли бы осязать каждый отдельный бугорок. Но я, напротив, предлагаю вам вообразить, что кончик отдела перчатки для пальца тверд, как сталь, и является почти плоским. Если бы вы провели одним пальцем по поверхности, вы не смогли бы ощутить воздействие отдельных бугорков; вместо этого у вас возникло бы ощущение единого воздействия от множества расположенных вблизи друг к другу бугорков. В этом самом месте полученные нами результаты приобретают интерес и для конструктора машин.

* * *

Что если вашей машине необходима пара скользящих поверхностей или пара поверхностей, которая могла бы вращаться без проскальзывания? Если поверхности имеют неровную структуру, их атомарные бугорки будут затруднять скольжение или вращение. И наоборот, поверхно-

сти с правильными рядами атомов, в зависимости от пространственного положения и совпадения по направлениям, полностью отвечали бы нашим требованиям.

Рассмотрим, что могло бы произойти, если бы ряды атомов совпадали бы друг с другом, то есть если бы гребни, образуемые рядами атомов на вашей перчатке, попадали бы точно в углубления, образуемые на поверхности рядами ее атомов. Скользящий по поверхности палец воспринимал бы такую поверхность как очень сильно ребристую. Если бы гребни и впадины были более глубокими и частыми, сцепление было бы более сильным, и вы обнаружили бы, что палец невозможно сдвинуть с места. В данном случае условия для скольжения отсутствуют, но вращая кривой поверхностью кончика вашего пальца, вы все же смогли бы двигать его взад и вперед — зацепляющиеся гребни действовали бы подобно зубьям шестеренки (в машине они выполняли бы в точности эту функцию). Если поверхности имеют выступы и впадины, сцепление происходит довольно легко. Но способны ли мы получить скользящие поверхности, аналогичные тем, что используются в подшипниках? Поверните палец под углом, так чтобы ряды атомов не могли сцепляться друг с другом, и вновь оцените возможность скольжения. Сейчас каждый ряд атомов на кончике пальца одновременно скользит по множеству рядов на испытываемой поверхности; поскольку отдельные атомы подобны мягким скользящим сферам, в отсутствие зацепления вы почувствуете, что палец свободно перемещается. Более того, если ряды в значительной степени не совпадают по направлению, вы едва ли ощутите, что на поверхности имеются бугорки. Неудивительно, что вычислительные модели предсказывают в этом случае предельно низкое трение.

Проведенные эксперименты подтвердили правильность этого предсказания. В лаборатории роль пальца исполняет сканирующая головка микроскопа, роль перчатки — пластинка графита или дисульфида молибдена, а наличие сил трения проверяет скользящая по поверх-

ности головка. Ученые окрестили этот феномен «суперсмазываемостью» и охарактеризовали его, лишь немного преувеличив, как «состояние исчезновения трения». Используя суперсмазываемость, наномашинны способны выполнять операции с эффективностью, определяемой почти полным отсутствием трения.

Существуют и другие возможности использования этих отличающихся по направлению атомарных рядов (включая не только несовпадающие углы, но и разное расстояние между рядами и количество рядов вокруг окружности) расположенных на окружности цилиндров. Наблюдая в электронный микроскоп за движением углеродных нанотрубок, игравших роль таких цилиндров, экспериментаторы наглядно продемонстрировали работу каждого из этих принципов, протестировав, таким образом, прототипы наноразмерных подшипников качения и скольжения. И вновь полученные результаты полностью соответствовали вычислительным моделям, что подтверждает ключевые принципы работы будущих наномеханизмов.

Тем не менее полностью силы трения никуда не исчезают. Хотя статическое трение может быть эффективно равным нулю, остается сопротивление, возрастающее пропорционально скорости. Это тормозящая сила, подобная сопротивлению, которое вы ощущаете в макром мире, когда быстро проводите пальцем по поверхности смазанной очень сколькой, но немного вязкой жидкостью.

Качение без скольжения; скольжение практически без трения — все это желанные, с точки зрения инженеров, свойства контактирующих друг с другом движущихся частей. (Третье конструкторское желание заключается в скольжении *вместе* с трением; это свойство было бы полезным при проектировании амортизаторов или тормозов, но, как легко догадаться, только в том случае, когда присутствие и отсутствие трения можно было бы легко регулировать.)

Инженерная механика едва ли не полностью основывается на использовании твердых тел и скользящих или

катыщихся поверхностей (вместе с несколькими другими простыми компонентами, такими как пружины и тормоза). Удивительно, но в большинстве случаев единственное отличие подобных подходов состоит в размерах механизма. Таким образом, большая часть наших знаний о машинах и системах машин (хорошо всем знакомые части современного мира) переносится на наномеханические системы, способные выполнять работу, необходимую для атомарно точной обработки материалов. Поскольку масштабированный взгляд отличается высокой качественной и количественной точностью, неформальное понимание и инженерный анализ полностью совпадают.

Впрочем, должны быть и различия? До сих пор в поведении машин в наноразмерном мире не было ничего нового, за исключением того, что мы должны были учитывать атомарную поверхностную структуру. Однако мы должны рассмотреть еще один аспект проблемы. Прежде чем мы простимся с десятиллионнократно увеличенным видом наномира, нам необходимо более пристально взглянуть на феномен, не имеющий отношения к макромасштабным машинам. Я имею в виду тепловое движение.

При любой температуре выше абсолютного нуля, тепловая энергия выражается в случайных движениях молекул. Это тепловое движение является неизбежным наноразмерным феноменом, к которому неприменимы законы масштабирования механического движения. Игнорируемое в макроскопическом масштабе, в наномеханической инженерии тепловое движение превращается в важнейший фактор.

На что похоже тепловое движение в нашем стандартном масштабированном взгляде на наномашин? Если вкратце, то мы не можем разглядеть отдельные объекты, так как они движутся слишком быстро. В воздухе молекулы перемещаются со скоростью, достигающей скорости звука. Даже если мы используем наше стекло, «растягивающее» пространство и время в десять миллионов раз, то скорости останутся неизменными. Поэтому мы просто не

сможем рассмотреть молекулы воздуха, которые носятся как пули. Несмотря на то, что атомы твердых тел движутся со схожими скоростями, мы увидим их как стационарные объекты, так как их колебания будут происходить с высокой частотой (несколько мегагерц в нашем увеличении), но с небольшой амплитудой, и поэтому будут невидимы.

Таким образом, на твердой поверхности компонента наномеханизма движущиеся атомы обусловят небольшое размытие, так как будут двигаться с амплитудой всего лишь несколько диаметров человеческого волоса. Во многих случаях эти движения полезно рассматривать как незначительные изменения текстуры поверхности. Благодаря непрерывной вибрации, мягкая скользящая молекулярная поверхность ощущалась бы как немного более мягкая и немного более скользящая.

Каждый компонент машины будет также вибрировать вместе с остальными, являясь частью единого целого. Амплитуда его движений будет зависеть от того, насколько тесно он связан с другими деталями — то есть от величины упругой возвращающей силы, сопротивляющейся его смещению. Тепловые движения с большой амплитудой способны вызвать ошибки в размещении деталей при производстве, однако выбор правильной жесткости (и геометрических допусков) позволяет добиться того, что подобные ошибки будут допускаться очень редко. В типичной машине, характеризующейся достаточной степенью жесткости, средняя тепловая амплитуда может быть ограничена до величин менее одной десятой диаметра атома, что позволяет осуществлять операции с очень высокой степенью надежности.

Тепловое движение управляет химией и молекулярной биологией

Тепловое движение, лишь иногда значимое для механизмов, в жидкостях играет определяющую роль. Именно оно приводит к хаотической диффузии молекул, вслед-

ствие чего жидкость и ведет себя как жидкость. Поэтому жидкофазная химия полагается на тепловое движение не только в тех случаях, когда поставлена задача сбора молекул вместе, но и тогда, когда необходимо придать молекулам ускорение, позволяющее преодолеть потенциальные барьеры, препятствующие химическим реакциям.

Как выглядела бы жидкофазная химия под нашим увеличительным стеклом? Это невозможно объяснить вкратце. Возьмем какой-нибудь растворитель, например, воду. Описывая ее ранее, я немного схитрил, сравнив поверхность воды с множеством пляшущих бусинок. На самом деле скорость движения молекул воды близка к скорости звука, и мы физически не способны разглядеть их (ну, разве что, некую размытость поверхности); для того чтобы увидеть отдельные молекулы, необходимо было бы уменьшить их скорость не в десять миллионов, но более чем в десять миллиардов раз.

Перейдем к рассмотрению собственно химических реакций, изменений в связях, которые могут происходить, когда две молекулы встречаются в жидкой среде и по случаю обладают тепловой энергией, достаточной для перегруппирования связей. В макромире лаборатории время протекания реакции может варьироваться в самых широких пределах. Но в большинстве случаев достаточно быстрой принято считать реакцию, протекающую в пределах одной минуты. Что мы увидели бы в том случае, если бы следили за единичной участвующей в реакции молекулой, достаточно медленной для того, чтобы наши глаза успевали бы следовать за ее движениями? В нашем случае это совершенно бесполезное занятие, ведь для того, чтобы получить реальный шанс увидеть вступление этой молекулы в реакцию, нам пришлось бы наблюдать за ней примерно миллиард минут (около 2000 лет).

Таким образом, масштабированный взгляд, позволивший узнать столь многое о поведении жестких наномашин, является в значительной степени бесполезным для понимания жидкофазной химии. Химикам при-

ходится вести исследования, используя иные концептуальные подходы, лишь изредка включающие в себя механическую скорость, силу или положение в пространстве⁹.

Тепловая энергия оказывает доминирующее влияние и на движения в биомолекулярных наномашинках. Последние заполняют собой разрыв между хаосом жидкофазной химии и упорядоченным движением шестеренок, подшипников, валов и всех остальных компонентов механического мира. Поскольку многие биомолекулярные компоненты состоят из белка, нам было бы полезно внимательно присмотреться к нему.

Для того чтобы представить себе белок, работающий в воде, необходимо будет «добиться» прозрачности молекул воды, устранив окружающую их размытость жидкости. При увеличении в 10 миллионов раз обычный белок достигал бы нескольких сантиметров в ширину, и не исключено, мог бы быть частью рибосомы — в несколько раз более крупной и объемной структуры. Компьютерная графика белков показывает, что они представляют собой особенные объекты, во многом напоминающие грозди виноградных ягод, каждая из которых представляет собой очень сильно увеличенный атом.

На поверхности белков имеются мягкие и гибкие выступы, представляющие собой части боковых цепочек аминокислот, например, фенила или фенилаланина. В условиях нашего стандартного увеличения пространства и времени, самые гибкие боковые цепочки будут выглядеть размытыми, подобно молекулам воды, в то время как остальные соединены друг с другом, об-

9. Безусловно, фундаментальные химические принципы являются всеобщими и полностью применимы к механически направляемым молекулярным реакциям, что позволяет в случае необходимости описывать механические ограничения в химических понятиях. Хороший пример — модели твердофазных, энзимных и внутримолекулярных реакций.

разуя устойчивый твердый внутренний объем. Если сам белок способен беспрепятственно передвигаться, он будет также случайно менять свое положение.

Машины, построенные из белков в биологически эволюционировавшем стиле, обладают и другими непривычными для нас чертами. Питаясь энергией химических реакций (или текущих ионов, или света), белки взаимодействуют с еще более мелкими молекулярными объектами с «химической» скоростью — другими словами, эти случайные движения осуществляются на очень высокой, неразличимой для глаза скорости, прерываемой более значимыми событиями, происходящими относительно редко.

Рассмотрим белковые механизмы, обеспечивающие сокращения наших мышц. Они состоят из молекул миозина, пошагово перемещающихся вдоль актиновых нитей, причем каждый шаг осуществляется благодаря тепловому движению. Если бы у нас была возможность, используя наноразмерное увеличительное стекло, наблюдать за мышцами ноги в самой середине такого макростага, мы увидели бы, что молекулы миозина, образуя своего рода туман, быстро и как будто бы случайно перемещаются наноразмерными шагами. При этом они используют энергию молекул АТФ не столько для движения вперед, сколько для того, чтобы не отступать назад.

Аналогично, если бы мы наблюдали за работой рибосомы, которая «трудится» над созданием белка, мы вновь столкнулись бы с размытым нерезким изображением операций, в процессе которых происходит расщепление и образование связей, связывание и высвобождение молекул тРНК и добавление аминокислот к цепочке со скоростью около одной единицы в неделю масштабированного времени. Соответственно, для создания нового белка требуется несколько «растянутых» лет (в реальном же масштабе времени это всего лишь несколько секунд).

Эти и подобные им мягкие машины, состоящие из свернутых полимеров, приводятся в движение тепло-

ными флуктуациями, работают в воде и получают детали благодаря диффузии. Они значительно отличаются от наноразмерных механизмов, изготовленных из твердых материалов, приводимых в движение моторами, не требующих воды и получающих детали от других машин. В то же время биомолекулярные материалы могут использоваться для создания машин, оперирующих более понятными нам способами, машин, производящих не-биомолекулярные продукты, которые сами могут служить деталями машин следующего поколения. Именно отсюда мы и можем дойти до технологий АТП-уровня, не сразу, но постепенно, шаг за шагом совершенствуя материалы, улучшая разработки и наращивая производственные мощности.

Почему АТП-системы на удивление тривиальны?

Оглядываясь назад на наноразмерный мир, с которым мы только что познакомились довольно близко (с увеличением в 10 миллионов раз), мы видим: некоторые его аспекты, особенно те из них, которые непосредственно относятся к наномеханической инженерии, являются на удивление обычными. Специально отобранные материалы в специально отобранных конфигурациях способны вести себя подобно машинам. Новая отличительная особенность — атомарная структура поверхности, но ее не так уж трудно представить, в то время как тепловое движение может быть ограничено узкими рамками, в отличие от случайных движений большой амплитуды, обнаруживаемых в молекулярной биологии и жидкофазной химии.

Создание наномашин из жестких материалов может осуществляться с использованием деталей хорошо известных типов: подшипников, обеспечивающих вращение и скольжение, зацепляющихся друг за друга шестерен и сжимающихся и распрямляющихся пружин

(наряду с блокировочными механизмами, планетарными передачами, сцеплениями с постоянной скоростью, шарнирными четырехугольниками, цепными передачами и конвейерными лентами).

В этом и заключается причина тривиальности механического устройства АТП-систем: задачи обеспечения движения в процессе изготовления не зависят от размеров и могут быть решены с помощью механизмов одних и тех же или схожих друг с другом типов. Обрабатываемые детали должны закрепляться и двигаться, передаваться от машины к машине, вращаться, занимать положение и соединяться друг с другом¹⁰.

В конце концов становится очевидным, что мы можем провести параллель между самыми современными наномеханизмами и машинами, появление и распространение которых распахнуло двери Промышленной революции. С инженерной точки зрения имеется возможность использования огромной массы знаний о машинах прошлого путем его переноса, приспособления и применения к машинам будущего. Наши общие интуитивные догадки об объектах и инструментах — вещах, которые мы можем взять в руки и понять их устройство и их действие, — помогут постичь природу машин, способных произвести АТП-революцию. Масштабированный взгляд, благодаря которому мы воспринимаем наномашины как знакомые и понятные, усиленный в 10 миллионов раз в пространстве и замедленный в 10 миллионов раз во времени, открывает нам возможность увидеть качественно и количественно точную картину.

10. Заметим, что в настоящее время наиболее предпочтительным методом молекулярной сборки является самосборка в жидкостях, осуществляемая благодаря тепловому, а не механическому движению. Как обсуждается в приложении II, в целом ряде промежуточных технологий тепловое и механическое движение будут прекрасно дополнять друг друга — не существует никакого противоречия между самосборкой и приблизительно ограниченными механическими методами.

Способы изготовления вещей

ПОСЛЕ того как мы изучили поверхностные структуры и поведение наноразмерных объектов, нам необходимо рассмотреть природу собственно атомарно точного производства (АТП) — то есть ее принципы как особой производственной технологии. По моему мнению, она станет базисом четвертой технологической революции, способной изменить мир, подобно предшествовавшим ей сельскохозяйственной, промышленной и информационной. Но эти преобразования будут осуществляться иначе, чем в прошлом. Возникает вопрос: с какими современными технологиями лучше всего сравнивать АТП как методику производства?

До сих пор в нашем путешествии мы рассматривали АТП с совершенно разных точек зрения. Читатель, внимание которого было сосредоточено на общих инженерных принципах, возможно, воспринимал АТП как своеобразный вычислительный процесс, когда место битов занимают атомы, или как обычный процесс обработки материалов, основывающийся на использовании меньших по размерам машин. Кого-то другого, вероятно, заинтересовал молекулярный аспект АТП, его химическая или биологическая грани.

Полезность всех этих перспектив не вызывает сомнений, но более подробное сравнение АТП с современными производственными технологиями позволяет навести более резкий фокус на предмет. Оглядываясь назад, можно предложить использовать следующие широкие аналогии:

- Подобно традиционным системам производства, АТП-системы предназначены для сборки малых деталей с целью выпуска более крупных компонентов и готовых продуктов. Несмотря на огромное различие в размерах, в системах обоих видов используются сравнимые друг с другом машины, предназначенные для перемещения деталей из одного места в другое и их соединения.
- Подобно цифровым информационным системам, АТП-системы зависят от наноразмерных компонентов, из которых, используя простейшие детали, создаются сложные системы; последние могут применяться для пошагового получения точных надежных результатов.
- Подобно биомолекулярным системам, АТП-системы предназначены для создания комплексных структур посредством сборки молекулярных строительных блоков с целью формирования объекта, определяемого закодированными данными. Хотя АТП и биомолекулярные системы значительно отличаются друг от друга с точки зрения строения и принципов действия, и в тех и в других для направления молекулярных движений используются наноразмерные механизмы.
- Подобно системам химического синтеза, АТП-системы собирают из мелких реактивных молекул более крупные связанные структуры. Механическое движение предлагает более высокую степень контроля по сравнению с тепловой диффузией, и все же оба процесса основываются на идентичных принципах молекулярной физики.

Каждая из этих областей иллюстрирует различные аспекты АТП. Изменение угла зрения и более пристальный взгляд позволяют пролить новый свет не только на АТП, но и на материальные основы современной цивилизации.

Детали, машины и мощь автоматизированного производства

Традиционное производство начинается с машин, придающих форму различным материалам, необходимым для выпуска деталей. В свою очередь АТП начинается с механизмов, перемещающих молекулы; то есть деталями являются сами молекулы. Детали, формируемые из материалов традиционными способами, такими как литье и ковка, фрезерование или обработка на токарном стане, никогда не будут полностью соответствовать изначально заданным размерам. Напротив, строение молекулы является атомарно точным, и если на каждом последовательном этапе достигается определенный результат, конечный продукт будет получен с изначальной точностью.

Для того чтобы собрать продукт из имеющихся деталей, задачи контроля над движением в машинной сборке остаются, в сущности, одними и теми же, независимо от размеров. Машина должна обеспечивать доставку деталей с места на место и их соединение в более крупные сборки, в результате чего производятся конечные полезные продукты. Инженеры накопили огромный арсенал конструкторских решений, необходимых для постройки машин, способных осуществлять все необходимые для достижения этой цели движения, включая такие устройства, как конвейерные ленты, лопастные подающие устройства, погрузочные роботы, сборочные установки непрерывного действия и (наиболее известные и фотогеничные) устройства, напоминающие по своему виду человеческую руку и известные как «промышленные роботы».

На современных сборочных предприятиях используются и машины, и человеческий труд. Их соотношение, степень автоматизации производства в значительной степени определяется экономическими факторами. Сборка, основывающаяся на применении машин, ис-

пользуется в промышленности в течение нескольких десятилетий, например, в автомобилестроении. Все более широкое использование находят промышленные роботы, возможности которых непрерывно расширяются, а стоимость — снижается.

АТП способно выпускать и макроскопические продукты (собранные из более мелких деталей, в свою очередь, состоящие из еще более мелких деталей, и так далее...). Поэтому макроскопический результат процесса — дело совершенно обычное. Внедрение технологии АТП-уровня изменило бы мир просто потому, что она обеспечила бы поставку технологически передовых, точно изготовленных деталей для сборки на сугубо традиционных фабриках. Вероятно, это был бы наиболее естественный исходный пункт грядущей революции.

Если мы находимся в конце сборочной линии на заводе, то, оглянувшись назад, мы увидим начало потока конечной продукции. Но откуда поступают необходимые для сборки детали? Все они являются продуктами потоков сходящихся друг с другом процессов. Если отследить происхождение каждого из «притоков», то мы обнаружим в их истоках машины, изготавливающие мельчайшие детали, формируемые из таких материалов, как пластмассы, керамика, стекло и сталь.

На АТП-заводе эта знакомая нам архитектура сходящихся сборочных маршрутов подразделяется на гораздо большее количество стадий. В данном случае исходным пунктом становятся машины, обрабатывающие наноразмерные молекулярные детали. Из предыдущей главы мы узнали, что даже наноразмерные машины могут иметь значительное сходство с крупноразмерными аналогами, за исключением такой особенности первых, как быстрое выполнение нанодвижений — за время, исчисляемое наносекундами.

В механическом, архитектурном и абстрактном смыслах современные заводы и фабрики представляют собой шаблон для создания АТП-систем. Ключевой аспект полного изобилия, предельно высокая производитель-

ность, определяется ограничениями применимости данного шаблона в сочетании с законами простого масштабирования.

Уменьшенные в 10 миллионов раз машины способны выполнять 10 миллионов операций в отрезок времени, который потребовался бы аналогичной макроразмерной машине для выполнения одной операции. Таким образом, в сфере изготовления различных продуктов масштабирование машин в 10 миллионов раз непосредственно означало бы резкое повышение физической производительности, измеряемой как масса, которая может быть обработана в одну секунду данной массой машин; на наноразмерной стороне процесса этот принцип масштабирования является основой высокопроизводительного АТП.

*Изготовление без перемещения деталей:
нанолитография для производства микросхем*

Одна из современных отраслей обрабатывающей промышленности уже находится в наноразмерном мире. Применяемые на ее предприятиях специализированные технологии позволяют изготавливать устройства, уже состоящие из миллиардов частей (при этом в сборке нет необходимости). Конечно же, я веду речь об изготовлении микросхем, предполагающем использование технических приемов литографии, имеющих огромное сходство с традиционной печатью, но с использованием других материалов и в гораздо более мелком масштабе. Фотолитография в видимом диапазоне спектра основывается на применении принтеров, способных печатать рисунки, состоящие из 10 миллионов пикселей; используя фотолитографию в ультрафиолетовом свете, изготовители полупроводников печатают шаблоны, содержащие миллиарды пикселей (при этом микросхема гораздо меньше по своим размерам, чем печатная форма).

Затем посредством процессов, похожих на те, которые позволяют зафиксировать изображение на фотографиче-

ской пленке, изготовители используют химические методы для того, чтобы перенести контуры этих изображений на полимерную пленку, размещаемую на кремниевой подложке. Подвергая эти подложки с нанесенным рисунком воздействиям химически активных газов, паров металлов и ионных пучков, машины по производству полупроводниковых микросхем протравливают, осаждают и окисляют материалы, образующие различные слои будущего чипа — транзисторы, изоляторы и металлические полосы, выполняющие функции проводников.

Литографические шаблоны не являются и не могут быть атомарно точными, так как свет и химические воздействия не позволяют обеспечить должную степень контроля. Поэтому в наши дни, когда в соответствии с законом Мура миниатюризация приближается к атомарным размерам, проблема повышения точности начала ограничивать скорость технологического прогресса.

По сравнению с атомарно точными механическими движениями, определяющими суть АТП, полупроводниковая литография демонстрирует не столько сходство, сколько различия. Показательно, что в наши дни созданы огромные мощности по производству полупроводников. В заводских корпусах находится множество самых разных машин, а общая стоимость производственного оборудования предприятия достигает миллиарды долларов. Пока же базой молекулярного производства с действительно атомной точностью, недостижимой даже для фотолитографии высокого разрешения, являются университеты, где им занимаются студенты, вооруженные такими инструментами, как пипетки и стеклянные пробирки.

3D-печать как особый метод производства

Еще одним быстро развивающимся методом изготовления вещей, разрушающим привычную последовательность производства и сборки деталей, является 3D-печать (известная также как аддитивная технология).

3D-печать отличается от традиционных способов придания материалам новых форм. Некоторые из обычных методов основываются на однократном изменении формы материалов с использованием дорогих специализированных инструментов, например, пресс-форм, с помощью которых изготавливаются изделия из пластмасс, штампы, применяемые для выпуска изделий из стального листа или фотошаблоны в полупроводниковой литографии. Другие традиционные методы основываются на вырезании необходимой формы, то есть удаления лишнего материала с использованием оборудования широкого применения, таких как токарные, сверлильные или фрезерные станки. В отличие от них, 3D-печать позволяет получать новые формы благодаря добавлению небольших количеств материала, применяя машины общего назначения, работа которых осуществляется в соответствии с содержащимися в файлах цифровыми данными. 3D-печать открывает возможность создания таких форм, получить которые невозможно ни литьем, ни резкой.

Сегодня большинство наиболее распространенных 3D-принтеров производят заданные структуры путем выдавливания на основу каплей разогретой пластмассы через движущуюся форсунку. Это очень напоминает процесс получения 2D-изображений на струйном принтере (когда печатающая головка с чернилами перемещается согласно заданной матрице).

Технологии 3D-печати способны на большее, и они быстро развиваются. Одновременно снижаются цены, расширяется диапазон используемых материалов и изготавливаемых продуктов. С точки зрения стандартов массового производства стоимость 3D-принтеров пока остается высокой. Но в тех случаях, когда необходимо изготовить уникальный или сложный объект, на первый план выходит такое свойство принтеров, как универсальность. В самом дорогом сегменте рынка представлены машины, способные изготавливать металлические объекты практически любой фор-

мы (например, индивидуальные титановые челюстные имплантаты, используемые в процессе реконструктивно-пластических хирургических операций). Тем временем аэрокосмические компании изучают возможности применения 3D-принтеров для изготовления оптимизированных по форме компонентов двигателей и натурально спроектированных магистральных трубопроводов из титана. Для 3D-печати сегодня используются не только пластмассы и металлы, но и керамика, проводящие ткани и шоколад.

Между тем 3D-принтеры бюджетной серии уже проложили путь в дома и квартиры. Пользователи изготавливают с их помощью игрушки и небольшие скульптуры, устройства, состоящие из большого количества деталей, распечатываемые за один прогон, причем все отдельные части сразу оказываются на своих местах, а также специальные компоненты, например, ортодонтические брекеты. Распространение 3D-принтеров идет параллельно развитию тематических интернет-сообществ, участники которых делятся друг с другом общедоступными файлами цифрового проектирования так же, как другие пользователи Интернета делятся файлами с цифровыми изображениями. Например, участники сообщества RepRap используют собственноручно построенные машины для изготовления индивидуальных компонентов для новых и лучших машин.

Подобно АТП-системам, 3D-принтеры строят физические объекты из небольших частиц материала. Сами принтеры отличаются компактностью и доступны по цене. Несмотря на весьма значительные различия в ценах и производительности в номенклатуре этих изделий, опыт использования 3D-принтеров позволяет делать предположения о том, на что в недалеком будущем будут способны АТП-системы, а также о том, как сообщества энтузиастов смогут обобществлять информацию, которую можно будет преобразовывать в материальные функциональные формы.

Биты, атомы и мощь цифровых систем

Аналогия между обработкой информации и обработкой материи может показаться не самой уместной, но параллели между современными цифровыми вычислениями и завтрашним производством, основывающемся на АТП, являются весьма глубокими. На самом высоком уровне детализации, дискретная атомарная структура материи позволяет АТП-системам работать с последовательностями атомов во многом так же, как цифровые информационные системы работают с последовательностями битов. Более того, происходящий в электронике переход от аналоговых систем к цифровым имеет очевидные параллели с грядущим переходом от традиционных обрабатывающих производств к АТП.

Если бы мы воспользовались нашим десятимиллионнократным увеличительным стеклом, то увидели бы, что современный наноразмерный транзистор вырастет в размерах до планшетного компьютера. Используя линзу, мы узнали бы, что компьютерная микросхема состоит из миллиарда транзисторов, глубоко скрытыми под протянувшимися до горизонта проводниками. При этом сама микросхема оказалась бы размером с Бельгию.

Мы уже упоминали о том, что современные методы изготовления микросхем далеки от атомарной точности. Наш увеличенный транзистор размером с планшетный компьютер, выглядел бы довольно грубо сделанным изделием, напоминающим деревянный куб, вырубленный топором из бревна. В физическом смысле современная электроника пока «сыровата», так как *цифровые* информационные системы изготавливаются в процессе *аналогового*, по сути своей, производства.

Шаг от аналогового производства к АТП подобен шагу от аналоговой к цифровой электронике. Несмотря на различие между информацией и материей, битами и атомами, цифровая информационная революция и АТП основываются на схожих принципах.

Аналоговые электронные системы представляют и передают сигналы посредством физических градаций значения параметра в некой среде, воспроизводящих градации исходного сигнала. Так, например, амплитуда радиосигнала воспроизводит форму звуковых волн человеческого голоса. Схожим образом работают записи на грампластинках, где нарезанные в пластмассе извилистые дорожки передают прошлые звуковые колебания. Несмотря на то, что аналоговые компоненты и схемы никогда не бывают абсолютно совершенными, соответствующие инженерные проекты представляют собой блестящие образцы профессионального мастерства, оттачивавшегося в течение десятилетий в процессе экспериментов и конструирования.

У цифровой электроники не так уж много общего с аналоговой. Там, где в аналоговых системах применяются физические градации, цифровые системы полагаются на последовательности чисел, кодируемых битами. Таким образом, описание звуковых волн, независимо от их формы, будет закодировано всего двумя символами — 0 и 1. В данном случае имеет место символическое описание, подобное тексту, который читается одинаково, независимо от того, как он записан — крупным шрифтом, мелким шрифтом или цветными мелками на асфальте. Искажения, присущие аналоговому воспроизведению сигнала, уже не имеют никакого значения. Точность и однозначность результатов — вот что стоит за термином «цифровой». Соответствие этому принципу и гарантирует кристальную четкость цифрового радио.

Свойства системы, основанной на использовании всего двух цифр, как четкость выражения символов и однозначность ответов «да» и «нет», позволяют абсолютно совершенно обрабатывать цифровые сигналы даже на довольно грубых с точки зрения конструкции устройствах. Поэтому наноэлектронные системы способны надежно функционировать даже тогда, когда в них используются весьма далекие от точности устрой-

ства. Если в форме гаек и болтов допустить ошибку хотя бы на 5%, они перестанут подходить друг к другу. Но для современной микросхемы, построенной из двадцати нанометровых устройств, подверженных нанометровым по масштабу дефектам, такая доля ошибок не имеет значения.

Ключом к этому результату является упоминавшийся выше цифровой принцип, позволяющий воспринимать определенный диапазон напряжений как «1» если он заметно отличается от диапазона напряжений, определенного как «0». Проектирование схем, предусматривающих передачу сигналов в заранее определенных диапазонах, открывает возможность ограничить вызванные тепловым электронным шумом ошибки так, чтобы они не оказывали воздействия на считывание результата. В данном случае существует запас по устойчивости к помехам. При тщательном и осторожном конструировании можно создать наноразмерные машины, которые будут производить молекулярные операции схожим образом.

Атомы являются более сложными образованиями, чем биты, но, как и биты, они способны формировать четко определенные последовательности. Если в цифровой информационной системе бит может иметь только два значения — либо 0, либо 1, то в АТП-системе атом может быть либо привязан к правильному месту, либо нет. В цифровой электронике такая дискретность, «все или ничего», закладывается в схему намеренно; в АТП же дискретность внутренне присуща атомам в силу природы обычных ковалентных связей. По существу, дискретная природа квантовой механики открывает возможность точной воспроизводимости, и различные последовательности атомов могут быть такими же четко выраженными, как и различные последовательности битов.

В цифровой электронике запас помехоустойчивости обеспечивается величиной промежутка электрического напряжения, надежно разделяющего значения 0 и 1,

а в АТП он возникает в результате физического разрыва и механического ограничения. Грубо говоря, направление молекулы к месту, где должна была бы происходить реакция, подобно попытке поместить штифт в отверстие, находящееся на непрерывно вибрирующей поверхности. Если штифт попадает в другое, схожее с правильным место, то молекула схожим образом формирует связь не там, где надо. Идет ли речь о том, чтобы правильно направить молекулу или вставить штифт, ключевая проблема избегания ошибки заключается в том, чтобы противостоять силам вибрации, способным стать причиной промаха мимо желаемой цели и попадания в неправильное место.

Таким образом, когда мы говорим о механизме АТП, необходимо помнить, что тепловое движение вызывает неизбежные случайные флуктуации координат. Следовательно, ключевой проблемой надежности становится такое ограничение тепловых колебаний, которое позволило бы избежать промахов. На практике это означает, что машина должна обладать такой жесткостью, чтобы ее деформация при смещении требовала бы больше энергии, чем то ее количество, которое может поступить в результате тепловых флуктуаций. Это сопротивление деформации является ограничением по упругости, а энергия, требуемая для нежелательного перемещения (потенциальный барьер), обеспечивает запас помехоустойчивости. Если быть более точным, то для обеспечения высокой надежности потенциальный барьер должен быть в десятки раз больше характерной тепловой энергии, количество которой оценивается порядка kT .

В цифровой электронике разрабатываются компьютерные микросхемы, содержащие миллиарды транзисторов, что позволяет устройству безошибочно совершать многие триллионы операций в секунду. В равной степени надежными могут быть и тщательно выбранные и направляемые хорошо сконструированными механизмами операции АТП.

Что касается перспектив будущих компьютеров, то я уверен в неизбежном схождении цифровой информации и цифрового производства. Прогресс в цифровой электронике привел производство в наноразмерный мир. В конце концов эта линия развития потребует атомарной точности. Но для ее достижения необходимо будет использовать средства, принципиально отличающиеся от современных. Когда размеры устройства не превышают нескольких атомарных диаметров, каждый атом должен встать в строго отведенное ему место. Дальнейший прогресс цифровых систем потребует именно такой точности, и АТП его обеспечит.

Биотехнологии и мощь молекулярных наномашин

Современные биологические молекулярные машины представляют собой действующий образец оборудования для атомарно точного производства наноразмерных устройств, предназначенных для изготовления атомарно точных наноразмерных структур. Эта тесная параллель с АТП-системами превращает биомолекулярные системы в богатый источник аналогий, как поучительных, так и вводящих в заблуждение.

Первые цифровые информационные системы были созданы природой, использовавшей их для непосредственного атомарно точного производства. Из учебника по биологии можно узнать, что в молекуле ДНК генетические данные кодируются последовательностью четырех видов мономеров (нуклеотидов), каждый из которых несет два бита данных и считается блоками из слов по шесть бит, кодирующих двадцать аминокислот, которые можно найти в протеинах. Рибосомы считывают эту информацию и собирают строго определенные белки; тем самым создаются молекулярные компоненты и устройства, играющие центральную роль для всего, что есть в клетке, включая сами рибосомы.

Издали сравнение биотехнологии и АТП может показаться довольно плодотворным. Так оно и есть, если аналогия не заходит слишком далеко. На самом низком уровне АТП-системы имеют много общего с клеточным метаболизмом с точки зрения функции, эффективности и молекулярной точности. При этом они значительно отличаются от клеток с точки зрения молекулярного строения и организации в целом — биологические клетки слишком мягки и бесформенны, чтобы быть похожими на механизмы. Как показывает опыт, злоупотребление биологическими метафорами не столько помогает проникнуть в суть вещей, сколько вносит беспорядок и путаницу.

Мы видели, что упорядоченные механические структуры АТП-архитектуры имеют гораздо больше общего с заводской, чем с любой биологической системой. Попытка представить себе механическое оборудование наноразмерной фабрики вполне разумна. Попытка вообразить механизированную клетку — безнадежна. Это было бы примерно то же самое, что механизированный суп с лапшой.

Несхожесть проявляется буквально во всем. Заводские машины, независимо от размеров, состоят из твердых компонентов, движущихся по знакомым механическим путям; биомолекулярные машины, напротив, отличаются мягкими структурами неправильных форм и прерывистым непредсказуемым движением с использованием тепловой энергии. Фабричные машины упорядоченно получают и производят различные детали; биомолекулярные системы обычно захватывают и освобождают случайным образом движущиеся молекулы. Эти различия проявляются на всех уровнях организации, от контраста твердых стен заводских корпусов и текучих клеточных мембран до разницы между направляемым машиной строительством и такими процессами, как самосборка и деление клетки.

Исторически биомолекулярные системы служили источником вдохновения и доказательством существова-

ния сложных наноразмерных механизмов, которые могут быть построены с атомарной точностью посредством схожих механизмов; при этом строительство может осуществляться в соответствии с цифровыми инструкциями. С практической стороны гениальные инженеры научились программировать биомолекулярные машины, что открывает прямую дорогу к управляемому созданию комплексных атомарно точных структур.

Я полагаю, что наиболее привлекательные пути в направлении АТП заключаются в расширении современных технических приемов посредством использования биологических методов — но только на уровне компонентов, а не систем. Инженерам, использующим биомолекулярные материалы, уже нет необходимости просто имитировать природные соединения. Например, в ДНК-структурных нанотехнологических исследованиях природные информационные молекулы применяются для создания более крупных сложных структурных элементов. Некоторые потенциальные применения этих элементов действительно включают в себя информацию, но не в биологическом смысле. Исследователи пытаются найти способы использования структур ДНК в качестве печатных плат для создания цифровых электронных устройств.

ДНК, РНК и рибосомы представляют собой биологические средства построения белковых машин, но ферменты (помогающие этим машинам), выполняют более простую функцию. Ферменты (энзимы) представляют собой белковые машины, ускоряющие определенные химические реакции на каждом шаге расщепления, метаболизма и молекулярной сборки внутри клетки. Они ускоряют и направляют трансформации, связываясь с молекулами и спрямляя реакционные пути, ведущие к конечным продуктам. Ферменты способны увеличить скорости реакции в тысячу и более раз, а в некоторых случаях — и в миллион раз.

Ферменты находят полезное применение и вне биологии. Генно-модифицированные энзимы получили большую устойчивость к промышленным условиям и приме-

няются, например, в синтезе топлива из отходов производства целлюлозы. А специально сконструированные для бытового применения энзимы способны выживать в условиях высокой температуры и добавляются в моющие средства, используемые в стиральных машинах.

В физическом смысле передовые технологии АТФ и ферментные реакции разделяет дистанция огромного размера, но между ними отсутствует четкая разграничительная линия. Напротив, уже известно, что последовательность небольших шагов в непрерывном развитии биополимерной инженерии способна привести нас к получению инструментария, с помощью которого мы получим материалы и механизмы следующего уровня, более разнообразные по свойствам. Каждый шаг в этом направлении обогащает используемую в инженерном конструировании палитру материалов. Каждый шаг вперед способен привести к улучшению результатов использования различных инструментов, что способствует дальнейшим свершениям.

Мы достаточно далеко продвинулись по этому пути, и чем более четкими становятся перспективы, тем быстрее становится наше движение.

Атомарная точность, достигаемая с помощью химии

Предлагаемый химическим синтезом подход к атомарно точному производству значительно отличается от биомолекулярных механизмов, которые производят набор всех необходимых продуктов. Методы органической химии не очень хорошо понятны неспециалистам (в большинстве случаев их плохо понимают даже представители молекулярных наук). Эти методы занимают уникальное место в науке и технологии.

Химики создают структуры с атомарной точностью уже более ста лет. За это время их способности возросли настолько, что описать их вкратце едва ли возмож-

но. Например, определенные сложности существуют и в производстве полупроводников, но в этой отрасли есть одна простая метрика — уменьшающийся размер транзисторов, и этим все сказано. В химическом синтезе нет ни сравнимой метрики, ни простых материальных показателей достигнутого прогресса.

Для того чтобы получить правильное представление о сути рассматриваемой нами области, необходимо понимание и общих физических принципов (химических связей, термодинамики, статистической механики), и особенностей молекулярных функциональных групп, и того, как они вступают в реакции. Чтобы лучше понимать, какие сейчас применяются средства и до каких пределов, какие есть возможности и ограничения, необходимо уделить внимание результатам исследований, публикуемым в ведущих научных журналах, дополненных изучением реальной обстановки, о которой можно узнать только из посещений лабораторий и разговоров со специалистами.

На самом глубоком смысловом уровне отличие химического синтеза от остальных методов производства заключается в использовании принципиально иных методов контроля процесса. В процессах изготовления продуктов происходит соединение различных веществ друг с другом под прямым контролем того, куда направляются те или иные детали (даже в процессах печати и литографии). В цифровой электронике осуществляется похожий прямой контроль над последовательностями битов. В биомолекулярных машинах прямой контроль (например, направленное движение в рибосомах), смешивается с проверкой соответствия деталей и установления связей, когда в результате случайного движения в текучей среде они соприкасаются подобно тому, как соединяются друг с другом намагниченные части головоломки. Конструирование из такого рода деталей, которые соединяются друг с другом уникальным образом, не является прямым контролем над сборкой, хотя и очень на него похоже.

В отличие от них, в основе традиционного химического синтеза лежат существенно менее избирательные способы достижения молекулярного соответствия и установления связей (то есть химические реакции). В них участвуют гораздо меньшие по размерам и более простые молекулы, не имеющие знакомых нам по биологии четко определенных форм, напоминающих используемые в головоломках. Для того чтобы добиться более высокой степени контроля, химики выбирают последовательность вступления реактивных компонент в реакцию друг с другом. Другими словами, если необходимо, чтобы реакция протекала в определенной последовательности, химик сначала берет ингредиент А, добавляет к нему ингредиент Б, а потом прибавляет ингредиент В (одновременно нагревая эту смесь, дистиллируя ее, дожидаясь выпадения осадка и т. д.). Попутно, в целях контроля над происходящим с молекулой, у химиков довольно часто возникает необходимость блокирования и разблокирования потенциально реактивных частей молекулы. Таким образом, каждая реакция подобна определенному ходу в игре, а сам органический синтез достоин сравнения с шахматами. Неудивительно, что звания «гроссмейстера» в химии, как и в шахматах, заслуживают только те, кто отдает всю свою жизнь обучению тайнам игры, изучая ее законы, изменяя тактические приемы, одерживая победы и извлекая опыт из неудач.

Хотя специфические молекулярные продукты синтеза по определению являются атомарно точными, в большинстве случаев им сопутствует и большое количество ошибок в силу распространенности побочных продуктов производства. Результатом каждого осуществляемого в процессе синтеза шага становится определенная доля потерь; на каждом шаге выход конечного вещества снижается (по отношению к количеству исходных реагентов), что ограничивает число последовательных этапов.

С химической точки зрения величайшая ценность механически направляемого молекулярного движения

закljučается не в том, что оно позволяет проводить реакции посредством механического соединения молекул, а в том, что оно препятствует возникновению нежелательных реакций с участием потенциально реактивных молекул. Эти надежные, универсальные средства защиты обеспечивают беспрецедентную точность реакции, ограничивая появление побочных продуктов и создавая условия для многоэтапной последовательной реакции с высоким выходом желаемого продукта. Эти последовательности (в которые можно будет безопасно включить молекулы с высокой реактивной способностью) могут использоваться для синтеза крупных сложных структур не известных ранее видов, включая плотно связанные, точно структурированные ковалентные твердые вещества.

Достаточно сказать, что химики научились производить огромное количество соединений, любого размера и сложности, в том числе молекулы, обнаруженные в биомолекулярных системах и в целом в природе, но не только. Новые синтетические молекулы способны дополнять или заменять собой биомолекулы в качестве основы для построения сложных и многофункциональных молекулярных систем. Таким образом, по мере нашего дальнейшего продвижения к атомной точности, мы все шире будем использовать такой мощный инструмент, как химический синтез.

Механические, цифровые, молекулярные и точные

Из нашего обзора следует, что за прошедшее с эпохи промышленной революции время человечество разработало огромное количество новых способов изготовления вещей, имеющих множество различных связей с АТП:

- Автоматизированная обработка демонстрирует нам возможности конструирования систем программируе-

мых машин, способных собирать крупные комплексные системы из более мелких компонентов; в соответствии с законами масштабирования, схожие машины могут использоваться при создании АТП-систем.

- Цифровые информационные системы показывают, что наноразмерные системы способны осуществлять сложные последовательности операций с высокой частотой и иллюстрируют инженерные принципы, позволяющие добиться почти абсолютной надежности.
- Биомолекулярные системы демонстрируют, что системы молекулярных машин обладают способностью к построению комплексных функциональных атомарно точных компонентов; благодаря этой способности биомолекулярные системы уже позволили добиться значительного прогресса на пути к разработке технологий АТП-уровня.
- Достижения в химии показывают нам дополнительные возможности создания атомарно точных молекулярных структур и наглядно подтверждают, что простое объединение реакционно активных молекул позволяет получить широкий ряд различных структур; таким образом, химический синтез также способствует прогрессу на пути к разработке технологий уровня АТП.

В своей совокупности современные методы производства позволяют нам многое понять об АТП-системах и возможностях их внедрения. Какие пробелы нам еще предстоит заполнить?

Современное атомарно точное производство испытывает недостаток в широко применимых средствах направления движения молекул, которые обладали бы приемлемой точностью с целью установления строгого контроля над результатами. Пока оно полагается преимущественно на химические и биомолекулярные технологии. Если первые носят общий характер, но не отличаются надежностью, то вторые весьма надежны, но являются узкоспециализированными.

Если попытаться заглянуть в будущее, то я вижу две основные линии развития. По первой из них уже пройден весьма значительный путь, вторая же только начинается:

- Первая линия представляет собой усовершенствование технологий конструирования крупных функциональных молекулярных систем и их использование для строительства простых машин из компонентов, синтезируемых сегодня биомолекулярными и химическими методами.
- Вторая линия предполагает использование простых машин рассматриваемого нами вида как инструментов для создания компонентов с применением материалов, позволяющих добиться улучшения производительности и облегчить проектирование машин нового поколения.

Что нужно для ускорения прогресса? Как ни удивительно, ни наши знания, ни технологический уровень не являются ключевыми ограничителями. Основной недостаток никак не связан ни фундаментальной наукой, ни наличием более совершенных средств производства (хотя и первое, и второе имеют огромную ценность). Основная проблема заключается в достижении лучшего понимания возможностей применения методов системной инженерии в сфере молекулярной науки и технологий с тем, чтобы устранить существующий пробел в терминологии и организации работы.

Этой теме посвящена следующая часть книги. В ней будут рассматриваться отношения (в некоторых случаях далеко не простые) между инженерными дисциплинами и наукой. Различия между этими сферами являются гораздо более значительными, чем принято думать.

Часть III

На дальних технологических рубежах



Наука и бесконечный ландшафт технологий

Великая история мира

В НАЧАЛЕ всех начал, когда не существовало ни Земли, ни Солнца, дозвездная Вселенная была сферой темной материи и раскаленного газа, по мере расширения пространства увеличивавшегося в объеме, охлаждавшегося и исчезающего в темноте. В этом «море» материи можно было встретить волнообразные неровности — небольшие сосредоточения массы. Они привлекали к себе другие объекты, масса нарастала до тех пор, пока не наступал коллапс. В результате катастроф формировались зародыши галактик.

Эти катастрофы и менее масштабные коллапсы, что привели к рождению целого поколения звезд, принесших свет во времена всеобщей тьмы, описываются физикой гравитации, а также волновой оптикой, термодинамикой, газо- и гидродинамикой. Физика описывает термоядерные реакции, происходившие внутри звезд, и превращение водорода в более тяжелые элементы. Наука дает нам понимание того, как происходили взрывы сверхновых звезд, в результате которых звездная пыль распространялась все дальше и дальше, чтобы впоследствии сформировать планеты вокруг звезд, подобных Солнцу.

Прошли миллиарды и миллиарды лет, и на Земле, в течение трети известного нам времени жарившейся на медленном огне в солнечном свете, появились существа, наделенные руками, глазами и умом. Вместе с разумной жизнью возникли и развивались технологии полезного применения дерева и шкур, костей и кам-

ня. Постепенно наши предки научились создавать более совершенные инструменты. Обладание ими означало возможность дальнейшего улучшения средств труда. Развитие происходило очень медленно, но со временем скорость прогресса ускорялась. Для того чтобы познать основы кузнечного дела, человечеству потребовались жизни нескольких сотен поколений людей. До появления машин из стали оставалось подождать «всего-то» десять поколений и немного больше — до появления инструментов, благодаря которым на протяжении жизни моего деда были получены первые знания о законах физики, определяющих твердость камней, направление света звезд и форму Вселенной.

С новыми инструментами в руках и новыми знаниями в головах мы научились очень точно направлять телескопы дальше Луны, ограждать их от солнечных лучей, охлаждать аппаратуру до субкосмических температур и с помощью этих широкоугольных сенсоров фиксировать слабые тепловые кванты света, начавшего свой путь невообразимо давно, едва ли не в первые дни существования Вселенной. Благодаря полученным данным ученые способны изучать незначительные концентрации массы, приведшие в движение материю в процессе формирования звезд.

Большая часть наших знаний о Вселенной была получена на протяжении жизни одного поколения. В то же время процесс создания технологий, длительность которого когда-то измерялась столетиями, ускорился до такой степени, что он занимает меньше времени, чем человеческая жизнь.

Технологии и законы физики

Объем наших современных знаний огромен. Но человечество только начинает осознавать, что уже имеющиеся знания способны поведать нам о мире и о том, во что он способен превратиться. Те же самые знания о законах

физики, позволяющие проникать в глубины пространства и времени в равной степени применимы к Земле, и используемым нами технологиям, к каждой кремниевой микросхеме и наноразмерному транзистору, к каждому инструменту и устройству в наших домах, в небесах и на заводах. Безусловно, законы физики описывают намного больше того, о чем мы упомянули. Они определяют абстрактную часть формы мира — физический потенциал технологии.

Этот потенциал представляет собой вечный аспект законов физики, латентную структуру. Она тверже, чем камень, и старше, чем звезды. Физические законы управляют Вселенной и всем сущим в ней. Они управляют каждым устройством, которое уже существует, будет или могло бы существовать. В конечном счете законы физики определяют потенциал технологии в целом. Независимо от того, осознаем мы это или нет, но здесь и сейчас технология обладает тем же самым потенциалом, которым она будет обладать в будущем, и тем же самым, которым она обладала за миллиарды лет до нашей эры.

С помощью исследовательского инженерного проектирования и анализа принципы физики могут использоваться для того, чтобы оценить часть физического потенциала технологии. В ограниченном диапазоне при решении этой задачи могут использоваться и передовые технологии, базирующиеся на АТП. С точки зрения правильного определения области поисковой инженерии важное значение имеет признание того обстоятельства, что эти исследования не позволяют получить ответы на огромное количество возникающих вопросов.

В большинстве случаев формирование воззрений на будущее технологий начинается с частично известных в настоящее время фактов и тенденций. Они представляют собой почву для размышлений над возможными в ближайшем будущем открытиях, изобретениях, инвестициях, издержках, рынках и конкурирующих технологиях — над всем тем, что обусловлено следующими

друг за другом событиями в неизвестном нам будущем. Результаты этих размышлений могут оказаться полезными, но зависимость от неизвестных событий означает, что они остаются в значительной степени неопределенными.

Для того чтобы приступить к изучению фундаментального физического потенциала технологии, необходимо получить ответ на совсем другой вопрос. Он может содержать информацию, имеющую отношение к будущему. Но сам этот ответ не будет зависеть ни от размышлений о будущих событиях, ни от фактов из прошлого или современного состояния мира. Чтобы ответить на него, необходимо изучение не ограниченных во времени последствий человеческих действий, а вневременных следствий известных физических законов.

Иногда я изображаю сферу потенциальных технологий как вневременной ландшафт, очерченный и ограниченный законами физики. Расположение потенциальных технологий на нем зависит от их доступности и производительности. На этом ландшафте представлены все потенциальные технологии, независимо от того, используются ли они в наши дни, находятся они в поле нашего зрения или рассматриваются как немыслимые. Если кому-то это название пришлось не по душе, могу предложить другое, например, «пространство возможностей».

Для того чтобы выйти за пределы этого пространства в физическую реальность, необходимо развитие технологических способностей, поскольку пределы ландшафта — дальнее побережье континента — соответствуют самым отдаленным границам технологической культуры, рассматриваемой как единое целое.

На этом широком ландшафте потенциальных технологий мы занимаем обжитой регион, территорию, на которой находятся технологии и продукты нашей материальной цивилизации. Границы этого места обозначаются стальным прокатом и автомобилями, ракетными двигателями и искусственными спутниками Земли, наноразмерными транзисторами и портативными

компьютерами. Расширение пределов обжитой человечеством области представляет собой непрерывный процесс повышения эффективности технологий, создания более прочных материалов, более мощных и экономичных двигателей, более быстрых компьютеров.

Непосредственно с «обжитыми» нами землями граничат территории, на которых находятся ожидаемые к выпуску компьютеры и солнечная энергетика; сделав еще несколько шагов в будущее, мы окажемся рядом с технологиями, существующими пока только как инженерные идеи, а еще дальше расположены области с потенциально возможными машинами и устройствами неизвестных пока конструкций — компьютеры, производительность которых значительно превышает показатели электронно-вычислительных машин на кремниевых микросхемах, и фотоэлектрические устройства, КПД которых приближается к пределу эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

«Заселенная» нами область представляет собой относительно небольшую территорию на краю огромного континента технологического потенциала. Его побережье, границы ландшафта, обозначает вечные пределы, определяемые законами физики. Человечество достигло некоторых из них, в то время как ряд рубежей пока находится очень далеко, вне горизонта видимости.

Законы физики образуют скалу, в которой крепится основание технологического потенциала, и знание этих законов дает возможность изучать доступные территории. Исследования позволяют нанести на карту возможные пути к АТП и выявить, по крайней мере, часть заложенного в него потенциала.

Идея использования научных знаний для изучения технологического потенциала влечет за собой вопрос: «Что мы считаем заслуживающими доверия научными знаниями?» В случае, когда мы обращаемся к базовым технологиям, лежащим в основе АТП, возникает и второй вопрос: «Достаточно ли имеющихся у нас знаний для достижения поставленной цели?»

Учебник науки проверяется каждый день

Упомянув о «научном знании» законов физики (и знании эмпирических физических фактов), я подразумеваю достоверные, количественные знания. В данном случае слово «достоверные» используется в его буквальном смысле для описания знаний, которым ученые и инженеры могут доверять, знаний, применяемых в повседневном труде так же, как используются сложение, умножение и вычисления. Учебники утверждают, что все приведенные примеры являются достоверным количественным знанием, что ежедневно подтверждается в реальной жизни.

Инженеры используют это знание в процессе конструирования двигателей и самолетов, транзисторов и суперкомпьютеров. Если продукт не проходит испытания, инженеры редко ищут ошибки в учебниках. Они начинают искать собственные ошибки в конструкции, анализе, сборке или процедуре проведения испытаний.

Ученые используют те же самые знания из учебников как основу для поиска нового знания. Планирование экспериментов — одна из форм инженерии, и если это уместно, то допущение, согласно которому сила равна произведению массы на ускорение, используется и в проектировании, и в анализе полученных результатов (это обычная практика, сохраняющая свою полезность несмотря на корректировки, внесенные А. Эйнштейном в законы Ньютона).

Наука из учебника довольно редко подвергается сомнению явным образом, так как она ежедневно проходит все новые и новые доскональные проверки. Вибрация наноразмерного стержня, колокола и Земли описывается с использованием одних и тех же уравнений движения, и при каждом точном измерении одновременно проверяются и сам объект, и допущения, которые легли в основу эксперимента. Упрямо повто-

ряющиеся несоответствия обязательно привлекли бы внимание, как это не раз происходило в прошлом. Находка достаточно серьезного несоответствия эксперимента и теории обычно приводит к наградам и непреходящей известности.

Тем не менее почти все много раз проверенные на практике положения учебника физики являются не совсем точными. Например, в 1687 г. в физике были сделаны величайшие открытия — я имею в виду законы Ньютона о движении и закон всемирного тяготения. Сегодня нам известно, что они не полностью соответствуют действительности. Экспериментальные данные подтверждают несколько иные выводы Эйнштейна о том, что гравитационное поле масс искривляет пространство, что влияет на траектории движения. Эти выводы были сделаны физиками в 1905 и 1915 гг.

Тем не менее механика Ньютона все еще царит в большинстве учебников и практических расчетов, производимых в различных областях науки и техники. Почему эта не до конца правильная теория распространена так широко? Потому что ее положения можно выразить с помощью более простого математического аппарата, и расхождения между механикой Ньютона и реальностью в большинстве обычных обстоятельств могут быть обнаружены только с помощью чрезвычайно точных измерительных инструментов. В реальной жизни, конечно же, почти никто из ученых и инженеров (в большинстве типичных контекстов) в своих пояснительных записках не упоминает о «вновь открывшихся обстоятельствах». В этом нет необходимости. Законы Ньютона используются без комментариев.

Самое глубокое понимание физических законов в их всеобщей и наиболее точной формулировке (пока, увы, без гравитации) основывается на квантовой теории поля, дополненной элегантными математическими симметриями, связанными друг с другом громоздкими асимметричными способами, а также примерно двадцатью необъясненными параметрами, полученными экспери-

ментальным путем. Однако при использовании математического моста, связывающего наиболее фундаментальную физическую модель и повседневные физические прогнозы, мы должны были бы тратить неимоверно большие усилия для проведения сложных вычислений. Поэтому ученые и инженеры используют более приближенные модели физических законов, не обращаясь к более глубоким уровням знания без необходимости. Если результаты более простых вычислений, с учетом ошибки измерений, идентичны результатам, полученным в рамках более фундаментальной теории, то нет разницы какой уровень сложности использовать и, конечно, предпочтительнее взять на вооружение более простые расчеты.

Аппроксимацию, последовательное приближение, применяют не только ученые и инженеры. Например, архитекторы используют несколько приблизительных геометрических допущений. Если бы стены здания были действительно вертикальными, по мере роста его высоты должна была бы увеличиваться и его ширина. Если бы стены здания были ориентированы строго по линии север-юг, то его внутренние помещения должны были бы иметь форму трапеции, расширяющейся в сторону Южного полюса. Для зданий размером со штат Колорадо, эти факты имели бы значение. Но на практике они игнорируются, исчезая в погрешностях при строительстве и измерениях. Если инженерные расчеты производятся так, как будто Ньютон был прав, то архитектурные расчеты осуществляются, исходя из предположения о том, что Земля является плоской. Поступать иначе было бы просто глупо.

Мощь современных знаний о физике раскрывается в повседневной научной и инженерной практике. Что касается фундаментальных физических законов, то предложение знаний значительно превосходит спрос на них. В процессе изучения потенциала атомарно точной обработки, например, выясняется, что основные принципы физических законов известны со времен начала выпуска фордовской «Модели Т».

Так почему же физика, вместе с химией и множеством других естественно-научных дисциплин, продолжает развиваться? Если процесс новых открытий продолжается, то, учитывая границы современных знаний, на какое «расстояние» просматривается бесконечный ландшафт технологического потенциала? Чтобы получить правильное представление о внешних контурах знаний, необходимо пристальнее взглянуть в неизведанные области.

Универсальное и в то же время ограниченное физическое знание

Название проверенного временем учебника по физике редко мелькает в заголовках новостей. И не удивительно. Что может быть нового в знаниях, используемых ежедневно на протяжении десятилетий? Наоборот, научные новости представляют собой нескончаемый поток сообщений об открытиях, а также о неприлично раздутых, спекулятивных намеках на открытия и захватывающих дух ошибках, которые чуть было не потрясли все и всяческие основы. Подобные сообщения по самой своей новостной природе рассказывают о том, что еще не до конца понятно. Таким образом, даже если научные новости будут абсолютно точными, они все равно искажают перспективу достоверных знаний.

Образцовый пример устойчивого корпуса достоверных знаний представляет собой физика. На фундаментальном уровне открытие чего-то совершенного нового влечет за собой получение Нобелевской премии. Взгляд на науку с этого уровня открывает содержательную перспективу на более приземленную физику, которая описывает молекулы и горы, физику, которая описывает контуры ландшафта потенциальных нанотехнологий — начиная с современных до АТЭ и дальше.

На самом глубоком, фундаментальнейшем, уровне физики (о котором упоминалось чуть выше) рассматри-

вается совокупность элементарных частиц и их взаимодействий. Для математического их описания достаточно тетрадной страницы. Предложенное Эйнштейном понимание гравитации в категориях искривленного пространства и времени в рамках общей теории относительности выражается тензорным уравнением, уместающимся на половине строки. Остальную часть страницы займут уравнения, описывающие поведение каждого наблюдаемых взаимодействий и частиц, для описания иерархии которых используется Стандартная модель. И все эти уравнения учитывают релятивистские эффекты, т. е. специальную теорию относительности. Для их проверки потребовались недюжинная изобретательность исследователей и огромные бюджеты, предельно возможные экспериментальные условия и точность измерений¹.

В 2012 г. физики ЦЕРНа сообщили об открытии бозона Хиггса (или неотличимой от него частицы). Для того чтобы совершить это открытие, использовались оборудованием ценой в несколько миллиардов долларов и электроэнергия, которой было бы достаточно для освещения небольшого города. Открытие бозона Хиггса означало, что физикам удалось наблюдать последнюю из предсказывавшихся Стандартной моделью частиц. Но это важнейшее достижение стало причиной немалого расстройств многих ученых.

Ведь исследователи надеялись найти не только бозон Хиггса, но и что-нибудь еще, земной ключ к физике, выходящей за пределы Стандартной модели. Наблюдение за движением галактик позволило обнаружить эффекты массы в форме (как можно предположить) ненаблюдаемых частиц темной материи, а расширение самой Вселенной происходит с ускорением под воздействием необъясненного пока поля темной энергии. Помимо

1. Между прочим, один из инженерных принципов гласит: *«В высшей степени маловероятно, что ненаблюдаемый, несмотря на все возможные усилия, феномен воспрепятствует или будет способствовать созданию доступных технологий».*

этого, сами уравнения требуют внесения в них поправок или замены, поскольку в них пока не удастся вписать гравитацию, и даже полностью совместимые друг с другом части Стандартной модели носят отрывочный характер, изобилуя эмпирическими параметрами. Поэтому физики надеются найти в ее глубинах более прочную единую ткань.

Тем не менее в своей совокупности общая теория относительности и Стандартная модель описывают все глубины физики, имеющие непосредственное отношение к нашей жизни. Современных физических знаний более чем достаточно для достижения любой практической цели. Вот как описывает сложившееся положение физик Шон Кэррол (Калифорнийский технологический институт):

За последние четыреста с лишним лет человечество достигло поистине удивительного прогресса: мы достигли понимания основных правил, согласно которым происходят различные события в окружающем нас мире. Все, что мы видим в повседневной жизни, представляет собой сочетания трех частиц — протонов, нейтронов и электронов, — взаимодействующих посредством трех сил — гравитации, электромагнетизма и сильных ядерных взаимодействий. Вот и всё. Для описания всего того, что мы видим, не требуется никаких других форм материи, а для описания того, как они взаимодействуют друг с другом любым заметным глазу образом, не требуется никаких других сил. Кроме того, нам известно, что представляют собой эти взаимодействия и как они работают... Что касается непосредственно окружающего нас мира, мы знаем все действующие в нем правила.

Описывая фрагмент физических знаний, Ш. Кэррол не упомянул о значительном количестве известных физикам элементарных частиц. Но даже эта небольшая часть общего корпуса знаний включает в себя всю физику, имеющую отношение к поведению машин, молекул и АТП-систем.

Стандартная модель находится на дальних рубежах физики. Другие физические границы расположены гораздо ближе к нам. Некоторые из них принято относить к фундаментальным. Если мы взглянем на них под правильным углом, то согласимся, что они заслуживают этого эпитета.

Я использую определение «фундаментальный» в самом узком смысле — в отношении знаний о материи на уровне основных элементарных частиц. На практике же едва ли не вся современная физика занята поиском решений проблем в других сферах, таких как геофизика, астрофизика и гидродинамика, в то время как изучение явлений, в математическом смысле относящихся к новым частицам, осуществляется лишь в нескольких областях. Они включают в себя новые проявления (квази)частиц в кристаллических веществах, в том числе те из них, которые могут потребовать применение всего математического аппарата квантовой теории поля. Авторы многих открытий в этой области были удостоены Нобелевских премий по физике. В их число вошли, например, ученые, обнаружившие высокотемпературные проводники, и исследователи, наблюдавшие и объяснившие более тонкие и необычные феномены, такие как дробный квантовый эффект Холла, когда (квази)частицы, ограниченные в двумерной плоскости, взаимодействуют друг с другом способами, топологически невозможными в трехмерном пространстве.

Наблюдение подобных явлений (что типично для необычных квантовых эффектов) очень затруднительно; многие из них происходят в необычных формах кристаллических веществ при температурах близких к абсолютному нулю (гораздо холоднее, чем во время ночей на Плутоне).

Вспомним об упоминавшемся выше инженерном принципе, согласно которому мы не способны применить то, чего мы не наблюдаем. Мы можем провести с ним следующую параллель: *«Если открыть или измерить явление чрезвычайно затруднительно, то такой эк-*

зотический эффект, скорее всего, будет легко избежать или проигнорировать».

В то же время есть и противоположное утверждение: «В некоторых случаях необычные эффекты, для открытия или измерения которых потребовались огромные усилия, могут быть применены на практике».

Например, несмотря на то, что высокотемпературные сверхпроводники были открыты более четверти века назад, они все еще могут оцениваться одновременно и как экзотические, и как полезные. Эти синтетические слоистые купратные материалы применялись для создания мощных электромагнитов, хотя дискуссии о том, как проявляется в них эффект сверхпроводимости, в коллективной корреляции электронов или как-то еще, до сих пор не завершены. С коллективным поведением электронов связан и другой пример. Исследования дробного квантового эффекта Холла, наблюдаемого только при предельно низких температурах, направлены на изучение их вероятного применения как возможной основы для создания надежной элементной базы квантовых вычислений.

Таким образом, открытие феноменов, связанных с необычными формами материи, отнюдь не означает, что инженеры столкнутся с ограничениями, также применимыми к менее экзотическим обстоятельствам. Напротив, они способны раскрыть и раскрывают неизвестные ранее возможности, новые и неожиданные области бесконечного ландшафта потенциальных технологий. У нас есть все основания ожидать расширения горизонта видимости.

От квантовой механики к пружинам и упругим сферам

Реальное применение физических знаний в молекулярных науках (а также в материаловедении и технике) требует подъема из глубинных дебрей физики ближе к поверхности. К практическому уровню не относятся ни Стандартная модель, разработанная для описания

событий, происходящих при столкновениях высокоэнергетических частиц (за последние десятилетия участники этих исследований были удостоены множества Нобелевских премий), ни высокоточная квантовая электродинамика конца 1940-х гг. (за открытия в этой области Нобелевскую премию получили Р. Фейнман, Дж. Швингер и С. Томонага), ни релятивистская квантовая механика конца 1920-х гг. (важнейший вклад в исследования в этой области внес нобелевский лауреат П. Дирак). В большинстве же случаев, даже если ученые обращаются к квантовой механике, то они опираются на данные аппроксимированной математической модели, созданной в 1920-х гг. (эта теория принесла Нобелевские премии Э. Шредингеру и В. Гейзенбергу) и позволяющей получать приближенные численные результаты достаточной точности.

Ученые применяют аппроксимации уравнений Шредингера для расчета разнообразных свойств материи: плотности железа, модуль упругости карбида кремния, энергию ковалентной связи. Применение непрерывно уточнявшихся математических методов и алгоритмов в рамках квантовой механики Шредингера, а также все более мощных компьютеров, позволило добиться «химической точности», то есть возможности численно различать уровни энергии, разница между которыми меньше энергии тепловых колебаний при комнатной температуре.

Однако квантовые методы быстро становятся непрaktичными как с математической, так и вычислительной точек зрения, когда число атомов в системе возрастает. В действительности, чем крупнее молекулярная система, тем больше приближений, в результате чего ответ становится все менее точным и в итоге — бесполезным. Решение этой проблемы заключается в переходе к аппроксимации другого типа, способной предлагать достаточно точные ответы, на определенные вопросы относительно крупномасштабных систем.

В вычислительной химии методы, предложенные квантовой механикой XX столетия, были вынуждены уступить место методам физики 1687 г., когда для рас-

четов перемещений атомов применяется ньютоновское уравнение движения $F = ma$. Методы расчетов траекторий движения атомов основываются на приблизительных оценках межатомных сил; одновременно предполагается, что траектории атомов подобны траекториям движения планет, которые определяются гравитационным взаимодействием.

Правильные описания межатомных сил — ключ к точным результатам. Квантовые расчеты позволяют получить параметры, используемые для создания приближенных оценок, но на заключительном этапе мы спустимся с высот физической теории, так как необходимые для расчетов параметры силы уже давно выведены не путем вычислений, а эмпирически, по лабораторным данным.

Впрочем, вне зависимости от источников, параметры вставляются в уравнения, в дальнейшем используемые для расчета сил, определяющих динамику атомов, в каждый момент времени. Последние моделируются в уравнениях силового поля, естественно, тоже являющихся аппроксимацией. Как правило, атомы моделируются как эластичные сферы, способные притягивать или отталкивать друг друга, а связи между ними — как пружины. Чуть раньше я использовал эти стандартные модели молекулярной динамики в качестве основы описания того, как наноразмерный мир мог бы выглядеть и ощущаться.

Насколько хороши эти приближения с точки зрения молекулярной физики? Желающие имеют возможность количественно оценить их точность и погрешности. Но с практической точки зрения простого универсального ответа не существует, поскольку все зависит от специфики реальных проблем.

Например, укладка белковой цепочки, образующей компактный функциональный объект, зависит от довольно тонкого баланса взаимодействия энергий между тысячами атомов. Возможность использования вычислительных методов в отношении натуральных белков,

то есть белков, не подвергавшихся искусственным изменениям в целях улучшения устойчивости, открылась совсем недавно. Слишком большое количество конфигураций очень похожи друг на друга, и баланс может зависеть даже от очень небольшого изменения энтропии.

Гораздо проще ответить на аналогичный вопрос о возможной структуре в случае, когда рассматриваются наноразмерные структуры, объединенные в тесные сети ковалентных связей. В них нет гибких уложенных или развернутых цепочек; следствием этого становится отсутствие и тонкого равновесия энергий взаимодействия, и тонких различий между величинами энтропии у разных состояний. Поэтому здесь, в отличие от белковых структур, не возникает никаких раздражающих вопросов.

Подобные жесткие, предсказуемые структуры будут доступны нам в будущем, по мере приближения к производственным способностям АТП-уровня. В случае возникновения функциональных инженерных вопросов о структурах такого рода, надежность рассматриваемой конструкции гарантирует, что мы получим одни и те же ответы, независимо от применявшихся вычислительных методов.

Таким образом, сравнивая проблемы, возникающие в технике и науке, необходимо учитывать, что в рассматриваемых нами сферах очень часто возникают совершенно разные вопросы. К тому же во многих случаях друг от друга отличаются и предметы науки и техники. Расчеты, приемлемые в одной, могут быть полностью отвергнуты в другой. Поэтому в них могут использоваться принципиально различные методы вычислений. Инженеры занимают более выгодное положение по сравнению с учеными, так как обладают роскошью широкого выбора и систем, и вопросов, что позволяет соответствовать границам знаний и расчетных возможностей. Эта свобода помогает инженерам конструировать артефакты, использование которых дает ожидаемые результаты, конечно, при условии, что им удалось не подпустить к себе неизвестность.

Противостояние неизвестности и непредсказуемости

Если Шон Кэррол прав, и физика действительно имеет сходство с шахматами, то она «играется» на доске, значительная часть которой скрыта от глаз участников; при этом доска вытянута в длину, а по ее клеточкам непрерывно перемещаются бесчисленное количество фигур. Например, понимание сложнейших вопросов человеческой биологии — производство различных субстанций и установление причинно-следственной связи, связывающей глаза, кишечник, кожу и мозг — не может быть исключительно делом физики, поскольку фундаментальная физика описывает исключительно микромасштабные правила, а никак не сложное устройство мира в его целостности.

Независимо от системы оценки (по «головам» или в зависимости от бюджетов) основные научные силы сосредоточены на изучении таких сложных объектов, как бактерии, человек, геология и климат. Хотя журналы *Science* и *Nature* охватывают всю область научных знаний (или почти всю), статьи по фундаментальной физике встретишь там нечасто. На страницах этих изданий рядом с публикациями об искусственных системах гораздо легче встретить новости об открытиях в мире природы, молекулярной и клеточной биологии, работы по тематике наук о жизни на более высоких уровнях организации (экологии, науке о мозге, социологии) и, конечно же, множество сообщений, в которых описываются открытия в геологии, климатологии, астрофизике и структуре Вселенной. Вообще говоря, все эти области могут рассматриваться как производные от физики, но их разнообразие и сложность проистекают из многокомпонентности и переплетения причинно-следственных цепочек, уходящих корнями в происхождение Вселенной.

Ни физические расчеты, ни табличные данные не способны рассказать нам о тех частях природы, которые

еще не обнаружены человеком. Более того, в ходе исследований были обнаружены настолько сложные иерархически устроенные системы (например, человеческий мозг), что усилия ученых практически не затрагивают физические проблемы, а сосредоточены на постижении глубины и охвата в вопросах структуры и функций изучаемых объектов.

Нередко, пытаясь избавиться от хаотичной сложности окружающего мира, инженеры пробуют спрятать свои творения в коробки, ящики или корпуса (системный блок компьютера, корпус принтера, двигатель под капотом автомобиля). Корпус обеспечивает защиту инженерной конструкции от сложного, не поддающегося контролю и непредсказуемого мира природы (и детей).

Но даже если конструкция хорошо защищена, остаются проблемы, возникающие на границах с внешним миром. Рассмотрим, например, корабль и кардиостимулятор. Первый бороздит морские просторы, и его корпус обрастает моллюсками. Инженеры прячут электронику второго в специальный корпус, но иммунная система человеческого организма и ремоделирование тканей делают конструирование имплантата значительно более сложной задачей, чем просто физическая задача. АТП-система избавлена от подобных проблем, так как она закрыта от внешнего мира коробкой на столе, которая, в свою очередь, защищена стенами здания.

Инженеры способны решать множество проблем и облегчать немало задач, создавая системы, защищенные от непредсказуемого мира труднопреодолимыми барьерами. Использование корпусов повышает предсказуемость задействованной в них физики; по той же самой причине мышление в категориях устройств, защищенных корпусом, способно расширить диапазоны технологического потенциала. Например, на раннем этапе анализа АТП-систем в своей работе я изучал возможности обеспечения чистоты (и, как следствие, простоты устройства) внутреннего рабочего пространства.

Обратите внимание, что необходимость учета сложности при проектировании представляет собой иную, более изменчивую проблему, чем трудности, с которыми сталкиваются ученые в процессе исследований. Природа предлагает нам множество чрезвычайно сложных проблем, и ей все равно, понимаем мы их или нет. Технология, напротив, предполагает изначальное понимание задачи, поэтому сложность искусственно созданных артефактов может быть детально описана, и часто довольно успешно.

Тем не менее даже простые системы способны вести себя так, что мы не сможем использовать расчеты для прогноза их поведения. Данное положение справедливо и в отношении классической физики.

Любой игрок в бильярд, чуть более искусный, чем я, легко отправит шар в лузу. Немного более сложной задачей для него будет дуплет (минимум удачи, и кий ударяет по прицельному шару, который, отразившись от борта, попадает в лузу). Но с каждым новым соударением искривленных поверхностей эффект небольших смещений усиливается экспоненциально, и довольно быстро результат становится совершенно случайным. Даже на свободной от трения поверхности, при условии геометрической совершенности сфер и абсолютной упругости, воздействие вездесущей тепловой энергии приводит к тому, что траектории шаров становятся случайными после примерно десяти соударений, точно так же, как это происходит при столкновениях атомов.

Аналогичное усиление малых различий происходит во многих системах. Хороший пример — хаотичный турбулентный поток. Нисходящая турбулентность чувствительна к малейшим восходящим изменениям. Вот почему взмах крыла бабочки или волна воздуха, поднятая движением вашей руки, способны изменить количество и направление штормов в каждом из предстоящих в будущем сезонов ураганов.

Впрочем, инженеры давно научились управляться с подобной непредсказуемостью или ограничивать ее

воздействия. Труба, по которой несется турбулентный поток воды, непредсказуема внутри (несмотря на то, что она выполняет ту же основную функцию, что и защитный корпус), но она прекрасно справляется с задачей доставки жидкости посредством расположенного «вниз по течению» крана. Предсказать детали поведения этого бурного потока невозможно, но его величина ограничена. Поэтому для надежного инженерного проектирования эти непрогнозируемые подробности не имеют значения.

Аналогично, мы не имеем возможности в деталях описать тепловые флуктуации в АТП-системах, но они точно так же ограничены по величине. И вновь надежное проектирование позволяет получить удовлетворительные результаты².

Но у неопределенности имеется еще одна грань. В некоторых случаях выясняется, что в реальной действительности мы не способны предсказать даже потенциально прогнозируемые результаты. В молекулярных науках, например, таковыми являются кристаллические структуры.

Подготовим образец нового чистого молекулярного вещества, растворим его и оставим испаряться. Весьма вероятно, что вскоре начнется кристаллизация вещества (обычный пример самосборки). Возможно, нам удастся убедить специалиста по кристаллографии провести эксперимент и вместе с ним увидеть, как рентгеновские лучи дифрагируют на плоскостях упорядоченных атомов внутри кристалла. Полученные данные позволят нам получить представление о том, как молекулы выстраиваются рядом, образуя специфическую кристаллическую матрицу.

Способны ли мы заранее, до изучения данных о дифракции рентгеновских лучей, предсказать вид этой ма-

2. Данное положение справедливо и в отношении меньших по величине квантовых флуктуаций — вычислимых, ограниченных и вполне допустимых.

трицы? В принципе, мы должны были бы дать утвердительный ответ. Молекулы будут чаще всего собираться, образуя уникальную, требующую минимальных энергетических затрат структуру, в которой они будут плотно «упакованы» в соответствии с требованиями об объединении положительных и отрицательных зарядов и образовании возможно большего количества водородных связей. Но на практике, во многих случаях ответ будет отрицательным, так как существует возможность конфликта разных условий (например, уплотнение формы ведет к ухудшению распределения зарядов и так далее), и вид реальной структуры будет зависеть от мельчайших различий в энергетическом балансе между несколькими альтернативными формами.

Как и в случае с предсказанием белковой укладки, прогнозирование кристаллических структур остается очень сложной, в большинстве случаев неразрешимой задачей. Но точно так же, как и в случае с противопоставлением предсказания укладки белка и белковой инженерии, область кристаллической инженерии относится к числу самых процветающих. Инженерное проектирование направлено на повышение предсказуемости, и, как наглядно демонстрируют белковая и кристаллическая инженерия, ее представители способны добиваться успехов в решении поставленных перед ними задач даже в тех случаях, когда посторонние уверены в неизбежности провала.

В инженерном деле принято считать, что структуры ведут себя предсказуемым образом во всех случаях, важных для конечного результата. Структуры должны сохранять форму, определяемую не тепловым движением, но конструкцией и тем, как они собраны. Аналогично, движения машин осуществляются детерминированным образом, а не случайно, как в случае сталкивающихся шаров или молекул, оставаясь в пределах установленных допусков, так что небольшие флуктуации не способны воспрепятствовать выполнению функций механизма. Эти характеристики справедливы как для

машин, используемых в традиционной обработке сырья и материалов, так и для меньших по размеру механизмов, которые могут быть построены для использования технологий АТП-уровня.

Инженерное искусство в пределах ограниченного знания

Инженеры относятся к ограниченности масштаба и точности знаний во многом так же, как они работают с двигателями ограниченной мощности или материалами ограниченной прочности. Очевидно, что в этих условиях ограниченности знания часть задач можно решить с предсказуемым результатом, а часть — нет.

Умение работать в условиях ограниченности знаний является необходимой частью техники, и во многих случаях поддается управлению. Действительно, инженеры весьма успешно строили мосты задолго до того, как появилась возможность рассчитывать нагрузку на единицу площади и механическую деформацию. То есть они умели решать поставленные задачи, не обладая знаниями, которые в наши дни считаются обязательными. В свете всего вышесказанного было бы полезно рассмотреть не только объем и точность научных знаний, но и возможности продвижения вперед техники, использующей неполные и несовершенные знания.

Например, на уровне молекул и материалов, настоящей субстанции технологических систем, эмпирика все еще доминирует над теоретическим знанием. Границы достоверности расчетов расширяются год от года; однако до сих пор нет никакой практической необходимости вычислять предел прочности на разрыв того или иного сорта среднеуглеродистой стали. Необходимые данные либо берутся из таблиц, либо образец стали зажимается в соответствующих приспособлениях для испытания прочности металлов и растягивается до тех пор, пока не произойдет разрыв. Другими словами, ин-

женеры не столько занимаются физическими расчетами, сколько обращаются с вопросами напрямую к физическому миру.

Как показывает опыт, знание такого рода поддерживает физические расчеты, расширяя количество приложений. Основываясь на эмпирических знаниях о механических свойствах стали, инженеры применяют физические расчеты и для проектирования мостов, и для конструирования автомобилей. Обладая эмпирическими знаниями об электронных свойствах кремния, инженеры применяют физические расчеты для создания транзисторов, электронных схем и компьютеров.

Эмпирические данные и расчеты действуют сообща и в молекулярных науках, и в инженерном деле. Знание структурных свойств специфических конфигураций атомов и связей открывает возможность количественных предсказаний, хотя и ограниченных в масштабе, но применимых в самых разных обстоятельствах. То же самое справедливо и в отношении химических процессов, разрушающих или устанавливающих особые конфигурации связей, что позволяет получать бесконечное разнообразие молекулярных структур.

Ограниченное научное знание может быть вполне достаточным для решения одной задачи, но неприменимым для поиска решений другой. Различие определяется тем, на какие вопросы оно дает ответы. В частности, когда научные знания должны использоваться в инженерном проектировании, возникает самостоятельный инженерный вопрос о том, что считать достаточным научным знанием. Ответ на него, в силу специфики самого вопроса, может быть получен только в контексте проектирования и анализа.

Как и любые физические вычисления, эмпирические знания воплощают в себе законы физики. Осторожно применяя эмпирические данные и понимая присущие им ограничения, их можно объединить с результатами вычислений, не только в современной технике, но и в изучении пространства потенциальных технологий.

Для того чтобы достичь понимания этой исследовательской деятельности и того, что она способна пове­дать нам о перспективах человечества, прежде всего необходимо глубоко осознать *фундаментальное* различие вопросов, ответы на которые ищут наука и инженерия. Одна из главных причин этого в следующем: внимание ученых сосредоточено на том, что еще не известно, их взгляд направлен в сторону бескрайних просторов непознанного, в то время как инженеры фокусируются на том, что хорошо изучено, для чего они обращаются к учебникам, табличным данным, спецификациям продуктов и проверенной временем инженерной практике. Короче говоря, ученые находятся в поиске неизведанного, а инженеры избегают его.

Если миновать встречи с неизвестностью не удается, во многих случаях инженеры имеют возможность «обезвредить» ее, обкладывая со всех сторон «подушками безопасности». Конструируя различные устройства, разработчики приспособляются к неточным знаниям точно так же, как они адаптируются к неточным вычислениям, изъянам в технологии производства и вероятности непредвиденных событий во время эксплуатации изделия. Все инженерные конструкции наделяются определенным запасом прочности.

В перечне причин авиакатастроф поломки крыльев находятся где-то в самом конце. Высокая надежность этой части конструкции самолета обусловлена отнюдь не тем, что инженеры обладают совершенными знаниями о динамике дислокаций и многоцикло­вой усталостной прочности дисперсионно-упрочненного алюминия. И не абсолютно точными результатами вычислений в процессе проектирования. И никакими другими совершенствами. Причина высочайшей надежности крыльев самолетов — инженерный консерватизм в проектировании: точное определение структур, обязанных оставаться целыми в случае наступления самых невероятных событий, с учетом вероятных недостатков в высококачественных компонентах, появлении

и расширении трещин в результате нарастания усталости алюминия и известной неточности в расчетах. Соблюдение дисциплины проектирования и обеспечивает должный запас прочности, который и определяет исключительную редкость авиакатастроф, вызванных проблемами с крыльями.

Следовательно, ограниченность знаний призывает инженеров соблюдать сдержанность в дизайне, платой за которую становится рост стоимости производства и эксплуатации изделий. Ценой этих издержек «покупается» уверенность в том, что знания, расчеты и усилия по конструированию позволят создать нечто действительно работающее.

Консервативное проектирование играет важную роль и как один из инструментов оценки пространства потенциальных технологий. Консервативный дизайн способствует конструированию прочных надежных продуктов. Точно так же он благоприятствует получению достоверных результатов инженерного анализа. Более того, когда изучаемым продуктом является анализ сам по себе, объем материальных издержек производства и эксплуатации резко уменьшается.

Место АТП в пространстве технологий

Знания человечества о физических законах охватывают все, что мы можем увидеть на Земле, и все, что мы способны создать. Они описывают реальную действительность с учетом пределов измерений ровно в той степени, в какой мы можем использовать математические модели для расчетов.

Применяемые в сочетании с эмпирическими данными хорошо известные физические принципы во многих случаях способны с высочайшей точностью предсказывать поведение физических систем в самом широком диапазоне физических обстоятельств. Эти знания ле-

жат в основе современного инженерного проектирования и производства. Еще более важно то, что знание законов физики способно обеспечить конструирование и анализ систем будущего, обладающих гораздо более высокими, по сравнению с современными, производственными возможностями.

Рассматриваемые в данном контексте АТП-системы и их потенциальные продукты обладают целым рядом давно удобных качеств. По самой своей природе производство на АТП-уровне позволяет создавать чрезвычайно прочные материалы и высокопроизводительные устройства. Использование компонентов, обеспечивающих высокую производительность, позволяет снять множество ограничений и проектировать системы, возможности которых выходят далеко за пределы современного инженерного искусства. При этом инженеры будут во всех аспектах своей деятельности, как и прежде, следовать традиции консервативного дизайна. Тем более что во многих случаях наличие широкого выбора из консервативных вариантов обеспечивает достаточно средств для создания таких систем, архитектура которых позволяет избежать неизвестности, когда созидательная деятельность осуществляется на исключительно прочном фундаменте.

Обе линзы, науки и инженерии, позволяют нам издалека рассмотреть достопримечательности, разбросанные по ландшафту технологического потенциала. Конечно, на некоторых направлениях находятся препятствия, не позволяющие присмотреться к интересующим нас объектам, да и сила линз не дает разглядеть детали. В числе объектов, расположенных на видном месте, мы видим АТП и его потенциал, способный обеспечить полное изобилие в будущем.

Но это в теории. В реальной жизни те же самые линзы не позволили рассмотреть все то, что открывалось нашим взорам. Похоже, они были направлены в разные стороны, ослабляя зрение.

Противоречия между наукой и техникой

К вопросу о слонах и автомобилях:
две притчи о науке и технологиях

ПРИТЧА о слепцах и слоне была сложена в Южной Азии много веков назад неизвестным автором и давно вошла в буддистскую, индуистскую, джайнистскую и суфийскую традиции. Благодаря написанному почти две сотни лет назад стихотворению эта назидательная история пустила глубокие корни и в англоязычном мире:

Шесть седовласых мудрецов
Сошлись из разных стран.
К несчастью каждый был незряч,
Зато умом блистал.
Они исследовать слона
Явились в Индостан.

— Джон Годфри Сакс (1816–1887)

Вот что последовало дальше, в пересказе последователей джайнизма:

Слепец, изучавший ногу, сказал, что слон похож на подушку; тот, кто исследовал хвост, заявил, что объект представляет собой веревку; незрячий, перед которым был хобот, сообщил, что ему досталось нечто вроде ветви дерева; тот, кто оказался рядом с ухом объявил, что у него в руках опахало; тот, кто стоял рядом с брюхом слона, решил, что перед ним стена; а тот, кто исследовал бивень, пришел к выводу, что это какая-то труба из очень прочного материала.

Незрячие исследователи спорили друг с другом до тех пор, пока некий мудрец не просветил их, объяснив, что каждому довелось прикоснуться к одной из частей многогранной истины.

Начало этой притчи может восприниматься как метафора науки, но не вполне совершенная. В науке не может быть ни глубоких умных ответов вне системы научного знания, ни ученых, которые удовлетворились бы возможностью изучения фрагментов целого. Предлагаю еще одну притчу, посвященную научному познанию.

*Незрячие ученые и слон:
притча об успешных научных изысканиях*

Давным-давно группа ученых, специализировавшихся в бурно разраставшейся области мегазоологии, собрались для того, чтобы почтить своим присутствием рождение новой специальности, получившей название «элефантологии». Как это часто бывает, ученые страдали отсутствием зрения и, как слепцы в оригинальной истории, изучали слона по частям.

Как заслуженные деятели науки, они пользовались репутацией независимых исследователей и самостоятельно выбирали направления научного поиска. У кого-то сферой научных интересов было изучение текстуры и кривизны различных участков кожи, в результате чего были получены существенно отличающиеся результаты. Проведенный спектральный анализ выявил корреляции между цветом поверхности кожи и степенью ее шероховатости. Другие ученые сосредоточились на изучении притока жидкости, а третьи — ее оттока. Были составлены статистические временные ряды и выявлена суточная периодичность. Ведущие исследователи публиковали научные результаты в престижном «Журнале элефантологии», а также в конкурирующих изданиях «Научный журнал о толстокожих» и «Мегазоологические записки».

Некоторые из первых результатов исследований позволили ученым предложить новую интерпретацию ли-

тературы, посвященной аномальной мобильности деревьев, что породило волну недоверия в дендрологическом сообществе. Одновременно уже в самой элфантологии начались острые бескомпромиссные дискуссии, вызванные противоречивыми данными, полученными в ходе наблюдений. В рамках решения загадки геометрии слона были созданы цилиндрическая и сферическая модели, а также модель, основанная на веревочной теории, каждая из которых имела своих собственных сторонников.

Финансирование научных исследований в элфантологии продолжалось. С течением времени, благодаря использованию усовершенствованных инструментов, ученые расширили исследования и обнаружили, что они изучают одну и ту же поверхность, но с различных направлений. Постепенно противоречившие друг другу модели были забыты или шаг за шагом приведены к единому знаменателю. Усилия исследователей были вознаграждены двумя Нобелевскими премиями, а Стандартная модель слона стала настоящим триумфом науки.

* * *

Независимые ученые изучали разные части слона, используя специфические методы исследований. В конечном счете, достигнув незначительной координации усилий, они совместно пришли к четкому непротиворечивому выводу. Что позволило его получить? Ответ на этот вопрос очень прост. Наблюдения за различными частями слона соответствовали друг другу уже потому, что друг другу соответствовали части самого животного. Разные ученые изучали одного и того же слона, существовавшего до начала этого комплексного исследования.

*Независимые автомобилисты:
притча об инженерной неудаче*

Давным-давно, в незапамятные времена ученые, представлявшие множество самых разных областей науки, собрались вместе для того, чтобы объединить свои уси-

лия в решении грандиозной, фантастической по тем временам задачи, заключавшейся в разработке первой самоходной машины для перевозки пассажиров. Наши исследователи предложили установить связи между этим видением будущего, своими научными специальностями и агентствами, финансировавшими изыскания. Начались публикации полученных результатов, увеличились бюджеты исследований, появлялись научные исследовательские центры, общенациональные программы и журналы («Автомобильные записки» и «Журнал автотехники и автотехнологии»). Не прошло и десяти лет, как по инициативе Конгресса началось осуществление Общегосударственной автотехнологической инициативы.

Обещания технологического результата никак не отразились на внутреннем устройстве области исследований самоходной техники, сохранявшей структуру науки. Любознательные исследователи преследовали свои собственные цели и делились полученными знаниями с коллегами и общественностью в журналах. Каждая группа ученых руководствовалась собственными идеями о вкладе в прогресс.

Расплывчатые концепции самоходных машин получили довольно широкое распространение. Автомобилисты (исследователи, получившие известность) пришли к выводу о том, что будущей машине необходима будет некая движущая сила. Специалисты в различных областях предложили широкий спектр различных идей. Некоторые из них занимались изучением материалов для двигателей, получавших энергию от цилиндрических пружин, другие исследовали возможности применения энергии ветра, третьи — поршневых двигателей. Отдельная группа энтузиастов производительного использования энергии хомячков занималась экспериментами с «беличьими» колесами¹.

1. В действительности ни одно серьезное предложение в области самоходных машин не могло быть настолько абсурдным, хотя в современных исследованиях, которые проводятся под «зонти-

Выдвинутая одной из научных групп идея кабины для пассажира инициировала исследования свойств тканей для тентов, дерева для создания корпусов, стальных листов для канистр и кирпича-сырца для стен, которые удастся как-нибудь сделать передвижными. Между тем сами идея мобильности подтолкнула изыскания в сфере механических манипуляторов, смазок, колес и подшипников. Эти первичные исследования в сфере самоходных машин позволили добиться немалых успехов (как представлялось), так как были созданы новые ткани, корпуса, подшипники, «беличьи» колеса и смазки.

То и дело поступали добрые вести о новых достижениях. В течение десяти лет, прошедших с начала изысканий, казалось, что человечество вот-вот переступит грань, отделявшую его от наступления торжественно провозглашенной автомобильной эры. Но шли годы, а машины все не было — не дождались даже создания прототипа.

В конечном итоге в центре научного внимания членов Свободной федерации независимых групп автомобилистов оказались стальные корпуса, устанавливавшиеся на платформу на колесах, обеспечивавших низкие показатели трения, и горючее топливо, благодаря которому осуществлялось движение поршней в двигателях различных типов, а также на устройствах, передающих движение на колеса. К сожалению, вопросы поворота колес в стороны или увеличения их трения оказались вне сферы внимания ученых. Поэтому решить проблемы рулевого управления и торможения так и не удалось. Исследователи упустили из виду и такую вторичную проблему, как поворот автомобиля в процессе движения. Имеется в виду необходимость сопряжения вращающегося момента двигателя в процессе передачи движения на правое и левое колеса, которые при повороте проходят разные расстояния. (Она была реше-

ком» нанотехнологий, невидимые мелкие объекты, известные как «моторы», лишь изредка напоминают полезные устройства.

на с помощью такого старого, но не очевидного, изобретения, как дифференциальная передача.)

Практическое осуществление идеи автомобилизма потребовало участия блестящих умов современности и привлечения миллиардов долларов. В процессе исследований был разработан целый ряд побочных полезных технологий, но ученые так и не достигли изначально поставленной цели. Автомобилистам не удалось создать ни самоходную машину, ни работоспособный бензиновый двигатель. По мере того как года превращались в десятилетия, обещания становились все более расплывчатыми, а выполнение обязательств отодвигалось все дальше в будущее. Самоходная машина превратилась в несбыточную мечту, навсегда уходящую далеко за горизонт идею.

Известие о том, что группе инженерных команд, тесно координировавших свои усилия, удалось перенести идею в рабочие чертежи, устранить технологические пробелы, собрать все части воедино и представить публике первый автомобиль, прогремело как гром среди ясного неба.

* * *

Почему деятельность, направленная на создание самоходной машины, участники которой не испытывали недостатка в финансировании, на протяжении многих лет не приносила желаемых результатов?

Просто потому, что ученые и те, кто выделял им денежные средства, организовали деятельность по научному образцу, исключавшему инженерные разработки. Самостоятельные ученые-автомобилисты, какими бы блестящими умами они ни признавались, шли все дальше и дальше по дороге знаний, оставляя за собой множество технологических пробелов. Гораздо хуже другое. Даже в том случае, если бы им удалось заполнить все пробелы, огромному количеству независимых исследователей никогда не удалось бы произвести тысячи различных, дополняющих друг друга деталей, необходи-

мых для создания действующего автомобиля. Другими словами, независимо от блеска ума и профессионализма исследователей, программа, лишенная инженерного руководства, не способна произвести на свет машину типа фордовской «Модели Т».

Независимые элфантологи смогли получить согласующиеся друг с другом результаты, так эта область науки началась со слона — с реальной, естественным образом существовавшей физической системы. Напротив, автомобильная сфера началась в отсутствие самоходной машины, как внешнего объекта исследования, обладавшего согласованностью. Согласованные разработки требуют согласованных проектов, которые невозможно обнаружить при изучении природных объектов. Проекты являются продуктом человеческого сознания, и только потом создаются материальные объекты.

Геном и Луна

Различия между техникой и наукой прекрасно иллюстрируют исторические примеры двух великих проектов XX столетия. Первый из них — высадка людей на Луну, второй — прочтение генома человека. Осуществление обоих проектов потребовало мобилизации усилий огромного масштаба. Достижение поставленных целей осуществлялось принципиально различными путями, но оба они позволили человечеству добиться отличных успехов.

Первоначально проект «Аполлон» (1961 г.) носил довольно абстрактный характер. Это было количественное (но без полной детализации) описание системы, основанной на использовании ракет с жидкостными реактивными двигателями, каждая из которых была комплексным артефактом сама по себе и одновременно являлась частью более сложной системы. Трубопроводы первой ступени ракеты должны были соответствовать топливным бакам и насосам (подходя друг другу по каждому аспекту формы и функции). В свою очередь, насосы должны были

соответствовать двигателям, а те — корпусам ускорителей, обеспечивавших подъем более высоких ступеней, лунного модуля, астронавтов, скафандров и оборудования до высоты 65 километров над Землей со скоростью, в 8 раз превышающей число Маха, после чего начиналась работа двигателей второй ступени ракеты-носителя.

Инженеры, разработавшие проект системного уровня, впоследствии эволюционировавший во второй, третий и десятый варианты, настолько улучшили предлагавшиеся решения, что они были переданы для внесения дальнейших усовершенствований инженерам, занятым более детальными проектами, посредством делегирования выбора от детали к детали и так до тех пор, пока не были четко определены форма и структура каждого винтика. Первые шаги по лунной поверхности, совершенные в июле 1969 г. Нилом Армстронгом, подтвердили, что инженеры не упустили ни единой мелочи и разобрались в каждой детали.

Очень часто проект «Аполлон» преподносится как триумф науки. Это ошибка. В общем замысле искомая новая наука носила рутинный и периферийный характер. «Аполлон» правильнее назвать торжеством инженерного искусства. Да, с неизбежностью рутинного, когда дело касалось деталей. В определенном ракурсе программу «Аполлон» лучше всего описать как прорыв в инженерном *менеджменте*, воплощение усилий, беспрецедентных по масштабам, сложности и плотности координации.

В области молекулярной биологии беспрецедентным по масштабу и координации стал проект «Геном человека». По сравнению с «Аполлоном» — это пример «из другой оперы» и значительно более простой как с точки зрения объема финансирования, так и трудностей, которые необходимо было преодолеть для вовлечения независимых ученых в совместную согласованную деятельность. К счастью, вариант наиболее подходящей организации действий был изначально встроен в саму задачу. Природа сгруппировала гены в хромосомах, и вслед за ней координаторы проекта «Геном человека» распредели-

ли задачу секвенирования различных хромосом между различными странами и исследовательскими группами.

В общих чертах, для осуществления проекта необходимы были финансирование, исполнение обязательств участниками и разделение труда. Решающее значение имели инновации в технологиях и методах (более мощные вычислительные инструменты, техники лабораторного анализа, а также секвенирование методом «выстрела из дробовика»). Однако самые передовые приемы и методы не требовали тесной координации. Гарантией внутреннего связного результата стала связность самой природы.

Проект «Геном человека» начинался так же, как проект по изучению слона. Напротив, исходным пунктом «Аполлона» стала концептуальная система инженерного проектирования. В основе успеха первого лежали в значительной степени независимые исследования; второй потребовал невиданной ранее теснейшей интеграции проекта.

Принципиально разные способы организации уходили своими корнями в принципиально различные культуры (с точки зрения совокупности труда и мышления, осмысления проблем и подходов к их решению) двух рассматриваемых нами областей. Что если бы кто-то попытался собрать вместе инженеров по космическим системам и молекулярных биологов? Вероятно, каждый посмотрел бы на представителя другой группы как прошедшего обучение у пришельцев с Марса.

Почему наука и техника смотрят в противоположные стороны?

На самом глубоком эпистемологическом уровне научное исследование и инженерное проектирование смотрят в разные стороны. В человеческом сознании исследование и конструирование воспринимаются как содержательно связанные друг с другом дисциплины, но информация в них движется в противоположных направлениях. Из-

учение и конструирование столь же различны, как получаемые принтером данные об изображении и инструкции, в соответствии с которыми осуществляется печать; столь же различны, как сенсорные и двигательные нейроны; столь же различны, как человеческие глаза и руки.

Сущность науки — исследование, сущность инженерного дела — конструирование. Научное исследование расширяет масштабы человеческого восприятия и понимания; инженерное проектирование расширяет масштаб человеческих планов и результатов.

Несмотря на принципиальные идейные различия исследований и проектирования, на практике они нередко переплетаются друг с другом, идет ли речь о «поле», об исследовательской программе, команде по разработкам или о созидательном мышлении человека. Объединение проектирования и исследований часто имеет такое же значение, как зрительная координация движений рук. Инженерное проектирование новых инструментов способствует проведению исследований, в то время как научные изыскания могут подсказать новые конструкторские решения. Инженеры-химики в поисках условий, максимизирующих выход продукта, изучают химические системы, испытывают различные сочетания реагентов, температуры, давления и времени; они могут ежедневно осуществлять различные исследования, хотя цель проводимых экспериментов заключается в обеспечении инженерного дизайна и анализа. И наоборот, в процессе разработки таких устройств, как Большой андронный коллайдер, физики-экспериментаторы непременно занимаются инженерным проектированием. Более того, необходимым условием создания такой машины с туннелями, вакуумными системами, сверхпроводящими магнитами и детекторами частиц, весящими десятки тонн, стала реализация грандиозного по своим масштабам инженерного проекта как неотъемлемой части программы научных изысканий².

2. Противопоставление способов мышления, ценностей, культуры и

Тесно переплетающиеся между собой связи между научными исследованиями и инженерным проектированием затеняют их глубокие различия. Для того чтобы осознать всю трудность проведения различий между этими сферами, рассмотрим их общие черты.

И ученые, и инженеры работают с материальными системами, которые описываются всеобщими физическими законами. И те и другие используют язык математики, алгебры, высшей математики и дифференциальных уравнений, применяя эти методы к одним и тем же законам движения, силам и полям. Представители обеих групп используют схожую техническую лексику для описания классической механики, гидродинамики, материалов, оптики и многого другого, в том числе одних и тех же материалов и одних и тех же материальных объектов.

Более того, довольно часто ученые и инженеры сотрудничают друг с другом и их роли практически сливаются. Инженерные творения основаны на знаниях, полученных учеными с использованием инструментов, созданных инженерами. Ученые часто конструируют собственные инструменты, а инженеры нередко осуществляют измерения и вносят существенный вклад в науку, и обе роли может играть один и тот же человек. Поэтому нет ничего удивительного в том, что наука часто получает признание за инженерные достижения, а инженерию нередко ошибочно рассматривают как одну из научных областей.

Обращаясь к крупномасштабной структуре исследования, мы видим, что, если вести счет на доллары или «человеко-годы», научный проект может состоять пре-

институтов в науке и технике необходимо мне для того, чтобы сравнить типичные подходы в областях, сосредоточенных на исследованиях или на проектировании. Сами названия областей далеко не всегда характеризуют их сущность во всей полноте. Например, кафедры вычислительной техники во многих случаях сосредоточены на развитии искусства дизайна, в то время как на кафедрах инженерной механики осуществляются программы в рамках материаловедения.

имущественно из инженерных разработок. То же самое может быть верным и в отношении техники. Некоторые области науки, такие как, например, планетология, относятся к числу инженероёмких (планетология и инженерия космических систем срослись подобно сиаемским близнецам). Точно так же некоторые области техники являются чрезвычайно наукоёмкими. Научные журналы переполнены сообщениями о новых способах производства полезных вещей — сообщениями об инженерных успехах, ставших возможными благодаря наукоёмким изысканиям.

В частности, новые наноразмерные структуры во многих случаях являются следствием новых процессов. Но прежде чем и структуры, и процессы можно будет использовать как строительные блоки для системной инженерии, их нужно как следует изучить. Довольно часто понятия «нанонаука» и «нанотехнологии» используются как взаимозаменяемые, что является следствием их практических взаимоотношений.

Интеграция конструирования и исследований прослеживается и в мелочах. План поездки в магазин можно рассматривать как проект, а поиск набора автомобильных ключей — как исследование. В фундаментальном смысле в сознании каждого человека интеллектуальная деятельность, связанная с исследованиями, и проектирование осуществляются совместно, так же как взаимодействуют сенсорные и двигательные нейроны, зрение и движение, осознание и намерение. В этом смысле двойственные процессы конструирования и исследования могут быть обнаружены, например, даже в сознании мышей, отличающихся активностью и любопытством.

В свете всех этих взаимосвязей, возникает вопрос: насколько глубокими являются различия между наукой и техникой? Достаточно глубокими для того, чтобы вызывать структурные контрасты сверху донизу. Их корни уходят в эпистемологию и обусловлены направленностью информационного обмена между сознанием и материей. От этой корневой причины различия поднимаются все

выше и выше, проходя через образование, труд, интеллектуальные ценности и институциональные структуры.

Техника и наука занимаются одним и тем же материальным миром, но конструирование и исследования, по самой своей природе, пытаются «развернуть» сознание людей в противоположных направлениях.

Восходящая структура научного исследования

Научный поиск направлен на построение знаний от частного к общему, от основания материального мира до высот проверенных практикой теорий, которые, вообще говоря, являются абстрактными моделями того, как работает наш мир. Образующаяся в результате структура может быть разделена на три уровня, соединенных двумя мостами.

На уровне земли, мы обнаруживаем интересующие науку материальные объекты, такие как пасущиеся в африканской саванне стада и растущие в ней травы, галактики и газовые облака, обнаруженные на протяжении космологического времени, и упорядоченные электронные облака, зарождающиеся при температуре около одной тысячной градуса выше абсолютного нуля. В принципе, научный интерес представляет Вселенная в целом и каждый ее потенциальный феномен.

На мосту, ведущем на следующий уровень, материальные сущности превращаются в объекты исследования посредством человеческого восприятия, усиленного благодаря таким инструментам, как радиотелескопы, магнитометры и бинокли. Полученные результаты записываются и распространяются, что способствует расширению круга человеческих знаний. Наблюдения, позволяющие получить информацию, охватывают диапазон от материальных сущностей до сферы символов и мыслей.

На следующем уровне информационного потока ученые создают конкретные описания того, что они наблюдают. Из прилетевших из прошлого фотонов и попавших в телескопы, астрономы выводят состав и

определяют движение галактик. Зондируя материалы с помощью электронных приборов, физики делают выводы о динамике систем спаренных электронов. Благодаря своим глазам и телеметрическим сигналам орнитологи изучают миграцию малого веретенника, который на своем пути с Аляски в Новую Зеландию пересекает Тихий океан без единой посадки. Посредством данных ученые описывают то, что хотели бы объяснить.

На мосту, ведущем на верхний уровень нашего описания научного информационного потока, конкретные описания становятся движущей силой эволюции теорий, сначала предлагая идеи об устройстве мира, а затем предоставляя возможность их проверки в ходе интеллектуальной формы естественного отбора. Поскольку теории конкурируют между собой за внимание и использование, то отличительными чертами победителей становятся простота, широта и точность в ходе экспериментов, с помощью которых они проверяются на соответствие теории и эмпирических данных.

В качестве стандартного примера обычно приводится ньютоновская механика. Ее широта позволяет рассматривать любые массу, силу и ускорение с математической точностью. Эти широта и точность являются источником практической мощи механики Ньютона, и ее фиаско как абсолютной теории. Используя законы Ньютона, мы можем предсказать движения при любой скорости, а точные измерения раскрывают изъяны теории.

Таким образом, в процессе научных исследований поток знаний направлен снизу вверх:

1. Посредством наблюдений за материальными системами формируются четкие описания.
2. Предлагая идеи, а затем испытывая их, четкие описания формируют научные теории.

На рис. 1 представлена схематическая структура научного исследования и антипараллельная ей структура инженерного проектирования.

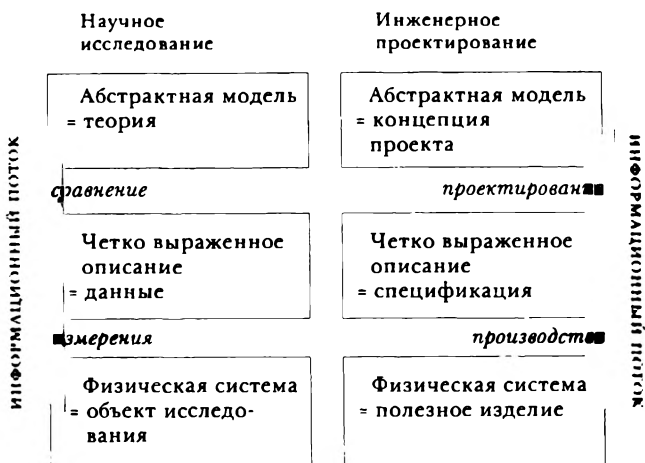


рис. 1. Антипараллельные структуры научного исследования и инженерного конструирования

Нисходящая структура инженерного конструирования

В научном исследовании информация идет от материи к сознанию. В инженерном проектировании информационный поток, напротив, направлен от сознания к материи:

1. Исследование позволяет извлекать информацию с помощью различных инструментов; в конструировании инструменты используются для того, чтобы применять информацию на практике.
2. Исследование формирует описания с тем, чтобы они соответствовали материальному миру; конструирование формирует материальный мир для того, чтобы он соответствовал описаниям.

На этом уровне различия между наукой и инженерией выражены так же четко, как отличаются друг от друга микроскоп из научной лаборатории и фрезерный станок, установленный в заводском цеху. На более высоких, абстрактных уровнях науки и техники, различия становятся более расплывчатыми, но их глубина остается неизменной. В этих случаях мы наблюдаем контрасты между проектами и теориями, нематериальными, но отличными друг от друга продуктами человеческого сознания:

1. Ученые находятся в поиске уникальных корректных теорий. Несмотря на то, что достоверными могут казаться несколько теорий, правильной является только одна из них. Инженеры создают несколько вариантов работоспособных конструкций. Если несколько из них продемонстрируют достаточно высокие результаты, это становится гарантией успеха инженерных изысканий.
2. Ученые находятся в поиске теорий, охватывающих наиболее широкий возможный диапазон (Стандартная модель может быть применена ко всему без исключения). Инженеры создают концепты, наилучшим образом подходящие для отдельных областей (сопла с жидкостным охлаждением для ракет-носителей на жидком топливе).
3. Ученые находятся в поиске теорий, позволяющих делать точные предсказания (подобные ньютоновским) в узком диапазоне, в то время как инженеры стремятся создавать конструкции, обеспечивающие широкие границы диапазона безопасности.
4. Для опровержения теории в когнитивной науке достаточно единственного ошибочного предсказания, независимо от того, сколько испытаний она успешно прошла перед этим. В инженерии для одобрения концепции достаточно одной успешной конфигурации, независимо от того, какое количество ее вариантов в прошлом потерпели фиаско.

Кому-то может показаться странным, что, принимая во внимание столь четкие различия, когда-то могла возникнуть и сохраняется до сих пор путаница между научными исследованиями и инженерным проектированием. Но если мы попытаемся судить об этом по популярной и научной периодике, то должны будем признать: четкое понимание различий между наукой и техникой встречается на удивление редко³. Помимо многих других последствий, эта путаница отрицательно влияет на понимание основ знаний об инженерном деле (например, на знания о потенциале технологий АТП-уровня).

Наилучшей точкой, находясь на которой мы можем понять сущность природы инженерии и ее мощи, является вершина процесса конструирования. Я говорю о системно-инженерном взгляде, которому научился в то время, когда мне довелось познакомиться с практикой и культурой инженерного проектирования космических систем.

Стратегия системного инженерного проектирования

В общем случае при взгляде с вершины научного исследования перед нами предстает хорошо понятная картина. Теоретики заняты поиском и проверкой точных объяснений, полученных в процессе наблюдения за окружающим нас миром. И в этом смысле успешные теории предопределены самой природой. С вершины

3. Сегодня утром, в передаче о планируемом в Северной Корее запуске космического спутника Земли, репортер ВВС сообщил: «Ожидается, что для сборки трехступенчатой ракеты ученым потребуется несколько дней». Сомнительно, что этим ученым суждено когда-нибудь прочитать журнал, в котором сообщалось бы о сделанных ими открытиях. Или имелись в виду инженеры, контролировавшие работу технических специалистов? Очевидно, что, как и многие другие люди, репортер не видел разницы между учеными и инженерами.

инженерного конструирования перед нами открывается принципиально иная картина, не вызывающая столь же бурных дискуссий. В процессе разработки систем, инженеры должны делать абстрактный выбор, который до конца не понятен и ни в коем случае не предопределен, будучи ограниченным лишь законами природы.

Ключ к пониманию инженерии на системном уровне — на уровне архитектуры систем — заключается в понимании того, как абстрактный инженерный выбор может основываться на однозначно определенных фактах физического мира. В свою очередь, ключ к достижению этого понимания — осознание того, почему инженеры обладают способностью проектировать системы, принципы функционирования которых находятся вне пределов их полного понимания.

Давным-давно, кузнец знал наизусть все инструменты и материалы, которые могут потребоваться ему для выполнения работы и демонстрации своего мастерства. В более поздние времена, когда мастера часовых дел уже научились создавать сложные по устройству машины, ремесленник полагался на цепочки поставок инструментов и материалов, слишком длинные для того, чтобы он знал все их звенья. При этом сам продукт мог оставаться доступным для знания и понимания одним человеком.

В наши дни на смену кузнецам пришли металлургические заводы и металлообработка с числовым программным управлением (ЧПУ), а часовщиков вытеснили автоматизированные предприятия, на которых изготавливаются часы с миллиметровыми шестеренками и электронными устройствами, считающими колебания кристалла кварца на мегагерцовой частоте. Каретник мог знать каждую деталь изготавливаемой кареты, но современный авиационный инженер не способен до конца понять всю сложность, заложенную в крыло реактивного авиалайнера. Точно так же, как никто никогда не поймет, хотя бы наполовину, устройство гораздо более сложных заводов, на которых изготавливаются компоненты самолетных крыльев.

Каким образом результатом целенаправленного конструирования становятся продукты, степень сложности которых недоступна пониманию никого из нас?

В сущности, проектирование такого рода продуктов осуществляется посредством руководства и делегирования полномочий, как это происходит в корпорации, когда ни один человек не способен держать в уме всю ее целиком. В частности, ни один из топ-менеджеров не способен знать все должностные обязанности всех тех, кто занят трудом, не связанным с управлением. Схожие функции, как правило, выполняют и инженеры, занятые на высших уровнях процесса проектирования. По крайней мере, будучи членами команд, они отвечают за инженерное решение в широком его понимании — общую конфигурацию устройства и мощность используемого в нем двигателя. Решение всех других разнообразных конструкторских задач, для решения которых требуется объем знаний недоступный ни одному, самому одаренному человеку, делегируется на более низкие уровни. Обоснование, сопоставление, оценка и совершенствование инженерных решений стратегического уровня — вот что составляет основу архитектуры системы. Аналогичную роль выполняет и системный проектировщик зданий, которого мы обычно называем архитектором.

Архитектор-строитель имеет возможность определить положение и несущую нагрузку стены, не задумываясь о том, что было бы логично сначала установить размеры и положение отдельных стальных балок. Проработка деталей может быть скрыта и делегирована. Схожим образом обстоят дела с самолетными крыльями тех типов, которые уже строились в прошлом. Авиаконструктор может выбрать длину, хорду и конфигурацию крыла (и многое-многое другое), не обращая внимания на сложность машин, которые будут обеспечивать то или иное положение посадочных закрылков. Их структуру и функции достаточно детально описать и в дальнейшем исходить из того, что для последующей работы над кон-

струкцией самолета, задача конструирования собственно закрылков и элементов механизации крыла будет передана соответствующей инженерной группе.

Таким образом, ключ к проектированию и управлению сложностью лежит в работе в конструировании компонентов особого рода — сложных, но поддающихся пониманию и описанию простыми словами *вне проекта*. Эта нисходящая стратегия «разделяй и властвуй» открывает исключительные возможности, недоступные во всех других случаях. Ей мы обязаны компьютерами, принтерами и автомобилями. Если бы не она, у нас не было бы даже заводов, на которых производятся простейшие вещи.

Проектирование и создание систем рассматриваемым нами способом — как сочетания различных функциональных подсистем — открывает возможности разделения труда и знаний. Именно так инженеры описывают лакуны, которые должны быть заполнены, и оценивают преимущества, возникающие при использовании соответствующих компонентов. Именно так системная инженерия приводит в движение процесс, позволяющий получить согласованный результат, даже если самого слона в наличии еще нет.

Системная инженерия представляет собой сферу, принципиально отличную от науки, несмотря на то, что представители и первой, и второй должны соответствовать одной и той же физической реальности. Более того, системная инженерия способна обеспечить перспективу, необходимую для того, чтобы распутать узлы, возникающие в наукоемких исследованиях, выявить пробелы и определить роли, исполнители которых будут устанавливать критерии и метрики, необходимые для оценки реальных и прогнозируемых достижений.

АТП и ведущие к нему пути иллюстрируют трудности, с которыми сталкивается наукоемкое инженерное дело. Если наука и техника связаны достаточно свободно, обязательно возникает небольшая путаница, когда ученые стремятся к знаниям, не обращая внимания на возможности их практического применения, а ин-

женеры разрабатывают инновации, опираясь исключительно на научные знания из учебников. Когда два вида деятельности переплетаются друг с другом более тесно, границы между ними размываются, как это происходит в инженерных разработках молекулярных систем. В этих условиях цели системной инженерии могут быть сформулированы достаточно уверенно, в то время как детальное проектирование и изготовление во многих случаях требуют интенсивной экспериментальной работы. В данном виде наукоемкой инженерии резкое концептуальное различие между двумя гранями — исследованием и конструированием — могут легко потеряться в интеллектуальном тумане.

Издержки упущенных возможностей в этом случае могут быть огромны.

Взаимодополняемость, а не сходство — вот что превращает научные исследования и инженерные разработки в мощную силу, независимо от того, слабо они связаны друг с другом или тесно переплетены в том диапазоне знаний, что необходим для решения поставленной задачи.

Проблема противоречащих друг другу интересов

АТП является следующим этапом развития молекулярных наук в процесс конструирования макромолекулярных структур. Однако развитие этой области происходит довольно медленно. В разработке технологий АТ-производства были достигнуты огромные успехи, но им недостает фокуса. Так, в большинстве случаев разработки в области макромолекулярной инженерии ведутся в расходящихся направлениях — рассматриваются возможности ее применения в медицине и материаловедении, воспроизводства биомолекул из чистого любопытства и так далее. Несмотря на огромную ценность всей этой работы, в ней упускается нечто важное.

К сожалению, современная макромолекулярная инженерия слишком редко начинается с попыток приобрести широкое видение задач системного уровня и целей, к которым они способны привести участников проекта. В отсутствие координации в рамках общего видения, которое охватывало бы полный набор необходимых компонентов, невозможно получить ни ясное представление о том, что требуется для решения поставленной задачи, ни объединить усилия, направленные на построение единого целого из составных частей. Как в притче об ученых-автомобилистах, здесь возможно бесконечное движение вперед в различных направлениях, которым так и не суждено слиться в единое функциональное целое.

Наука находится в поиске ответов на вопросы, но далеко не всегда тех же самых, которые должны задавать себе инженеры. Представители новой области техники, зарождающейся в сфере, сосредоточенной на исследованиях, должны осознавать опасность того, что научные интересы могут быть приняты за инженерные, и наоборот. Напротив, четкое разделение этих двух групп интересов ускорило бы движение по избранному пути и облегчило бы поиск дорог, которые ведут к более высоким наградам.

Одним из самых ярких примеров тому является АТП.

Поиск знаний против применения знаний

Наука и техника смотрят в разных направлениях и задают себе разные вопросы.

Наука находится лицом к лицу с неведомым, что и определяет структуру научной мысли. В процессе поиска ученые применяют уже имеющиеся знания, но сама наука требует выхода за их пределы.

Инженерное проектирование, напротив, избегает неизвестности. В своей работе инженеры используют уже имеющиеся знания, применяя их в надежде избежать неожиданностей. Чем меньше экспериментов в инженерном деле, тем лучше.

Исследование и проектирование вызывают к различным способам мышления, которые могут противоречить друг другу. Предположим, имеется некая инженерная задача. Рассматривая сопутствующую научную проблематику ученый может сделать вывод, что ограниченность знаний не позволит осуществить инженерные разработки. Напротив, инженер, рассматривая ту же самую задачу, может заключить, что имеющийся объем знаний позволяет найти решение. Выбор в пользу ожидания того момента, когда накопится достаточный объем знаний, может оказаться ошибочным. Например, если бы инженеры, создавшие отрасль транзисторной электроники, дожидались получения учеными исчерпывающего представления о поведении электронов в твердых телах, им никогда не удалось бы разработать технологию производства транзисторов с использованием алюминия, кремния и его диоксида. Как оказалось, чтобы запустить цифровую революцию, инженерам был необходим достаточно тонкий слой знаний, образующий основу технологий кремниевой электроники.

Мне не раз приходилось опровергать ошибочные представления, вызванные неправильным пониманием роли неизведанного.

В прошлом году в Оксфорде я присутствовал на лекции об атомарно точных наномеханических подшипниках и по ее окончании разговаривал с лектором — ученым-экспериментатором, обладавшим широчайшими знаниями обо всем, что было связано с атомарно точными поверхностями в сверхвысоком вакууме.

Критикуя известные концепции АТ-подшипников, лектор заметил, что многим поверхностям свойственна неприемлемая спонтанная реорганизация или соединение с другими поверхностями. В результате поведение многих из них непредсказуемо. Например, пара помещенных в вакуум чистых кремниевых пластин с индексами Миллера (100) вступает в контакт и соединяется друг с другом. Поведение многих других поверхностей наукой еще даже не изучено.

Подшипники, как предмет инженерного интереса, принадлежат к числу устройств, которые рассматривались нами в главе 5. Их отличительная черта — предсказуемо устойчивые поверхности, скользящие одна по другой; при этом движение происходит очень гладко, и трения почти не возникает. Все, что необходимо сделать инженеру, столкнувшемуся с трудностью, — рассмотреть несколько вариантов подшипников с хорошими характеристиками и выбрать наиболее подходящий. Все то же самое верно и в отношении подшипников в наномеханических системах. В лаборатории А. Зеттла в Беркли было продемонстрировано, что необходимыми свойствами обладает целый ряд движущихся частей, созданных на основе вложенных графеновых цилиндров. Поведение этих структур полностью соответствует данным, полученным с помощью стандартных вычислительных моделей. Расчеты показывают, что возможно создание целого ряда и других конструкций подшипников.

Я рассказал об этом своему собеседнику, прекрасно осведомленному о всех научных достижениях в сфере его специализации. После небольшой заминки он ответил: «Ах, да... да, конечно». Научный метод формулирования вопросов с неизбежностью заставляет ученого ставить вопросы, относящиеся к сфере неведомого. Инженерные вопросы с хорошо известными ответами (едва ли не по определению) почти не представляют интереса для науки.

Мораль этой истории. Столкнувшись с инженерной проблемой, не допускайте, чтобы связанные с нею неизвестные ранее явления отвлекали ваше внимание от уже изученных решений.

*Стремление к точности против
использования приближений*

Ограниченная точность — это частный случай ограниченности знаний, неосведомленность особого рода, присутствующая везде, включая инженерное конструирование.

Столкнувшись с неточными знаниями, ученый постарается дополнить их, а инженер просто примет их к сведению. Возможно ли, что предсказания окажутся ошибочными более чем на 10% по плохо понятым причинам? Попытка понять последние может привести к необходимости решения трудной научной задачи, в то время как инженер вообще не видит в них проблемы. Увеличим запас прочности на 50% и идем дальше. Определение запаса прочности входит в стандартную процедуру проектирования, а неточные знания — одна из многих причин, обуславливающих необходимость соответствующих расчетов.

* * *

В разговоре с директором крупного исследовательского центра по нанотехнологиям (ведущего в этой области) я упомянул о моделировании механических наносистем с использованием стандартных для молекулярной механики методов расчета молекулярной динамики. Он возразил мне, что они являются «неточными». Я согласился, что с точки зрения решения определенных задач (например, некоторых аспектов биомолекулярного моделирования), уровень точности действительно невелик. Однако его более чем достаточно для других целей, в частности, для изучавшихся мною в то время систем (например, для жестких устойчивых шестерен и подшипников). Мой собеседник задумчиво промолчал, и мы сменили тему.

Точность можно оценивать только в отношении целей проекта. Поэтому модели во многих случаях дают приемлемые ответы на возникающие у инженеров вопросы.

Мораль этой истории. Столкнувшись с инженерной проблемой, не допускайте путаницы между точными знаниями, к получению которых стремятся ученые, и достоверными знаниями, в которых нуждаются инженеры.

*Изучение природных явлений
против разработки надежных продуктов*

В природе часто встречаются загадки, поиск ответов на которые затягивается на десятилетия, а то и на несколько веков. Предсказания погоды, укладки мембранных белков или соответствия друг другу молекул в процессе образования кристалла — все эти проблемы относятся к областям, в которых исследования ведутся на протяжении длительного времени и пока увенчались лишь частичными успехами. В каждом из этих случаев непредсказуемые объекты исследования являются результатами спонтанных процессов — эволюции, кристаллизации, атмосферной динамики, и ни один из них не имеет базовых черт, присущих инженерному проектированию.

Что способствует предсказуемости на системном уровне?

1. Хорошо понимаемые части целого, вступающие в предсказуемые локальные взаимодействия, когда предсказуемость проистекает из расчетов или испытаний.
2. Учет допусков и контролируемой динамики с целью ограничения воздействий неточности и изменчивых условий.
3. Модульная организация, облегчающая расчеты и испытания, поскольку обеспечивает изоляцию подсистем друг от друга и от внешнего мира.

В науке, напротив, у многих систем, выступающих объектами исследований, отсутствует значительная часть перечисленных выше характеристик.

1. Компоненты и взаимодействия рассматриваемой системы могут оставаться неизвестными, неправильно понятыми или ошибочно интерпретируемыми.

2. В системе может отсутствовать учет и контроль допусков; она может оказаться в высшей степени нестабильной.
3. В системе нельзя выделить отдельные модули, все компоненты объединены друг с другом запутанными причинно-следственными связями, как внутренними, так и выходящими за ее пределы.

Действительно, изоляция системы от внешнего мира почти всегда становится первым шагом к достижению ее предсказуемого надежного поведения; ни один инженер не решится установить монтажную плату в улье без должного корпуса.

* * *

Один из ученых в статье, посвященной наномашинам общего типа (рассматривавшимися в этой книге), высказал мнение, что они не могут использоваться в биологической среде, так как биомолекулы обязательно забились бы в шестерни и другие движущиеся детали. Проблема имеет простое решение. Достаточно поместить шестерни в коробку передач, а важнейшие движущиеся детали — в герметичную оболочку. Идея корпуса для устройства представляется очевидной. Почему же ученый упустил ее из виду?

Дело в том, что внимание автора статьи было сосредоточено на биомолекулярных системах машин, действительно функционирующих в биологических жидкостях и адаптированных к этой непростой среде. Мягкие биомолекулярные машины в биологических средах поднимают важные для науки вопросы, но довольно часто ответы на них не имеют никакого значения для механизмов, которые можно заключить в кожу.

Мораль этой истории. Оценивая инженерные идеи, остерегайтесь допущений, в соответствии с которыми известные вам трудности могут вызвать проблемы в системах, сконструированных для того, чтобы избежать их.

*Поиск уникальных ответов против
стремления к множественным вариантам*

Расширение диапазона возможностей играет противоположные роли в исследованиях и в проектировании.

Если элѐфантологи предложили три жизнеспособные гипотезы о происхождении слона, то, по крайней мере, две из них должны быть ошибочными. Открытие еще одной возможной линии происхождения означает бо́льшую неопределенность, так как количество потенциально ошибочных гипотез увеличивается до трех. В науке альтернативы представляют собой незнание.

Если автомобильные инженеры разработали три жизнеспособные конструкции подвески, вероятно, все они будут работать. Появление еще одной конструкции означает снижение общего уровня риска и повышение вероятности того, что, по крайней мере, одна из них окажется близкой к совершенству. В инженерном деле альтернативы представляют собой варианты выбора.

Ситуация незнания того, какая из научных гипотез является истинной, не имеет почти ничего общего с проблемой выбора инженерных решений. Повторяю, внешние черты сходства научных и инженерных вопросов обманчивы. Во многих случаях они представляют собой едва ли не противоположности.

* * *

Я нахожу, что в некоторых случаях знание вариантов ошибочно принимается за незнание фактов. Примечательно, что в инженерном деле вкладом в знание может быть даже *научная неопределенность*, так как отсутствие ясности в отношении научных фактов способно предложить выбор инженерных решений.

Например, несколько лет назад, когда ученые не понимали принцип действия бактериального жгутикового мотора, молекулярные биологи предложили и приступили к проверке большого количества гипотез. Правильным описанием природы этого мотора могла быть

только одна из них. В то же время каждая из жизнеспособных гипотез предлагала способ инженерной разработки молекулярных моторов. Таким образом, проблемные конкурирующие научные гипотезы способны подсказать возможные инженерные решения, которые будут конкурировать друг с другом — действительно, чем труднее отвергнуть потенциально возможное объяснение поведения того или иного объекта, тем более вероятно, что на аналогичном принципе может быть построено работающее устройство.

Мораль этой истории. Остерегайтесь ошибочно принять мощь большого количества инженерных решений за проблему конкурирующих научных гипотез.

Проверка теорий против проектирования систем

Научные теории и инженерные конструкции вступают в резкое противоречие друг с другом даже на уровне логики.

В работе «Логика научного исследования» Карл Поппер замечает, что в принципе универсальные теории могут быть фальсифицируемы одним решающим экспериментом; в то же время миллион согласующихся с теорией экспериментов не может рассматриваться как научное доказательство ее справедливости. Так, в течение нескольких столетий законы И. Ньютона считались всеобщими. Что не помешало впоследствии доказать их ошибочность.

Если всеобщая физическая теория в терминах логики должна соответствовать универсальному численному утверждению «Для всех возможных физических систем...», то в инженерном деле — экзистенциально верифицируемому «Существуют потенциально возможные физические системы...» Опровергнуть первое утверждение может один контрпример, в то время как для того, чтобы доказать второе утверждение, достаточно одного положительного примера.

В этом наиболее глубоком логическом смысле вопросы, которые задаются в научных исследованиях и в конструировании, являются противоположными (в математических терминах — двойственными).

* * *

Мне не раз приходилось сталкиваться с путаницей, возникающей в случаях, когда ученые уделяют лишь поверхностное внимание вопросам передовых нанотехнологий. Выраженные явным образом ошибочные рассуждения довольно трудны для понимания: «Я могу представить что-то, что не будет работать; поэтому я сомневаюсь в том, что *хоть что-нибудь* способно работать». Мы уже имели дело с этой ошибкой в нескольких рассматривавшихся выше случаях:

- «В случае контакта *некоторые* поверхности „схватываются“ между собой; поэтому...»
- «*Некоторые* системы чувствительны к малейшим неточностям; поэтому...»
- «При контакте с грязью машины *некоторых* типов выходят из строя; поэтому...»

Будучи в целом верными, такие утверждения ничего не имеют против правильно подобранных материалов, поверхности которых могут использоваться для изготовления подшипников, или безупречных с точки зрения конструкции надежных систем, или машин, защищенных от проникновения грязи. Скорее, они привлекают внимание к ограничениям.

Если специалистам известно о существовании работоспособных конструкций, критики, начинающие свои речи словами «Я могу представить что-то, что не будет работать...», оказываются в дурацком положении. И все же всего десять лет назад подобные глупости стали основой научной критики идей АТП.

Мораль этой истории. Инженеры стремятся создать решения, воплощающие идеи в реальность, а ученые

предлагают различные испытания, способные опровергнуть ту или иную теорию. Попытка опровержения инженерной идеи путем предложения и опровержения концептов, которые могут не работать, является ошибочной.

*Простые специальные теории
против гибких комплексных решений*

В процессе проектирования инженеры отдают предпочтение простым решениям, но готовы принять любую сложность, если она является условием решения задачи. В процессе разработки новых теорий ученые стремятся к простоте и предпочитают не рассматривать слишком сложные построения.

По мнению физиков, Стандартная модель является чрезмерно сложной и неудобной. Они настаивают на необходимости новой теории, несмотря на то, что уравнения Стандартной модели умещаются на одной стороне бумажного листа. Ракета-носитель «Сатурн-5» состоит из шести миллионов деталей, а вес соответствующей инженерной документации составляет несколько сотен тонн. Однако инженеры относятся к этому обстоятельству как к проблеме необходимости улучшения управления, но не как к фатальному отсутствию элегантности конструкторских решений.

В науке отвергаются теории, которые могут быть скорректированы для того, чтобы привести их в согласие с произвольными данными, поскольку теория, согласующаяся с любыми исходными данными, не накладывает никаких ограничений на результаты расчета и вряд ли способна что-либо предсказать. Инженеры же, напротив, высоко ценят гибкость в процессе конструирования — решение, которое может быть изменено для того, чтобы соответствовать дополнительным требованиям, позволяет справиться с большим количеством проблем. Компоненты «Сатурна-5» прекрасно соответствовали друг другу именно потому, что они изначально

но конструировались с учетом возможности изменений в целях лучшего соответствия своей роли.

В науке к теории предъявляются такие требования, как простота формулировок и доступность для понимания. В инженерном деле не боятся сложности, и нередко для детального описания какой-либо конструкции может потребоваться вагон бумаги.

Поэтому в некоторых случаях инженерам приходится проектировать, анализировать и оценивать идеи, в процессе работы опираясь на описания, в которых множество деталей принимаются без обсуждения. Счет неопределенных параметров может идти на миллионы. Однако в данном случае эти параметры относятся не к научной неопределенности, но к инженерному выбору, который в случае необходимости может быть изменен; они относятся не к чрезмерно разбухшей всеядной теории, а к стадии процесса, результатом которого обычно становится полностью готовый продукт.

В любом сложном проекте сначала поступает финансирование, а уже потом начинается детальная проработка. Гибкость и расчетные допуски — условия того, что конструкторы будут иметь возможность заполнить все выявленные пробелы. Инженеры, участвовавшие в осуществлении программы «Аполлон», прекрасно понимали, вопросы какого рода могут быть временно отложены в сторону, а их коллеги могли анализировать и пересматривать решения. Различные варианты решений, запас прочности и консервативные модели — все это составляющие конструкторского искусства. Последнее требует особого способа восприятия и вынесения оценок, естественным образом дополняющего научный метод, но требующего применения иных навыков.

Мораль этой истории. Не следует судить конструкторскую работу по лекалам научных теорий. В ней нет места эстетике уникальности и простоты.

*Исследования из любознательности
против целенаправленных инженерных разработок*

Познакомившись с притчами об элэфантологии и автомобилизме, мы приходим к выводу об отсутствии взаимозаменяемости организационных структур науки и техники как эффективных способов координации повседневной деятельности.

В науке открытия делаются независимыми исследовательскими группами, в то время как в системной инженерии независимая деятельность не способна произвести ничего полезного, поскольку создание тесно интегрированных систем требует такой же тесной координации. Малочисленные независимые команды могут проектировать простые устройства, но только не системы более высокого порядка как, например, пассажирские реактивные самолеты.

До тех пор пока исследование сосредоточено на изучении способов создания новых компонентов — в зарождающейся инженерной области, к которой относится, в том числе, большая часть нанотехнологий, — проектирование и строительство комплексных систем будет оставаться задачей на будущее. Дверь к систематическим инженерным разработкам открывается позже, когда будет изготовлен и собран достаточно богатый набор различных компонентов.

Преодоление этого порога требует не только приобретения иного образа мышления (рассмотренными выше способами), но и иной организации работ — не вытеснения ориентированных на исследования научных изысканий, но обогащения присущей им ценности посредством различных практических приложений. Если цель заключается в инженерной разработке сложных продуктов, я вас уверяю, что никакая самая блестящая индивидуальная работа не принесет желаемых результатов.

Безусловно, в отсутствие инженерного подхода к изучению потенциала, маловероятной становится даже

оценка имеющихся возможностей. Наукоемкую интеллектуальную задачу создания концепций систем для новой области и понимания основных направлений их реализации способен решить квалифицированный ученый, хотя сама эта задача, в сущности, является абстрактной формой инженерии высокого порядка.

Сегодня молекулярные науки как раз в такой ситуации. Достижения в атомарно точном производстве открыли дверь, ведущую к АТ-инженерии, хотя в рамках самой научной дисциплины этот инженерный потенциал понимается плохо. Причиной тому отчасти являются ловушки, рассмотренные нами в предыдущих разделах.

Мораль этой истории. Остерегайтесь подходить к инженерному делу так, как будто оно ничем не отличается от науки. Стоимость этой ошибки может перечеркнуть ценность самой науки.

Применение инженерного взгляда

Чтобы заниматься научным поиском, нужно обладать определенной интеллектуальной дисциплиной. В идеальном случае ведется поиск простых универсальных объяснений, одновременно с ограничением количества сложных специальных гипотез. Исследователи проводят испытания с целью ограничить количество конкурирующих гипотез до единственно истинной, при этом признавая, что эту универсальную истину невозможно постичь с абсолютной точностью. Научное исследование по определению направлено на расширение человеческих знаний.

Напротив, применение уже имеющихся знаний для расширения человеческих способностей требует интеллектуальной дисциплины иного рода, которая в своей наиболее полной форме высшего уровня отличается от науки практически во всех отношениях.

Системная инженерия направлена на поиск гибких моделей. Принимая сложность и неточность, конструи-

рование справляется с ними, используя запас прочности. Оно признает непредсказуемость и ищет способы избежать ее. Проектирование приветствует конкурирующие решения и стремится расширить их круг. Только такой подход может использоваться в мире, в котором на каждый вопрос имеется целый ряд удовлетворительных ответов, когда только испытание позволяет установить узкую, но от этого не менее ценную истину: «Вот это работает».

Техника и наука пользуются общими знаниями. Во многих случаях они не только осознанно служат друг другу, но их наиболее существенные определяющие аспекты, такие как проектирование и исследование, тесно переплетаются в рамках различных программ, лабораторий или человеческого сознания, независимо от того, под каким флагом это происходит.

В то же время, когда из науки рождается новая инженерная дисциплина, ее признанию может воспрепятствовать сама природа новых вызовов и возможностей, так как научное мышление будет сосредоточено на проблемах иного рода. По мере получения новых научных результатов происходит увеличение альтернативных издержек (например, в молекулярных науках в наши дни).

Зарождение и развитие новой инженерной области означает, что нашим глазам открывается новый мир. Но мы не способны рассмотреть его только через призму науки, хотя без науки слепа и инженерия. Условием четкого взгляда на перспективу (если он возможен в принципе) является бинокулярное зрение, взгляд через призму и науки, и техники. В некоторых случаях бинокулярный взгляд на ландшафт технологического потенциала позволяет нам рассмотреть самые дальние ориентиры. Если же мы одновременно распознаем пути, ведущие к доступным в данный момент целям, эти ориентиры способны помочь руководителям исследований определить последовательные шаги к их достижению.

В числе этих усилий наиболее проблемным является взгляд в перспективу, попытка найти ориентиры и оценить хотя бы некоторые их особенности. К числу таких ориентиров, подобных возвышающейся на горизонте горной гряде, относятся и технологии АТП-уровня. Сколь многое мы можем рассмотреть и понять?

Изучение путей, пролегающих по бесконечному во времени ландшафту технологического потенциала, предполагает, что время от времени нам придется задавать новые вопросы о технологиях, основывающиеся на достижениях науки. Важнейшее значение в этом контексте имеет понимание того, вопросы какого рода могут быть заданы и на какие из них могут быть получены ответы, а также осознание природы методов, ответов, ограничений и мощи экспериментальной техники.

ГЛАВА 9

Изучая потенциал технологии

НАУКУ интересует, как она будет открывать *новые знания*. Техника задается вопросом о том, как она будет поставлять *новые продукты*. Экспериментальная техника задает себе другой, менее распространенный вопрос: «Каким образом применить *уже существующие* знания для изучения сферы *потенциально возможных* продуктов, которые пока не могут быть поставлены потребителям?» Другими словами, экспериментальная техника использует уже существующие научные и инженерные знания для изучения ландшафта потенциальных технологий.

Благодаря экспериментальной технике началась история космических полетов. Научные достижения в физике и химии, а также инженерные принципы предоставили достаточный объем знаний для того, чтобы обладавший воображением человек отправился вслед за своей мечтой, которую он сумел выразить в числах. Первая экспедиция возвратилась из похода, располагая довольно грубой, но все же верной картой пространства космических полетов. На ней были обозначены пути к технологиям, уже зарождавшимся в объективной реальности, а также выходившим за ее пределы в направлении будущих идеалов, которые служат нам ориентиром и сегодня.

Это путешествие началось очень давно.

Космос: 1899 г.

В 1957 г. весь мир был потрясен известием о запуске в СССР первого искусственного спутника Земли. «Рукотворная Луна» была прекрасно видна на вечернем небосклоне каждому американцу, вышедшему во двор дома, постоять рядом с семейным бомбоубежищем, призванным защитить его от атомной угрозы.

Но исследования в области космических полетов начались гораздо раньше. Русские ученые первыми стали изучать фундаментальные принципы космических полетов, выписывать уравнения ракетной динамики, изучать виды топлива с целью найти самое высокоэнергетическое для применения в двигателях, разрабатывать идею многоступенчатых ракет, изучать условия длительного пребывания людей в космическом пространстве. Эти исследования заложили основы космонавтики и не только. С самого начала русские ученые смотрели гораздо дальше полетов вокруг Земли и визитов на Луну. Они предвидели заселение человеком Солнечной системы.

Осуществление первой русской космической программы началось более ста лет назад, во времена правления императора Николая II. Она продвигалась вперед благодаря усилиям одного самоучки, провинциального школьного учителя из Калуги. В свободное от преподавания время он стремился наполнить реальным содержанием идеи, родившиеся благодаря книгам французского писателя-фантаста Жюль Верна. Это были мечты о полетах людей в космос. Ими грезил никому в то время не известный Константин Эдуардович Циолковский.

Чтение литературы, раздумья и математические вычисления заняли около десяти лет, и в 1896 г. К. Э. Циолковский закончил написание своего первого труда, который сыграл важнейшую роль в истории космонавтики. Автор представил свою статью на рассмотрение русского журнала «Научное обозрение», в редакции которого она пылилась в течение семи лет. Статья Циол-

ковского «Исследование мировых пространств космическими приборами» была опубликована только в мае 1903 г. В том же году, в декабре, братья Уилбур и Орвил Райт совершили первый полет на мотопланере, поднявшись на высоту всего лишь трех метров над уровнем земли.

Научное достижение Циолковского — настоящая загадка. Каким образом провинциальному школьному учителю, работавшему самостоятельно по вечерам, при свете лампы, еще до подъема в воздух первого аэроплана, удалось завоевать известность у последующих поколений? Почему его называют «отцом космонавтики»?

Ответ на этот вопрос имеет большое значение, так как действенность метода Циолковского была подтверждена временем. Мы назовем его «исследовательской инженерией»; вооруженный этим методом Циолковский более ста лет назад показал, что ракетная технология способна открыть человечеству мир за пределами Земли. Если применить его в наши дни (подобная методика служила мне ориентиром во времена моей работы в МТИ), то мы увидим, что атомарно точные технологии способны распахнуть двери, открывающие людям мир, простирающийся за пределы, установленные промышленной революцией.

Для изучения потенциала материальных технологий в исследовательской инженерии используются доступные физические знания и инженерные методы. Как и в инженерной деятельности в целом, процесс исследовательской инженерии проходит циклы развития от конструирования до анализа, от не признающего никаких пределов воображения до математических расчетов, ограничивающих полет человеческой фантазии.

Таким образом, исследовательская инженерия имеет много общего с инженерной деятельностью, которая в привычном ее понимании преследует гораздо более прагматичные цели. Обычная техника поставляет артефакты, а исследовательская — знания. В обычном инженерном деле необходимо учитывать не только законы

физики, но и производственные ограничения, пределы того, чего можно добиться в определенную историческую эпоху. В исследовательской инженерии в ее чистом виде принимаются во внимания только извечные ограничения законов физики.

Достижения исследовательской инженерии определяются уровнем доступных в тот или иной момент времени знаний. В 1896 г., когда Циолковский представил свой анализ реактивных аппаратов (то есть ракет), объем физических знаний человечества составлял небольшую часть их современного запаса. В том же году Анри Беккерель открыл радиоактивность, а годом ранее стало известно об X-лучах Вильгельма Рентгена. Физики уже знали о существовании электромагнитных волн, но радиопередатчик Гульельмо Маркони еще не был создан. Тайной оставалась и природа материи. Поскольку концепция квантовой механики еще не сформировалась, физики почти ничего не знали о фундаментальной природе материалов и молекул. К тому же многие ученые сомневались в самом существовании атомов (химики знали о них гораздо больше, за исключением нескольких самых твердолобых скептиков.)

Тем не менее имевшиеся у Циолковского знания позволяли ему действовать совершенно сознательно. Его описание принципа работы реактивных аппаратов («для каждого действия...») основывается на законах механики И. Ньютона. Для количественной оценки проблем выведения реактивного аппарата на орбиту Земли Циолковский использовал закон всемирного тяготения. Для того чтобы определить наиболее производительные виды ракетного топлива, сочетания которых позволили бы получить самую высокую энергию в расчете на единицу массы, ученый воспользовался экспериментальными данными. Циолковский высказал предположение, что наилучшими компонентами ракетного топлива будут жидкий водород и жидкий кислород и оказался совершенно прав — инженеры космических систем отдают им предпочтение и в наши дни.

Циолковский не нуждался ни в токарном станке, ни в дрели, так как для того, чтобы получить результаты размышлений и вычислений, ему достаточно было базовых инструментов инженера-конструктора — ручки и чернил. Он разрабатывал не ракеты, а уравнения, описывавшие их движение. Циолковский занимался не строительством жидкостных ракетных реактивных двигателей, а доказывал, что жидкое топливо предлагает самую высокую энергию.

Он предложил не проработанные до мельчайших деталей конструкции (их время придет немного позже), но показал возможность решения основных проблем, тем самым наметив путь, ведущий в мир по ту сторону неба: «Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство».

Из своего калужского дома, опираясь только на знания физики и химии, Циолковскому удалось разглядеть такой технологический потенциал, который продолжает раскрываться в нашей материальной действительности.

В надлежащей биографии Циолковского было бы упомянуто, что в возрасте 10 лет он потерял слух, вследствие чего был вынужден прекратить формальное обучение и перейти к самообразованию. Впоследствии он женился и содержал семью. Ученый был создателем истинно космической философии предназначения человека, которая в течение многих лет оставалась в неизвестности. Что он поддерживал большевиков, сначала посадивших Циолковского в тюрьму на Лубянке, а затем взявших на вооружение его воззрения и прославивших их, что он был избран в то, что потом станет Академией Наук СССР, а в 1924 г. ему была назначена пожизненная пенсия.

В надлежащей истории космических полетов было бы упомянуто, что за пределами России идеи Циолковского оставались малоизвестными. Был бы отмечен важнейший технический вклад в развитие космонавтики

ничего не знавших об идеях русского ученого Роберта Годдарда (США) и Германа Оберта (Германия), построивших действующие ракеты с двигателями на жидком топливе. В истории рассказывалось бы о подъеме ракетостроения на волне войны. В авангарде ракетного движения были провидцы, разделявшие мечту Циолковского о покорении космоса. Показательным является пример немецкого ученого Вернера фон Брауна. Он возглавлял проект по созданию и строительству ракеты «Фау-2», использовавшейся фашистами для обстрела Лондона с суборбитальных высот. В то же время фон Браун предложил подробный план осуществления космических исследований (*Das Marsprojekt*, опубликованный в США в 1953 г. под названием *The Mars Project*). В 1956 г. ему приказали воздержаться от запуска спутника для США, но в конце концов поручили команде фон Брауна разработку ракеты-носителя «Сатурн-5», благодаря которому была осуществлена высадка человека на Луну.

Впрочем, в центре моего внимания находятся не столько люди и не столько полные взлетов и падений истории их жизней, сколько разработанные ими методы мышления, а также уроки, которые мы можем извлечь из их опыта для такой дисциплины, как изучение потенциально возможных технологий.

Изучая опыт инженерной разработки космических систем

Исследовательская инженерия позволила оценить потенциал технологии ракетно-космических полетов за десятилетия до того, как кому-либо удалось построить необходимое оборудование. В то же время это была системная инженерия, позволившая сделать реально-стью потенциальные возможности.

История разработок космических систем свидетельствует о том, что практическая техника способна ро-

ждать из концепций, находящихся вне пределов текущей практики, наполнять архитектурным содержанием абстрактные идеи, рожденные воображением, а затем испытывать их на соответствие принципам инженерной деятельности и законам физики. Начиная с поискового, концептуального рождения космического полета, история показывает как проектирование, поэтапное усовершенствование конструкции, переработка и дальнейшие улучшения способны приводить проекты в движение и получать на выходе готовые работоспособные машины.

От ракет с жидкостными реактивными двигателями до спутников и марсоходов — история космических технологий является яркой иллюстрацией потока системной инженерной деятельности. Современная практика инженерии космических систем опирается на корпус методологических решений, стандартов, традиций и институтов, одушевляемых культурой, сформировавшейся в середине XX столетия. Я начал впитывать эту культуру в МТИ, благодаря наставникам, владевшим искусством создания устремленных в будущее смелых численно выраженных конструкций, умевшим всегда отбрасывать все лишнее, оставляя только самое необходимое.

Исследовательская инженерия имеет много общего с начальными стадиями системной инженерии — и там и там применяются схожие методы проектирования высокого уровня и анализа. Определенные различия имеют лишь цели этих видов деятельности. Обе начинаются с абстракций высокого уровня, призванных определить границы функциональности. Затем начинается поиск конфигураций подсистем, способных обеспечить исполнение общего функционального предназначения. Например, при проектировании космических систем может осуществляться поиск такой конфигурации структур, топливных баков и двигателей, которая могла бы использоваться для вывода десятитонного спутника на геостационарную орбиту. В данном случае исследовательская инженерия могла бы исключить из рассмотрения ракеты-носители, построен-

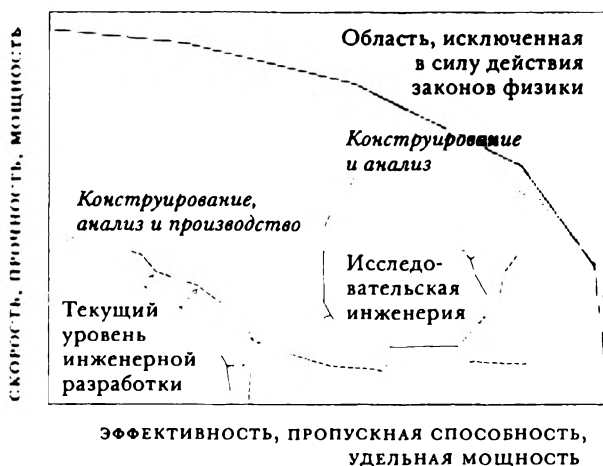


РИС. 2. Изучая ограничения, накладываемые на технологии физическими законами

ные с использованием доступных алюминиевых сплавов, и начать учитывать характеристики материалов, изготовленных из произведенных с атомарной точностью специальных углеродных материалов, обладающих в 50 раз большей прочностью в расчете на единицу массы (что обещает огромный выигрыш в итоговой эффективности).

Инженерная деятельность в случае, когда продуктом являются знания

Обычно системная инженерия направлена на создание таких конструкций, которые обеспечивают надежность и конкурентоспособность продуктов. Исследовательская инженерия ориентирована на поиск конструкций, способных привести к достоверным заключениям. И та и другая задают разные вопросы.

Понимание ответов на вопросы поисковой инженерии требует понимания их природы и того, чем они являются, а чем — нет. В частности, поскольку вопросы исследовательской инженерии обращены к бесконечному ландшафту технологического потенциала, ответы на них не зависят от неизвестных в текущей ситуации фактов. Ответы на вопросы поисковой инженерии могут иметь последствия для потенциально возможного будущего, подобно тому как открытие деления атомного ядра имело важное значение для потенциального исхода Второй мировой войны. Однако существование последствий *для будущего* отнюдь не тождественно вопросам *о будущем*. Ни произошедшие в прошлом события, ни те события, которые произойдут в будущем, не изменяют законов физики.

Уверенный ответ на обычные вопросы *о будущем* возможен в очень редких случаях. Под обычными имеют в виду следующие вопросы:

- *По какому пути будет в действительности развиваться технология?* В большинстве своем такой вопрос задается для того, чтобы использовать ответ для предсказания человеческих событий, и предполагает вынесение оценок на основе имеющейся информации; он, безусловно, выходит за пределы инженерного анализа.
- *Какие специфические технологии позволят добиться успеха на рынке?* Вопрос во многом схож с предыдущим относительно событий; инженерный анализ может предоставить информацию, используемую в процессе оценки, но ответы в большинстве случаев не имеют решающего значения.
- *Какие специфические технологии в конечном итоге дадут наилучшие результаты?* Может показаться, что этот вопрос выглядит как инженерный, хотя на него нельзя ответить с помощью инженерных расчетов; ответ на него потребовал бы знаний о каждой вероятной альтернативе, которая могла бы когда-нибудь появиться, а такое знание получить невозможно.

Как только мы объединяем вместе «технологии» и «будущее», человеческий разум начинает проявлять склонность к смешиванию знаний, основывающихся на принципах физики и поверхностно схожей с ними спекулятивной болтовни — безответных вопросов, сомнительных ответов и агрессивной рекламы, столь присущей маркетингу, средствам массовой информации и популярной культуре.

На самом же деле исследовательская инженерия отвечает на особые, тщательно отобранные вопросы — она дает ответы, которые не зависят от неизвестности будущего и не осложняются конкурентным давлением. Это такие вопросы, сама конструкция которых предполагает ответ с использованием доступной в настоящее время информации. Следовательно, поисковая инженерия дает ответы, которые сразу же могут использоваться для проектирования систем в высшей степени консервативным способом, что позволяет противостоять давлению, оказываемому на конструирование и анализ. Вопросы относятся исключительно к нижним границам потенциальных результатов использования продукта; тем самым они могут основываться на совокупности самых неблагоприятных вариантов, а не на анализе наилучших случаев. Вследствие этого, вопросы описывают системы, сконструированные настолько консервативно, что они практически гарантированно не *описывают* будущий конкурентоспособный продукт.

Какую пользу мы можем извлечь из использования ограниченных знаний? Представьте себе, что конкурентная инженерия является добавочной деталью на карте, отображающей линию побережья и скалы, фарватеры и гавани, города и дороги — деталью, дополняющей точное структурное описание.

Вообразите себе поисковую инженерию как схематическое изображение берегов нового континента, нанесение на карту его границ и обозначения рек, ведущих в плодородные долины.

Грубые карты способны подсказать направления исследований, так как на них будут отображаться наиболее

перспективные с точки зрения дальнейшего изучения регионы. В инженерном деле схематическая карта и избранное направление — *В космос на многоступенчатых ракетах!* — способны отправить человеческий род в путешествие, о котором он и не мечтал. Для того чтобы открыть новые земли, могут потребоваться несколько десятилетий поисков. Но в некоторых случаях они оказываются в зоне прямой видимости едва ли не с самого начала похода.

Обычно в путешествиях идей и в поисках новых технологий бесполезно задавать вопросы о деталях машин грядущих десятилетий. Ответы на них могут пригодиться в том случае, если используются в качестве помощи в планировании, но не для прогнозов и предсказаний. Еще одним элементом процесса планирования могут быть вопросы другого рода — исследовательские. Но не стоит ждать от них чего-то большего, чем общие наброски того, что может быть сделано. В космонавтике цикл «исследовательский вопрос — ответ» повторялся снова и снова; первоначально поставленные вопросы инициировали работы, позволившие ответить не только на них, но и на последующие вопросы.

Инженерные разработки с исследовательским уклоном

Определить уровень допустимой нагрузки, позволяющей обеспечить удовлетворительное использование, совсем не трудно. Конкуренция вынуждает нас к поиску уровня наивысшей нагрузки, все еще допускающего удовлетворительную эксплуатацию. Это гораздо более трудная задача.

— *Standard Handbook of Machine Design* («Стандартное руководство по проектированию машин»), третье издание

Традиционная инженерная деятельность направлена на предоставление конкурентоспособных товаров, исследовательская инженерия — на предоставление достоверных знаний. Для решения этих принципиально

отличающихся друг от друга задач необходимо использовать отличающиеся друг от друга методы.

Три главных правила исследовательской инженерии

Поисковая инженерия представляет собой искусство применения научных и инженерных методов для исследования потенциала будущих технологий. Наиболее существенные методы инженерного поиска описываются тремя правилами:

- Правило 1. Исследуйте системы такого типа, для создания которых не могут использоваться современные инструменты.
- Правило 2. Задавайте только такие вопросы, на которые способна ответить современная наука.
- Правило 3. Думайте как инженер.

Другими словами, изучайте области, пока отсутствующие на доступной всем карте, продвигаясь вперед, опирайтесь на твердую почву, и в процессе исследований потенциальных задач, проблем и решений применяйте и воображение, и анализ.

Оба типа инженерной деятельности начинаются с определения цели, осознанно выбранной функции, которая задает требования. И та и другая начинаются с разработки концепций системного уровня, что позволяет определить подсистемы со своими собственными требованиями (и так далее до тех пор, пока рекурсия не достигнет нижнего уровня). Оба метода основываются на продвижении к поставленным целям посредством повторяющихся циклов проектирования, анализа и внесения усовершенствований. При этом в силу различий в целях используются различные критерии проектирования, подходы к анализу и степени доводки конструкций. Ключевую роль в данном случае играет давление, оказываемое конкуренцией.

Конкуренция побуждает инженеров к поиску оптимальных решений (или, согласно «Стандартному руко-

водству по проектированию машин», например, «вынуждает найти уровень наивысшей нагрузки»), тогда как в исследовательской инженерии типичная проблема заключалась бы в «поиске допустимого уровня нагрузки» (не самая трудная задача, если верить «Руководству»). В то же время в поисковой инженерии оптимизация является «вариантом по выбору», а простота и консерватизм в конструкции перевешивают результаты эксплуатации.

Техника создания знаний

Сопоставление инженерной деятельности, ориентированной на производство, и исследовательской инженерии:

Конкурентоспособные продукты	Достоверные знания
Детали производства	Системный анализ
Производственные ограничения	Ограничения моделирования
Эффективное проектирование	Консервативное проектирование
Издержки производства	Издержки анализа

Исследование ближайших рубежей, которые могут быть легко достигнуты с помощью перспективных технологий, далеко не то же самое, что усилия, направленные на достижение максимальных результатов эксплуатации уже имеющихся технологий. Вопросы, обсуждаемые в этой книге, представляют собой плоды, висящие на самых нижних ветвях дерева технологий АТП-уровня.

Конструирование надежных продуктов против инженерии достоверных знаний

Успех инженерной деятельности, ориентированной на производство, заключается в поставке надежного материального продукта, должным образом функционирующей физической системы. В исследовательской инженерии, в свою очередь, успех означает создание

и пополнение объема используемых должным образом знаний. Различные «продукты» инженерной деятельности обуславливают необходимость отличающихся друг от друга подходов.

Разрабатывая надежные в эксплуатации продукты, инженеры закладывают запас прочности, достаточный, чтобы учесть неожиданные события, производственные дефекты, а также неточности в собственно конструировании и анализе. Чтобы удержать пассажирский самолет в воздухе в случае неожиданного отказа оборудования нужно, чтобы инженеры предусмотрели резервирование всех его основных систем. И наконец, на заключительном этапе процесса проектирования и производства инженеры проводят обязательные испытания продукта. Успех тестирования означает для инженеров большую уверенность в своем творении.

Напротив, в исследовательской инженерии, когда конечным продуктом является концепт, «надежность» означает уверенность в возможности его доработки на системном уровне в любом из специфических воплощений, что позволило бы добиться реализации всех обещанных анализом функций. Для большей уверенности инженер-исследователь использует более значительный запас прочности, позволяющий приспособиться к неопределенности, а также упрощает и конструкцию, и анализ.

В обычных, ориентированных на производство, разработках конкурентное давление подталкивает инженеров к рискованным конструкциям и узким допускам, а достижение правильного баланса влечет за собой трудности, которые приходится преодолевать на протяжении всего процесса проектирования. В поисковой инженерии такое давление отсутствует, и специалисты получают возможность насладиться роскошью упрощения конструкций, а также увеличением количества «амортизирующих прокладок», компенсирующих возможные сюрпризы.

*Сравнение продуктов и дизайна
и анализа по соотношению цена — качество*

Более расслабленный результат по сравнению с тем, что можно было бы признать оптимальным, помогает инженерам-исследователям находить области выдающейся производительности, если сравнить их с любыми доступными в настоящее время. На ландшафте потенциальных технологий местоположение имеет большее значение, чем возможности улучшений, поскольку новые места — это области, в которых действуют новые правила.

Например, в 1960 г. развитие авиации, продолжавшееся более полувека, привело к тому, что длительность полета без дозаправки наиболее «экономичного» самолета достигла нескольких десятков часов. Однако уже самые первые искусственные спутники Земли могли оставаться на орбите в течение тысячи лет и более. Спутники буквально вошли в пределы области с новыми правилами. Аналогично обстоит дело и с будущим потенциалом промышленной обработки. Простое консервативное внедрение передовых методов АТП способно принести результаты, значительно превосходящие показатели всех самых совершенных средств производства. И вновь, только потому, что в новой области действуют новые правила.

Поскольку местоположение имеет большее значение, чем усовершенствования, имеют место изменения в структуре издержек.

В инженерном деле, ориентированном на продукт, как правило, величина операционных издержек и стоимость производства настолько велика, что затраты на проектирование воспринимаются как незначительные. Вследствие этого увеличение инвестиций в инженерные разработки способно принести очень высокую отдачу. Например, в производственном цикле по сборке сотни авиалайнеров небольшая конструкторская работа, позволяющая срезать с массы планера один килограмм, дает экономию в миллионы долларов затрат на авиационный керосин. Схожим образом, конкурентный от-

бор вынуждает отказываться от конструкций со слишком большим запасом прочности, таких как чрезмерно прочные и тяжелые крылья или избыточно мощные, тяжелые и топливоемкие двигатели.

В исследовательской инженерии, напротив, издержки конструирования — единственный вид затрат. Поскольку конечной ее целью является системный анализ, затраты на проектирование относительно невелики. В отсутствие производства издержки приобретения исходных материалов равны нулю. В отсутствие используемых в производстве продуктов операционные издержки равны нулю. Соответственно, издержки добавления значительного запаса прочности падают ниже нуля, так как его включение является наиболее дешевым способом повышения степени надежности и уверенности в инженерном анализе.

В случае АТП-систем, например, уменьшение потенциальной производительности в 100 раз не имеет ни малейшего значения для выводов, имеющих непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу, а свобода, идущая рука об руку с огромным люфтом в конструкции, вселяет лишь уверенность в том, что конструкция будет соответствовать всем возможным ограничениям.

В поисковой инженерии затраты на проектирование и системный анализ составляют общие издержки производства конечного продукта. Однако чем определяются издержки его использования? Поскольку продуктом являются знания, первичными и основными издержками их использования человеком являются его время и внимание, а также издержки понимания и оценки содержания знаний. Как и в случае с издержками проектирования, в случае когда конструкции представлены на системном уровне и со значительным запасом прочности, эти затраты резко сокращаются. Таким образом, используемые в исследовательской инженерии методы позволяют от начала и до конца процесса экономить интеллектуальные издержки полученных знаний.

Очерчивая пути, ведущие к АТП

На безграничном во времени ландшафте потенциальных технологий находятся и продукты, и средства их производства. Оглядываясь назад, мы видим, что современные технологии связаны с технологиями вчерашних дней неразрывной цепочкой, уходящей в эпоху промышленной революции и во времена кузнечных молотов и железа. Конец этой цепочки скрывается в глубоко прошлом человечества, когда люди только начинали использовать в различных целях орудия труда из камня. На каждой стадии развития на смену тем или иным технологиям фабрикации приходили более совершенные. Каждая такая технология занимает определенное место в бесконечном технологическом ландшафте в зависимости от результатов ее использования, измеряемых не прочностью, мощностью или скоростью вычислений, но масштабом того, что она позволяла создавать, и содержанием новых территорий, которые она позволяла осваивать.

На этих новых территориях основное долгосрочное значение имели новые технологии, позволявшие продвигаться дальше вглубь ландшафта, то есть открывать участки новых технологий, которые сами по себе позволяли изготавливать новые вещи. Технологии АТ-производства отвечают этому требованию в значительно большей степени, чем все известные нам ранее: по дороге к технологиям АТП-уровня усовершенствования в технологиях атомарно точного производства будут открывать возможность совершенствования самих этих технологий.

Способна ли поисковая инженерия помочь определить эти пути? Да, посредством рассмотрения относительно узкого круга производственных возможностей в качестве ограничений на внедрение (на доступные материалы, компоненты и методы сборки). Поэтому расширенные производственные способности рассматриваются как цели проектирования в поиске расширения

диапазона доступных материалов, компонентов и методов сборки. Каждый набор потенциальных производственных способностей служит отметкой на избранном пути; поэтому сконструированная на его основе система означает собой возможный новый шаг вперед. Таким образом, наша цель заключается в том, чтобы исследовать линии развития, которые на каждом данном уровне технологии фабрикации позволяют продвинуться немного вперед, определяя серии близко расположенных «каменей», образующих «дорожное покрытие».

В приложении II представлен обзор наиболее прямых путей, движение по которым небольшими последовательными шагами способно привести нас от современных лабораторных способностей к технологиям АТП-уровня. Длина шагов и скорость передвижения будут зависеть от качества конструкторских решений и уровня координации инженерных усилий.

Дорога от точки текущих лабораторных способностей, включающих в себя удивительно быстро расширяющийся диапазон технологий атомарно точного производства, уходящих корнями в прошлое столетие, ведет нас вверх по склону. Текущее состояние инженерного искусства позволяет создавать структуры, состоящие из миллионов атомов (значительно более крупных, чем производят клеточные программируемые машины), а также материалы со свойствами в диапазоне от химически чистых конструкционных полимеров до АТ-компонентов, более прочных и твердых, чем сталь.

Ограничения на их практическое применение налагаются не столько производством *per se*, сколько трудностями, возникающими в процессах моделирования, конструирования компонентов и усовершенствования соответствующих инженерных концепций системного уровня. В данном случае расходящиеся взгляды науки и техники приводят к возникновению разрыва, не полностью блокирующего поступательное развитие, но замедляющего его скорость.

В начале пути, ведущего к технологиям производства АТП-уровня, находятся современные технологии. Естественное движение вперед сопровождается улучшением традиционной самосборки благодаря добавлению мягких механических ограничений, сдвигающих ее в направлении большей надежности позиционного контроля и меньшей зависимости от сложных сопряженных поверхностей. Одним из его положительных следствий являются меньшие по размерам, более простые и более тесно связанные строительные блоки, позволяющие получать более прочные и жесткие мелкоструктурные материалы; в совокупности все эти усовершенствования позволяют создавать все более простые конструкции.

Каждый шаг вверх по склону способен обеспечить расширение круга более эффективных продуктов (материалов, лекарственных средств, цифровых устройств и так далее) в количествах, варьирующихся от миллиардов наноразмерных единиц (возможно, микрограммов) до тонн. Впрочем, впоследствии при движении по этим путям потребуется разработка передовых масштабируемых систем уровня АТП. Следовательно, нам необходимы будут крупные, хорошо управляемые технологические циклы производства устройств, предназначенных для выпуска наноразмерных компонентов и передачи их для сборки более крупным машинам. Подробнее эти пути рассматриваются в приложении II.

В следующей главе наш взор будет устремлен вверх по склону — в направлении передовых технологий и систем АТП-уровня, образующих основу разработок способных привести нас к тому, что можно было бы назвать «полным изобилием».

Часть IV

Технологии полного изобилия



Механизмы полного изобилия

В ПРЕДЫДУЩИХ главах были представлены различные фрагменты концепции атомарно точного производства. Пришло время объединить различные части и попытаться понять, как в целом могла бы выглядеть система, от первого ее звена до последнего. Затем мы перейдем к вопросам о том, насколько хорошо мы понимаем АТП. (Вероятно, для читателей, хорошо разбирающихся в технике, особенно полезным будет описание физических принципов молекулярного уровня АТП, рассматриваемых в приложении I).

Ранее я сравнивал будущие АТП-системы с принтерами — настольными устройствами, предназначенными для изготовления малогабаритных продуктов. В этой главе мы рассмотрим схемы организации малых механизмов для сборки более крупных продуктов, например, размером с автомобиль. В данном масштабе мы детально изучим систему, сконфигурированную как демонстрационная сборочная линия, через окна которой мы посмотрим на работу механизмов.

Вид со стороны конечного продукта

Представьте себе, что вы находитесь снаружи камеры конечной сборки крупномасштабной АТП-системы и наблюдаете через небольшое окно за работой машин, размещенных в пространстве размером с гараж, рассчи-

танный на один автомобиль. (И здесь нет ни малейшего преувеличения.)

Справа от себя вы видите выходную дверь для продуктов, готовых к отгрузке. Слева от вас находится нечто вроде полок, занимающих все пространство стены от пола до потолка. Каждый ряд полок разделен на прямоугольные камеры. В середине находящейся прямо перед вами камеры конечной сборки, занимающей большую часть помещения, — передвижной подъемный механизм, окруженный множеством машин.

Последние выглядят необыкновенно гладкими, лощеными, хотя и очень знакомыми. Они похожи на механизмы, используемые на автоматизированном производстве, где специальные роботы-манипуляторы совершают запрограммированные движения, поочередно захватывая необходимые компоненты и соединяя их друг с другом. Наши машины напоминают их просто потому, что они действительно являются механизмами автоматизированного производства, и потому, что механизмы, выполняющие схожие движения, часто имеют похожие друг на друга формы и движущиеся части. Поскольку наши машины изготовлены из материалов прочнее и легче стали, они могут быть более быстрыми, легкими и эффективными.

Вблизи окна, на стене слева, вы можете ясно увидеть несколько камер, расположенных как раз на уровне глаз. В каждой из маленьких камер находятся машины с манипуляторами. Сами настенные камеры выглядят как уменьшенные копии основной, крупной сборочной камеры. Ряды этих маленьких камер занимают все пространство стены. Вы находитесь слишком далеко, чтобы в подробностях рассмотреть их содержимое. Однако вы догадываетесь, что в них находятся уже знакомые вам, но уменьшенные машинокомплексы.

Вы нажимаете кнопку, и механизмы приходят в движение.

Сначала вам кажется, что ничего не изменилось. Но не проходит и минуты, как находящиеся перед вами

крупные машины начинают подхватывать различные детали, выпадающие из камер на стене слева, и размещать их на установленной в центре платформе. Детали, оказавшиеся на ней первыми, зажаты в специальных устройствах, а остальные как бы «нанизываются» на эти опоры. По мере того как машины производят сборку, перед вами проступают контуры знакомого продукта — автомобиля, каждая деталь которого отличается от тех, что мы ежедневно видим на дорогах, но имеющего схожую с ними форму, определяемую основной функцией.

Для того чтобы установить ту или иную часть на отведенное ей место требуется несколько секунд. Через соответствующее время из настенных камер появляются новые детали. Слева, внутри ближней камеры вы можете рассмотреть работу находящихся внутри машин. Похоже, что эти миниатюрные механизмы выполняют те же самые функции, что и большие машины, но с более высокой скоростью (несколько циклов в секунду). Вам с трудом удастся различить отдельные их движения. Довольно легко догадаться, что происходит в дальних, еще меньших по размерам камерах, хотя движения механизмов в них практически не различимы.

Сборка, которая производится в главной камере, занимает не более минуты времени. Находящаяся справа дверь разгерметизируется и открывается. Автомобиль перемещается в помещение приемки, упакованный в нечто, напоминающее пластиковый рукав. Через секунду после того, как дверь камеры закрывается и вновь герметизируется, рукав втягивается обратно для переработки. На этом процесс производства завершается. Такой метод выдачи конечной продукции обусловлен необходимостью предотвращения попадания примесей в сборочную камеру.

Если бы вы захотели приобрести этот автомобиль, «возраст» которого исчисляется в минутах, в качестве сувенира, он обошелся бы вам не дороже обеда в ресторане (со скидкой за демонстрационный просмотр). К сожалению, этот легкий, экономичный, дружелюбный

ный по отношению к природе автомобиль оказался бы лишним в вашем и без того переполненном вещами доме. Поэтому нажатием еще одной кнопки автомобиль отправляется в расположенную рядом машину, перерабатывающую все его детали.

Рассматриваем процесс во всех подробностях

Последние этапы АТП-процесса настолько тривиальны, что после внесения небольших корректив, всю работу по сборке макроскопических деталей могли бы выполнить современные промышленные роботы. Данный полюс рассматриваемого нами процесса характеризуется такими уникальными характеристиками, как качество, строение и эксплуатационные свойства компонентов, а также способом их обработки, позволяющим быстро добиваться полного соответствия деталей, не прибегая к помощи сварки, болтов, эпоксидного клея или заклепок. Но если всмотреться в этот процесс более пристально, мы увидим нечто иное.

Некоторые отличия связаны с упоминавшимися выше маленькими камерами, внутри которых находятся машины, работающие с высокой частотой. Как было показано в главе 5, законы механического масштабирования действуют и в пространстве, и во времени. В машинах, детали которых имеют схожую друг с другом форму и движутся с равными линейными скоростями, меньшие по размерам части будут преодолевать меньшие расстояния за пропорционально меньшее время. Более того, оказывается, что в той же самой пропорции масштабируются все остальные динамические свойства машин (механическое напряжение, деформация, частота, вибрация и так далее). Таким образом, меньшие по размерам машины способны выполнять аналогичные операции, собирая меньшие по размерам детали в большем количестве. Вот почему на демонстрацион-

ном предприятии мы видели прогрессивно уменьшающиеся камеры, в которых находятся машины, движения которых мы воспринимаем как размытые, так как по мере сокращения размеров частота движений увеличивается в десятки, сотни и тысячи раз.

Возвращаемся на наше концептуальное демонстрационное предприятие. На какое расстояние могут протянуться серии камер с точки зрения их реальной длины? Предположим, что на каждом шаге размеры камер изменяются с коэффициентом $\frac{1}{2}$ (например). Следовательно, мы можем представить ширину следующих друг за другом слоев как $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$ и так далее. Общая протяженность последовательности, соответственно, будет равна 2 (или, если мы возьмем другой коэффициент: $1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{9} + \frac{1}{27} = \frac{3}{2}$). Другими словами, общая геометрическая длина последовательности, независимо от количества рядов, примерно равна длине ближней к вам камеры.

Как оценить продолжительность всего процесса сборки от начала и до конца? На самом отдаленном этапе каждый робот-манипулятор должен совершить несколько движений, что может занять, скажем, 30 секунд. Каждая из этих серий движений предполагает перемещение собираемых компонентов из меньших по размерам камер. Следовательно, для того чтобы поддерживать необходимую скорость, каждая меньшая камера на предыдущем этапе должна будет завершить в этот же самый 30-секундный интервал несколько полных сборочных циклов. Законы масштабирования естественным образом обуславливают достижение сбалансированного результата, поскольку каждый ряд камер обрабатывает равные по величинам массы в равное время, используя механизмы, движения которых осуществляются с равными линейными скоростями независимо от размера.

Конечный результат довольно прост. В сходящемся сборочном процессе рассматриваемого нами типа средняя скорость потока компонентов от начала и до конца является постоянной. Если в камере конечной сборки компоненты расходуются, скажем, за 30 секунд, и если

все взятые вместе ряды меньших по размерам камер удваивают длину системы, то совокупная задержка во времени составит примерно 1 минуту — в том случае, если процесс начинается с создания блоков, значительно более крупных, чем молекулы.

В этой концептуально-демонстрационной АТП-системе, чтобы проследить путь от сборочной платформы до источников деталей, нам сначала потребовалась бы ювелирная лупа, а затем и микроскоп. С помощью постепенно возрастающего увеличения вы своими глазами увидели бы последовательность постепенно уменьшающихся в размерах машин и камер, приводящих в конечном итоге вновь к машинам, выпускающим компоненты, которые собираются из атомарно точных микроскопических строительных блоков.

Эти мельчайшие машины во многом похожи на те, которые мы уже видели в самой дальней камере. Несмотря на миллионнократное уменьшение в размерах они схожи между собой с точки зрения форм, движений и задачи, различаясь во множестве других деталей (например, в использовании моторов и подшипников).

Однако, углубляясь в наноразмерный диапазон, инженерия наталкивается на предельные, атомарные ограничения на размеры даже самых простейших устройств. Например, диаметр шестерен, валов и подшипников не может быть меньшим, чем несколько нанометров, просто потому, что механические компоненты, обеспечивающие необходимые для функционирования устройств формы, поверхности и механические свойства, должны состоять из достаточного количества слоев атомов. Заметим, что рассмотренное выше масштабирование распространяется только на механические устройства; напротив, электронные устройства демонстрируют далекое от классического поведение задолго до того, как они достигают диапазона атомарных размеров.

Проследивая цепочку далее, до источника микроскопических блоков, мы увидим машины, не имеющие ничего общего с программируемыми роботизирован-

ными руками-манипуляторами. Здесь, в глубине наноразмерного мира, использование независимых программируемых машин нецелесообразно, просто потому, что наименьшие из возможных компьютеры становятся непрактично крупными. Поскольку цифровые системы уже сейчас имеют наноразмерные компоненты, они не могут масштабироваться так же глубоко, как и машины. В наши дни самые мелкие из используемых на практике заводских механизмов превосходят по своим размерам компьютерные микросхемы. В наном мире складывается противоположная ситуация с размерами, так как машины могут масштабироваться очень глубоко, а компьютеры остаются относительно крупными, энергетически прожорливыми и медленными. Таким образом, с точки зрения практической архитектуры АТП-производства непропорционально большие размеры компьютерной техники требуют использования элементов иного типа — простых, не требующих численного управления и более эффективных.

Преодоление микроблочного порога

Естественным пороговым масштабом для этого изменения в типе механизмов (и естественным местом разрыва в цепочке АТП) является диапазон, в котором машины способны строить макроскопические компоненты, собирая их из микроскопических блоков. Блоки, относящиеся к микроскопическому диапазону размеров, могут быть относительно крупными, по сравнению с обычными молекулами (в сотни и тысячи раз больше в диаметре и в миллионы, миллиарды раз больше в объеме). Однако это означает, что по своим размерам блоки уступают длине волны видимого света. Поэтому для того, чтобы четко разглядеть их, требуется электронный микроскоп.

Подобно каплям чернил в струйном принтере, микроблоки могут использоваться для создания из крошечных частиц материала бесконечного разнообразия

самых сложных структур. Впрочем, еще лучшим сравнением является сопоставление их с блоками, используемыми в дорогих наборах конструкторов *Lego*, включающих в себя не только «кирпичики» самых разных цветов и форм, но и сложные функциональные блоки, используемые как моторы, зубчатые передачи, датчики и компьютеры.

Но микроблоки могут иметь более широкое применение, чем это предполагает аналогия с конструкторами *Lego*. Изготовленные из сверхпрочных материалов микроблоки могли бы использоваться для того, чтобы создавать из них сверхпрочные детали путем атомарно точного позиционирования и соединения друг с другом. Микроскопические блоки способны содержать в себе цифровые схемы, сопоставимые по сложности с ядром компьютерного процессора, и из них можно было бы собирать суперкомпьютеры, превосходящие по своим возможностям все известные сегодня электронно-вычислительные машины. В рамках характерного размера микроблоков более крупные блоки способствуют более быстрой сборке, в то время как более маленькие дают возможность более тонкой индивидуализации. Поэтому нет никаких оснований для того, чтобы ограничивать выбор унифицированным диапазоном размеров. Существует бесконечное количество вариантов выбора комплектов деталей и методов производства. Следовательно, наиболее практичные решения будут изменяться в зависимости от целей проектирования.

Поскольку микроблочный порог представляет собой естественное место для возникновения разрыва в технологической цепочке, дальнейшее изучение нашего демонстрационного АТ-предприятия заводит не вглубь механизмов производства, а к вопросам организации складов и создания запасов микроблоков, поставляемых с других производственных линий¹.

1. Отделение процессов, осуществляемых на более ранних технологических стадиях производства, обусловлено логистикой по-

В следующем разделе мы рассмотрим системы, способные производить разнообразные микроблоки в ходе технологического процесса, ведущего к атомарно точным микроскопическим компонентам, использующего механизмы на всех стадиях. Мы начнем с молекул и будем постепенно наращивать масштаб.

От молекул к микроблокам

Каким образом в технологической цепочке АТП производятся атомарно точные микроблоки из исходного сырья? Этот процесс состоит из нескольких последовательных стадий очистки сырья, соединения молекул в мономеры и в конце концов получения микроблоков.

Рассмотрим процесс превращения сырья в очищенный исходный материал. Для облегчения решения задачи в рамках исследовательской инженерии желательно, по возможности, избавиться от сложностей. В процессе получения и очистки исходного материала нужно довольно глубоко переработать изначально загрязненное природное сырье. Способы решения данной задачи в рамках знакомых промышленных процессов уже известны, поэтому такие сложности, как скальные грунты, морская вода или загрязнение нефтью, мы оставим за скобками технологической цепочки АТП, рассматривая ее с точки зрения современных технологий коммерчески доступных чистых химических веществ. Заметим, что появление и развитие новых, более чистых технологий, производства представляет собой естественный шаг в модернизации технологической цепочки АТП.

ставок сырья, его предварительной подготовкой, управлением утилизацией отходов, а также техническими требованиями к высокопроизводительным операциям на молекулярном уровне (рассеяние тепла и переработка промежуточных химических продуктов) и преимуществами использования в них эффективного специализированного оборудования.

Эти коммерчески пригодные исходные вещества должны обеспечить содержание всех элементов в конечном продукте и еще кое-что. В связи с материалами, содержащимися в конечном продукте, уже упоминалось об углероде и водороде. Эти элементы могут быть получены из легких углеводородов (в свою очередь извлекаемых из нефти или возобновляемых источников). Кислород и азот мы можем получать из воздуха, а в качестве источников кремния и алюминия использовать недорогие водорастворимые соединения.

Следующая стадия очистки одновременно является шагом в направлении атомарной точности, так как ее цель состоит в исключении загрязнений из жидкого потока исходных материалов. Многоступенчатая система очистки (сама построенная на основе технологии АТП-уровня) позволяет сократить загрязнения до уровня, близкого к нулю. Подобные системы широко используются в инженерных разработках химических технологий. Благодаря их использованию уровни загрязнений на каждом этапе очистки уменьшаются с постоянным множителем, то есть экспоненциально. Полученные в результате очистки исходные материалы состоят из простых молекулярных структур, а, как известно, любая определенная молекулярная структура является атомарно точным объектом. На этой стадии в АТП и начинается атомарная точность.

Для того чтобы сохранить исходную атомарную точность на пути от очищенных исходных материалов до активированных мономеров, следующая стадия заключается в размещении поступающих молекул по местам, предназначенным для них в крупных молекулярных структурах, выступающих в роли механических деталей. Представьте себе конвейерную ленту, на которой находятся множество контейнеров, присоединяющих молекулы, поступающие по трубе в виде чистого раствора в нужные места в строго определенной ориентации.

Начиная с этой точки, сам поток исходного сырья является атомарно точным и состоит из цепочки точ-

но построенных контейнеров, содержащих специфические, особым образом ориентированные молекулярные структуры. Хаотичный беспорядок знакомого мира химии и биологии остался позади. Теперь мы находимся внутри кожуха и можем воспользоваться всеми его преимуществами с точки зрения упрощения проектирования системы, анализа и функционирования. Дальнейшие операции должны осуществляться с атомарной точностью, приводя к определенному достоверному результату на каждом шаге.

Находящиеся на последующих стадиях производственного процесса механизмы направляют молекулы посредством серий столкновений с другими молекулами (некоторые из них наилучшим образом описываются как молекулярные инструменты), тем самым осуществляя управление химическими шагами по подготовке реактивных частей молекулярной структуры, связанных активированных мономеров, способных соединяться друг с другом, образуя ковалентно связанные объекты. При каждом таком шаге сохраняется первоначальная атомарная точность молекул исходного материала.

Данная технология позволяет получать самые разнообразные продукты. Машины, направляющие процесс установления связей между мельчайшими мономерами, содержащими всего один или два атома, способны создавать соединения атомов, подобные формируемым посредством менее контролируемых процессов, и, конечно же, многое другое. Другими словами, они способны создать весь диапазон материалов, применяемых в современных технологиях. Кроме того, машины позволяют придавать материалам самые сложные формы и создавать специфические внутренние структуры, необходимые для производства бесконечного диапазона высокопроизводительных АТ-компонентов.

Насколько производительными могут быть машины по обработке молекул? Согласно законам механического масштабирования, механизмы способны легко направлять потоки молекулярных столкновений со скоростью

до 10 миллионов в секунду. Опыт конструирования позволяет предположить, что механизмы размером в 10 миллионов атомов могут включать в себя все устройства, необходимые для выполнения этих функций. Эти грубые оценки дают нам основание предположить, что описывавшаяся выше типичная машина для обработки молекул способна производить продукты весом равным ее собственной массе примерно за одну секунду.

Обратите внимание, что машина, которой для производства такого же количества продуктов потребовалась бы не одна секунда, а одна минута, оставалась бы в высшей степени производительной; следовательно, эта оценка отнюдь не является решающей. Даже если бы в системе использовалось в 100 раз больше машин, чем это представляется необходимым, она оставалась бы абсолютно продуктивной. Таким образом, использование допусков консервативного конструирования имело бы незначительный эффект.

По мере того как мы движемся к следующим стадиям производственного процесса, от мономеров к функциональным микроблокам, более крупные атомарно точные структуры (теперь состоящие из большого количества атомов) могут объединяться друг с другом, подобно мономерам, образуя множество связей за раз. В процессе сборки еще более крупных блоков (размера примерно в несколько нанометров), вездесущие силы молекулярного притяжения возрастают настолько, что образуют устойчивое соединение между соответствующими друг другу поверхностями без образования химических связей.

Для того чтобы устранить разрыв между небольшими молекулярными фрагментами и АТ-структурами микронного масштаба (микроблоками), достаточно пятидесяти шагов конвергентной сборки из все возрастающего числа мономеров

В блоке размером с половину микрона может заключаться 10 миллиардов атомов, что вполне достаточно для содержания в каждом из них 10 миллионов ком-

нонентов по 1 тысяче атомов. Блоки такого масштаба и сложности являются достаточно крупными для того, чтобы предоставлять компоненты, которые могут использоваться для выполнения самых разных функций, включая, конечно же, структурные компоненты, а также такие устройства, как электрические моторы, компьютерные процессоры и память, датчики и приводы различных типов. Каждое из подобных устройств может быть помещено в сборки.

На линиях по производству специализированных микроблоков могут выпускаться и модульные компоненты для систем, осуществляющих молекулярную очистку, связывание и активацию мономеров, а также других компонентов, собираемых в системы, перемещающие и объединяющие мономеры, а затем и более крупные наноразмерные части. Для построения более крупных машин различных масштабов можно использовать расширенный набор компонентов, включая те из них, которые используются для сборки, структур, моторов, областей контакта и регуляторов для заводского оборудования более крупных размеров, от микрон до метров.

Другими словами значительное разнообразие комплекса линий по выпуску микроблоков позволяет производить все компоненты, необходимые для построения аналогичных производственных линий, а также оборудования для описывавшего выше завода. Подобные предприятия, конечно же, способны выпускать не только автомобили, но и промышленное оборудование.

Замечание об энергетических требованиях

Молекулярный полюс АТФ-процесса потребляет энергию в химическом масштабе просто потому, что операции включают в себя химические превращения молекул. Объем энергии, необходимой для очистки, сравнительно невелик, как и энергетические затраты на управление

механическим движением. Наибольшая потребность в энергии возникает в процессе подготовки и присоединения мономеров, а также на ранних стадиях процесса создания крупных блоков.

На что расходуется эта энергия? Во-первых, есть непреложное требование к входу и выходу процесса, возникающее из термодинамики. Если на входе процесса алюминий содержится в окисленной форме, а на выходе — как металл, за это придется заплатить неснижаемую энергетическую цену, так же как и при традиционной выплавке алюминия. Кроме того, энергетические издержки возникают в процессе связывания реактивных мономеров, поскольку в большинстве случаев условием необратимости изменений становятся существенные затраты химической энергии.

Энергия, которая требуется для осуществления такого рода шагов, сравнима по объему с энергией, высвобождаемой в процессе сгорания топлива; для одного килограмма углерода это составит примерно 30 миллионов джоулей. Это количество энергии равно приблизительно восьми киловатт-часам и обошлось бы, в текущих ценах на электроэнергию, примерно в один доллар. Совокупное потребление энергии от начала и до конца производства может варьироваться в зависимости от состава сырья и материалов, выпускаемой продукции, а также от энергоэффективности различных стадий производственного процесса. Отметим, что потребление электроэнергии относится к числу важнейших инженерных параметров АТП, оценка величины которых вызывает наибольшие затруднения. В следующей главе, обсуждая экономические и экологические издержки, я буду использовать самые консервативные их оценки; действительные же затраты энергии, вероятно, будут более низкими.

Даже в случае высокой эффективности процесса количество выделенного тепла, высвобождаемого на первоначальных молекулярных стадиях обработки, дает все основания для решения о выведении этих мощностей из районов проживания людей. В этом же направ-

лении указывают вопросы логистического обеспечения производства сырьем и материалами, а впоследствии — вторичной переработки отходов.

На ранних стадиях АТП необходимо будет затратить огромные количества энергии для совершения миллионов или миллиардов молекулярных операций в расчете на один микроблок. После уплаты этой энергетической цены на молекулярном уровне путь от стандартных микроблоков к производству индивидуализированных продуктов, выпускаемых в соответствии с заказами потребителей, становится более простым. Для изготовления небольших по размерам продуктов могут использоваться настольные принтеры — компактные, удобные, всегда готовые к работе и простые в эксплуатации. К тому же во многих случаях они находятся в тех местах, где и возникает потребность в продуктах; они всегда под рукой — дома или на рабочем месте.

Вполне приемлемые ответы на текущий момент

Потенциал АТП, его материальный и технологический аспекты в конечном счете определяются законами физики. Насколько много нам известно о нем в данный момент?

На самом детализированном, атомарном уровне ответы включают в себя описания целого ряда универсальных наноразмерных компонентов, которые могут использоваться для выполнения различных АТП-функций на молекулярном уровне. Механические компоненты изучались с помощью стандартных методов молекулярной механики и динамики, а ключевые молекулярные трансформации — с применением квантово-химического метода функционала плотности, использованного с осторожностью.

Имеющиеся у нас ответы относительно АТП-систем и результатов их функционирования описывают различные архитектурные решения, основывающиеся

на исследовательской и системной инженерии, а также анализе уже описывавшихся инженерных параметров новых компонентов. Полученные результаты являются типичными для поисковой инженерии; они предлагают количественные описания систем, базирующиеся на консервативных допущениях, нижних оценках таких потенциальных характеристик АТП-систем, как производительность, эффективность и диапазон возможных применений. Эти ответы описывают совокупность технологий, вполне (и даже более чем вполне) способных обеспечить то, что я называю полным изобилием.

Если мы говорим о технологиях АТП-уровня в целом, то, как это ни удивительно, специфический уровень производительности отдельной АТП-системы не имеет особого значения. Перспективы полного изобилия зависят от достаточно высокой пропускной способности в расчете на единицу массы. Поэтому с точки зрения сегодняшнего дня ответ на вопрос о том, будет ли производительность АТП превосходить показатели современного техпроцесса в 100 тысяч раз или всего лишь в тысячу раз, не имеет практического значения. Более важным представляется вопрос о величине издержек производства. Но, как будет показано в следующей главе, даже самая консервативная оценка помещает их в очень низкий диапазон.

Отметим, что общий характер АТП-систем и их вероятное глобальное влияние не зависят от отдельных процессов или материалов; существует множество способов производства из высококачественных материалов, и почти любая важная компонента продукта может быть реализована множеством различных доступных нам способов, что весьма практично с точки зрения потребителя.

В частности, чрезвычайно привлекательными свойствами обладают углеродные суперматериалы, способы получения которых уже хорошо понятны. Очень удачно, что большая часть надежных методов моделирования молекулярных структур и их динамики была разработана в рамках исследований органических материалов на основе углерода, и экспериментаторы располагают

огромным количеством необходимых данных. Поскольку легкость моделирования и выдающиеся характеристики сопутствовали друг другу, исследования передовых наномеханических систем были сосредоточены на структурах, состоящих преимущественно из углерода. Таким образом, мы уже имеем представление о значительной части материалов, наилучшим образом подходящих для АТП-систем и производимых с их помощью продуктов. Это соответствие перспективных результатов и уже имеющихся у нас знаний открывает окно в некоторые из наиболее привлекательных областей ландшафта потенциальных технологий.

В результате в контексте АТП инженер-исследователь может принимать очень консервативные решения, которые, тем не менее, позволяют создавать системы, значительно более производительные по сравнению с уже имеющимися. Данное преимущество влечет за собой множество следствий.

* * *

От молекулярной обработки до микроблоков и сборки конечных продуктов из деталей, технологии АТП-уровня могут быть созданы только с использованием пока не существующих АТП-инструментов. Мы уже видим пути, ведущие из сегодняшнего дня в будущее, и знаем, что они не будут ни короткими, ни прямыми.

В последующих главах мы сделаем шаг назад, чтобы полностью рассмотреть кривую прогресса в области атомарно точного производства и перспективы дальнейшего движения в направлении создания технологий АТП-уровня. В частности, в приложении II рассматриваются наиболее доступные пути развития, исходной точкой которых являются современные технологии. Но в следующей главе мы продолжим изучение будущего атомарно точного производства и рассмотрим его последствия с точки зрения издержек и выгод для разных продуктов. Это позволит нам получить более исчерпывающую картину полного изобилия и его возможного влияния на человечество.

Продукты полного изобилия

АТОМАРНО-ТОЧНОЕ производство имеет для нас такую же ценность, как и выпускаемая с его применением продукция, а вместе с ней — производительность, экономия и экологическая безопасность. Впрочем, все то же самое справедливо в отношении любой формы производства, идет ли речь об изготовлении каменных орудий труда, стальных машин или кремниевых микросхем. Однако мы уже убедились в том, что свойства атомарно точного производства оказывают более глубокое и сильное воздействие, чем все предшествовавшие ему технологии, аналогичное тому, какой эффект в свое время произвела цифровая информационная революция, но уже с применением к материальному миру. Эта аналогия открывает перед нами перспективы преобразований, которые могут быть осуществлены быстрее и будут иметь более глубокие последствия, чем когда-либо в прошлом. Их движущей силой будут конкурентные преимущества в стоимости, производительности и возможной скорости их распространения и внедрения.

В предыдущей главе мы познакомились с АТП-процессом, в котором из коммерчески доступного сырья производились и соединялись друг с другом мономеры для создания широкого диапазона микроскопических строительных блоков. Этот процесс мог быть завершен либо в компактном цехе финальной сборки или настольном устройстве, функцией которых является сборка из микроблоков конечных продуктов размером в несколько метров. На начальном и наиболее фунда-

ментальном уровне этот процесс основывался на придании направления движению молекул с тем, чтобы они образовали малые атомарно точные структуры, используемые для сборки все более крупных, но в равной степени атомарно точных компонентов. Точный контроль молекулярных реакций как раз является тем, что позволяет АТП-системам осуществлять с атомарной точностью построение структур методом «снизу вверх».

Таким образом, мы готовы задать вопросы о том, что означают эти возможности и какие перспективы они открывают. Мы начнем с самого нижнего уровня и изучим поведение необычных материалов, которым придана необычная форма. Затем мы поднимемся на более высокие уровни компонентов, продуктов, приложений и затрат (в самом широком, но материальном смысле этого слова). Результаты исследования дают нам четкое представление возможных продуктов полного изобилия и предоставляют концептуальную основу для рассмотрения ограничений. На представшей нашим взглядам картине мы увидим и очень недорогое производство (с точки зрения труда, капитала, материалов, энергии и воздействия на природную среду) и его продукты, которые будут принципиально превосходить уже существующие с точки зрения производительности, эффективности и стоимости использования.

Три фундаментальных вопроса

«Что может быть изготовлено?»

«Как оно способно действовать?»

«Сколько это будет стоить в производстве?»

Это фундаментальные вопросы, на которые должно отвечать любое представление о будущем. Ответы, которые даст нам АТП, крутятся вокруг материалов — связанных наноразмерных структур из атомов, из которых создаются компоненты продуктов АТП-уровня. Как мы видели в предыдущей главе, диапазон доступных мате-

риалов будет в высшей степени широким. Он включает в себя полный набор твердых стабильных материалов, которые уже создаются в сегодняшних лабораториях, таких как углеродные нанотрубки, карбид кремния, алмаз, оксиды и нитриды кремния и алюминия. С помощью АТ-производства можно создавать структуры с аналогичной структурой связей в целях дальнейшего применения в качестве компонентов продуктов, диапазон которых варьируется от наномашин до электронных и фотонных устройств и выходит далеко за его пределы.

Исследователи могут узнать много нового, изучая лишь небольшое число новых устройств, не беспокоясь об их стоимости, проценте выхода или масштабах производства. В контексте современных производственных технологий этот вид исследований позволяет получить новые технологические знания, которые впоследствии могут найти (или не найти) практическое применение, поскольку дорога к тому, чтобы производство было востребовано в реальной жизни, всегда является одной из частей проблемы в целом.

Взять хотя бы цифровые устройства. Создававшиеся в лабораториях устройства «уменьшились» до наноразмеров задолго до того, когда аналогичные по величине искусственные объекты превратились в компоненты компьютерных микросхем; как всегда, лабораторные демонстрации компонентов — сначала одного, а затем нескольких, объединенных друг с другом и образующих простую схему, — предшествовали даже прототипам продуктов. Как правило, первые устройства изготавливались одно за другим, в некоторых случаях с использованием рисунков, полученных благодаря сканированию остросфокусированным пучком электронов. Промышленное производство, напротив, требует изготовления в установленное время миллиардов устройств с использованием изображений, полученных посредством проецирования светового пучка. Даже созданные с помощью несовершенных технологических методик эксперимен-

тальные аппараты демонстрируют физические принципы устройств, изготовление которых пока не под силу промышленности.

Точно так же, создаваемые в современных лабораториях устройства: высокоэффективные фотоэлементы, наноразмерные моторы и подшипники, мельчайшие транзисторы — демонстрируют эксплуатационные качества, далеко выходящие за пределы возможностей современной промышленности. И вновь ключевым ограничением является производство.

Предлагая высокую пропускную способность и атомарную точность, АТП изменит правила игры. Благодаря высокой мощности производства, устройства, первоначально изготовленные в лаборатории, дорогие и не приносящие высокого дохода, могут быть недорого и надежно воспроизведены в крупных масштабах и интегрированы в функциональные продукты. Например, углеродные нанотрубки обладают более высокой прочностью, чем любые другие известные материалы, а некоторые их виды являются лучшими проводниками, чем медь. Если бы мы научились легко производить такие нанотрубки и «встраивать» их в другие материалы, они получили бы самое широкое распространение. Решение этой задачи может быть найдено с помощью атомарно точного производства. Во многом аналогичной является ситуация с другими продуктами, например, с наномеханическими устройствами и высокоэффективными фотоэлементами.

При этом дисперсные нанотрубки и наночастицы, в зависимости от их структуры и состава, могут быть токсичны сами по себе. Однако макромасштабные продукты, содержащие в себе наночастицы, не теряют их, независимо от того, изготовлены ли они с атомарной точностью и обладают наноразмерными свойствами или нет. Все то же самое справедливо и для АТП-систем, которые могут быть сконструированы в полном соответствии со строгими токсикологическими стандартами при минимальных затратах.

Таким образом, мы можем рассматривать изготавливаемые в современных лабораториях наилучшие материалы и устройства как отметки на нижней границе результатов использования будущих АТП-продуктов. Результаты лабораторных демонстраций позволяют получить эмпирические факты, которые могут использоваться в исследовательском инженерном анализе потенциальных возможностей применения этих продуктов.

Источники полного изобилия

Многие продукты АТП предложат своим пользователям принципиально более высокие эксплуатационные характеристики, чем те, которые мы наблюдаем сегодня. Тому есть несколько причин, включая улучшенные материалы (благодаря применению усовершенствованных компонентов) и эксплуатационные преимущества, вытекающие непосредственно из применения законов масштабирования к малым устройствам.

Результаты использования многих продуктов зависят от прочности и плотности структурных материалов, из которых они были изготовлены. Использование более прочных и легких материалов позволяет добиться уменьшения массы продукта, поскольку на структурные материалы приходится основная часть массы едва ли не всех видов промышленной продукции. Издержки производства, в свою очередь, тесно связаны со стоимостью сырья и количеством обрабатываемых материалов, следовательно, снижение массы конечного продукта благодаря применению более прочных и легких материалов способно привести к уменьшению издержек его производства.

В грубом приближении установление сильной ковалентной связи между легкими атомами позволяет получить прочные и легкие материалы (весьма удобно, что некоторые из легчайших атомов — углерод, водород, азот и кислород — также образуют очень сильные

связи). Лучшие из этих материалов проявляют себя как довольно хрупкие, если из них делать крупные объекты, и в то же время в форме волокна они становятся жесткими и прочными (сравните хрупкое оконное стекло и лодку, изготовленную из стекловолокна). Производимые с атомарной точностью прочные ковалентные материалы способны наиболее полно реализовать весь свой потенциал, уже продемонстрированный в лабораторных условиях.

Поскольку продукты из более прочных и легких материалов обладают меньшей массой, стоимость сырья и его обработки уменьшается прямо пропорционально разнице в весе. Чтобы количественно оценить эти выгоды, рассмотрим некоторые из новых материалов, которые могут быть изготовлены только из углерода, водорода и кислорода:

1. Легкий материал, более прочный, чем авиационные алюминиевые сплавы, при соотношении плотности 1:100.
2. Легкий материал, более жесткий, чем авиационный алюминий, и превосходящий его по прочности более чем в 100 раз, при соотношении плотности 1:10.
3. Более тяжелый материал, превосходящий по прочности сталь, при соотношении плотности 1:5.

В каждом из этих примеров легкие материалы на основе углерода демонстрируют высокую прочность и жесткость. По прочности материалы (1) и (2) значительно превосходят алюминий, что открывает возможность их применения для создания аэрокосмических аппаратов, многократно превосходящих по своим характеристикам существующие ныне, а также для создания существенно улучшенных автомобилей и велосипедов. Материал (3) по своим свойствам сравним с хорошо известными ныне структурными металлами (хотя по своей жесткости сравним с древесиной дуба), несильно пре-

восходя их по прочности и легкости. В то же время, подобно материалу (1), в расчете на единицу объема он содержит незначительное количество атомарно точных компонент. Материал (3) практически аналогичен материалу (1), но его поры заполнены гидрогелем и более 90% веса приходится на воду.

Экстраординарные легкость и прочность подобных материалов имеют далеко идущие последствия. Структурные материалы используются повсеместно. Не только мосты и самолеты, но и детали машин, столы, стены, печатные платы и ткани — все они состоят преимущественно из структурных материалов. Лучшие материалы позволяют создавать одновременно более прочные и более легкие конструкции. Во многих случаях эти их свойства могут использоваться в интересах повышения безопасности и энергоэффективности. Что еще лучше, новые материалы устойчивы к коррозии, усталости, текучести и разрушению. К тому же они могут быть такими же прозрачными, как стекло.

Перспектива сокращения массы структурных материалов более чем на 80% сулит настоящую революцию в производительности и эффективности не только в воздушно-космических технологиях, но и в большинстве остальных сфер инженерной деятельности. Даже если оставить в стороне производительность, более легкие продукты означают сокращение потребления материалов, что оказывает положительное воздействие на величину издержек производства. Но источником всех этих преимуществ является нечто большее, чем просто доступ к более прочным и легким материалам. Атомарно точное производство открывает нам широчайшие перспективы.

Характеристики специальных материалов

Методы, основывающиеся на АТП, открывают новые горизонты в сфере синтеза различных материалов. Последние характеризуются специфическим атомным строением, создать которое с помощью современного

оборудования никак невозможно, поскольку оно не позволяет обеспечить должный контроль. Ученые и инженеры уже умеют преобразовывать простые химические исходные вещества в удивительно разнообразные материалы с разной атомарной структурой. Но эта их способность основана не на придании нужных направлений перемещениям атомов и молекул, а на случайно образующихся связях.

Управление молекулярными столкновениями позволяет в огромной степени расширить диапазон доступных материалов. Самые большие сюрпризы, вероятно, принесет не усовершенствование механических свойств материалов, но их улучшенные или новые электронные свойства. Лабораторные опыты позволяют уже сейчас получить представление о некоторых возможных направлениях практического использования электронных материалов и устройств; другие возможности оцениваются по результатам достоверных расчетов, остальные же являются исключительно умозрительными и лежат вне пределов консервативной исследовательской инженерии. Они включают в себя целый ряд возможных практических приложений феноменов, с которыми можно столкнуться исключительно в физических лабораториях (или прочитать о них в теоретических разделах научных журналов). Речь идет, в частности, о связанных спиновых системах, которые могут прийти на смену транзисторам в качестве основы цифровой логики; о других спиновых системах, открывающих возможность параллельных топологических квантовых вычислений; о новых классах высокотемпературных сверхпроводников; и о множестве явлений, связанных с коррелированными электронами, которые, как ожидается, будут происходить в будущих атомарно точных структурах.

С точки зрения достижения полного изобилия два примера играют важную роль: усовершенствованные фотоэлектронные элементы, позволяющие преобразовывать солнечную энергию, и углеродные нанотрубки,

толщина стенок которых равна одному атому, при этом они способны превзойти и вытеснить в качестве проводника электричества медь, запасы которой ограничены.

Производительность через масштабирование

Вкупе с атомарной точностью дополнительные преимущества способен предложить и размер сам по себе. Мы уже видели, что масштабирование приводит к значительному увеличению объема выработки. Тот же самый принцип может использоваться и в случае, когда продуктом является энергия. Высокая выработка электронов или молекул топлива позволяет добиться увеличения удельной мощности в миллион и более раз.

В современных электромоторах электрическая энергия преобразуется в механическую благодаря использованию электромагнитов. Но, как упоминалось выше, последние не подчиняются механическим правилам масштабирования. Их законы масштабирования препятствуют созданию наноразмерных двигателей, которые работали бы с использованием магнитных полей. В то же время возможно создание электромоторов на электрических, а не магнитных полях, когда поле направляет электрический ток подобно тому, как под воздействием силы тяжести поток воды устремляется вниз на водяное колесо. Наиболее эффективными для такого типа являются моторы небольшого размера. В этом масштабе напряжение в несколько вольт способно создать очень сильное электрическое поле, а зарядовый ток в расчете на единицу массы становится огромным. На основе подобных устройств могут создаваться высокоэффективные системы, способные вырабатывать киловатты механической энергии в масштабах площади в один квадратный сантиметр и толщины в один микрон. (Возможно объединение выходного момента большого количества моторов, что позволило бы обеспечить вращение значительного по размерам вала, но потребность в охлаждении ограничивает удельную

мощность на системном уровне). По показателю удельной мощности это дает огромное преимущество перед лучшими современными электромагнитными двигателями. Устройства такого же типа (полностью идентичные, но запущенные реверсивно) способны выполнять функции генераторов электрической энергии. И в первом, и во втором случае они демонстрируют едва ли не совершенное преобразование энергии, так как потери связанные с сопротивлением и трением не превышают 0,1%.

В топливных элементах происходит преобразование химической энергии в электрическую. Их эффективность зависит, прежде всего, от взаимодействий молекул с наноразмерными структурами. Сконструированные с высокой точностью электрокаталитические механизмы и системы переноса ионов способствуют резкому увеличению эффективности, в то время как законы механического масштабирования позволяют создавать системы с наноразмерными компонентами, предназначенные для преобразования химической энергии в электрическую, с высокой удельной мощностью.

Кроме того, наномеханические системы способны к прямому и эффективному обратимому преобразованию химической и механической энергии; что требует серии последовательных шагов снижения молекулярной потенциальной энергии, тесно связанных с механическими перемещениями. И вновь законы масштабирования открывают возможность получения высочайшей удельной мощности, сравнимой с наноразмерными электродвигателями. Интегрированная система, в которой сочетаются возможности преобразования химической энергии с наноразмерными двигателями и генераторами, может служить как устройство с нулевым выбросом, функционирующее в качестве перезаряжаемой батареи. Энергоемкость последней сравнима по величине с энергией, содержащейся в резервуаре с бензином. Подобные системы могли бы использоваться для обеспечения энергией транспортных средств и сглаживания

флуктуаций между дневным и ночным циклами в производстве солнечной энергии (и даже между сезонами).

Примечательно, что законы механического масштабирования обладают мощностью, достаточной для того, чтобы наномеханические компьютеры могли конкурировать с электронными устройствами (по крайней мере, современными). Их тактовые частоты могут достичь гигагерцевого диапазона, а потребление энергии в расчете на ядро упадет до долей микроватта.

Практическая сторона дела

В соответствии с высказанным выше предположением, АТП-системы позволят добиться огромных достижений на самом базовом уровне инженерии, материалов и устройств. Давайте оставим в стороне все головоломки материалов, эффективности и производительности и попытаемся ответить на вопрос о том, какое воздействие эти будущие достижения могут оказать на продукты, используемые нами в обычной жизни?

Предположим, вы находитесь на рабочем месте, дома или на улице. Оглянитесь вокруг. С точки зрения возможных усовершенствований структуры, управления и приведения в движение той или иной переработке может быть подвергнуто почти все, что вас окружает в данный момент — бытовая техника и автомобили, видеозэкраны и лампы и многое-многое другое. Везде, где отводится важное место таким показателям, как прочность, мощность, энергоэффективность, вычислительная мощность и вес, открывается пространство для постепенных усовершенствований или резкого рывка вперед. Более легкие и эффективные продукты естественным образом ведут к сбережению ресурсов, поскольку последние меньше расходуются в производстве, а их использование приносит более высокие результаты. Распространение недорогих высокопроизводительных тепловых насосов и изоляционных материалов позво-

лит значительно сократить даже затраты энергии, потребляемой для отопления и охлаждения жилья.

В наши дни недорогие продукты нередко оказываются дешевым недолговечным мусором. Замена их прочными продуктами длительного пользования, такими как пуговицы, всегда остающимися там, где они были пришиты, или «вечными» деталями — совершенными по всем показателям, но недорогими — была бы подобна свежему ветерку в жаркий летний день.

В лабораторных условиях современные фотоэлектрические преобразователи, используемые для получения электрической энергии из солнечного света, демонстрируют эффективность на уровне более 40%. Но для их производства необходимы такие редкие на Земле химические элементы, как галлий и иридий. Сравнимые результаты обещают фотовольтаические батареи, изготовленные из материалов, в изобилии имеющих на нашей планете (например, железа и серы из пиритов), но только в том случае, если они будут представлять собой многослойные тонкие пленки, имеющие близкую к совершенной кристаллическую структуру. При этом между пленками обязательно должны присутствовать дополнительные слои, обеспечивающие электрические контакты, защищающие от кислорода и влаги, а также антибликовые покрытия. Пока что трудности, связанные с производством подобных устройств, остаются непреодолимыми.

АТП способно решить эти проблемы, так как оно открывает возможность экономичного производства атомарно точных структур, состоящих из тонких пленок, созданных из самых обычных материалов, содержащихся в земле в количестве десятков грамм на квадратный метр. Фотоэлементы становятся конкурентоспособным источником энергии уже в наши дни, но их использование ограничивается производственными издержками, а также, в случае их использования в качестве основного источника энергии, высокими затратами на аккумулярование энергии для использования в ночное время

и в облачные дни. Существенное повышение эффективности преобразования солнечной энергии, резкое сокращение издержек и эффективные недорогие способы преобразования электрической энергии в топливо и обратно — в своей совокупности все эти факторы определяют потенциал изменения энергетической экономики в целом, а также возможности снижения стоимости электроэнергии и топлива в процесс движения к нулевым выбросам углекислого газа в атмосферу Земли.

Современные вычислительные системы уже немыслимы без наноразмерных устройств. Тем не менее внизу еще остается довольно много места¹.

Использование соответствующих посттранзисторных устройств позволит уменьшить линейный масштаб еще в 10 раз, по сравнению с современными устройствами, что означает повышение плотности упаковки устройств в 1000 раз (в данном случае следует использовать пространственную плотность, так как АТП-системы могут создаваться в трех измерениях). Добавим к этому уменьшению в размерах факторы приближения эффективности устройств к термодинамическим пределам вычислений, а также примем во внимание перспективы создания ядер компьютерного процессора микронных размеров, повышения плотности хранения памяти в диапазоне миллиард гигабайт в расчете на кубический сантиметр, и мы получим миллиардно-ядерные компьютерные системы, которые могут размещаться в портативных компьютерах с воздушным охлаждением.

Живые системы основываются на атомарно точных молекулярных компонентах. Их использование означает, что медики-исследователи получают оборудование и инструменты АТП-уровня для изучения биоло-

1. Автор цитирует Р. Фейнмана, выступившего в 1959 г. с лекцией под названием «Там, внизу, ещё очень много свободного места», с которой некоторые историки науки связывают начало нанотехнологий, хотя, как мы помним, термин вошел в употребление только в 1980-х гг. — *Прим. науч. ред.*

гических систем на беспрецедентно подробном уровне и последующего вмешательства в их функционирование с невиданным ранее уровнем контроля. Ключом к этому будет быстрый и тщательный сбор данных и средств, необходимых для ускоренного создания наноразмерных устройств, в которых исследователи уже испытывают потребность и ведут разработку. Например, к ним относятся наноразмерная упаковка с биологически совместимыми активными поверхностями, способными связывать клетки определенных типов, что позволит, стимулируя эндо- и транцитозы, достигать намеченных внутриклеточных целей без необходимости преодоления гематоэнцефалического барьера, а затем осуществлять вмешательство посредством доставки в них, например, РНК и регуляторных молекул, модифицирующих метаболизм и работу гена. (Моделью для подобных устройств служат экзосомы, изучение и применение которых способствовало бурному развитию нанобиомедицины.) В данном случае важнейшей и вполне достижимой целью является разрушение зарождающихся и устойчивых к воздействиям лекарств болезнетворных микроорганизмов.

Источники резкого сокращения издержек

Какими могли бы быть последствия крупномасштабного перехода от традиционного производства к АТП? Главными материальными издержками производства, основывающегося на АТП, будут затраты, связанные с энергией и сырьем, которые могут быть уменьшены, в то время как другие затраты — резко сокращены.

Мы живем во время, когда растущий спрос на ресурсы и ограниченность доступа к ним обуславливают повышенное внимание к сокращению потребления сырья, время, когда ограниченность энергетических ресурсов и рост выбросов углекислого газа вызывают все большую

тревогу относительно поставок энергии и спроса. Одновременно с этим стремление к снижению числа людей, проживающих за чертой бедности, подталкивают вперед промышленное развитие как с экономической, так и с моральной точек зрения, несмотря на то, что существующие технологические ограничения ставят под сомнение достижение этой цели. Способно ли АТП помочь справиться с этими вызовами?

В конечном итоге издержки определяют различия между предметами роскоши, общераспространенными промышленными товарами и материальными благами, малодоступными представителям беднейших сельских общин. Стоимость определяет разницу между изобилием электрической энергии, полученной посредством преобразования солнечного света, и экономикой, долгосрочное развитие которой замкнуто на использовании угля. Изучение перспектив АТП в свете издержек позволяет сделать выводы, выходящие за пределы узких экономических интересов.

Изучение материальных издержек

В рассматриваемой нами области инженерные методы имеют ограниченное применение. Они используются только в отношении того, что может быть названо «материальными издержками», то есть затратами, связанными с входящими ресурсами (материалами, энергией, трудом и землей), а также с трудом поддающимся количественным оценкам нежелательным побочным эффектам, таким как несчастные случаи и загрязнение окружающей среды. В учете, построенном по этим принципам, не принимаются во внимание издержки, которые обязательно будут отражены в бухгалтерских реестрах производителя, поскольку в общем материальном смысле они не являются затратами. Имеются в виду перечисление средств для осуществления лицензионных платежей или, например, налоги (с общественной точки зрения денежные перечисления не предполагают

потребления ресурсов). Кроме того, в рассматриваемом нами учете не принимаются во внимание и реальные издержки (прежде всего, затраты на рабочую силу), вызванные не материальными требованиями, но организационными потребностями или общественным выбором, а также затраты на менеджмент, маркетинг, регулятивный надзор, судебные разбирательства и тому подобное. И наконец, при принятии этого узкого, сугубо материального понимания издержек не учитываются внешние факторы, такие как издержки, понесенные в силу перемещений конкурентов (а также их поставщиков и рабочих), и политически обусловленные затраты, вызванные потенциально возможными нарушениями общественного порядка и международного мироустройства.

Мы вернемся к рассмотрению этих трудных вопросов в главе 16, но первый шаг в направлении их более широкого понимания будет сделан здесь. Мы сосредоточим внимание на рассмотрении следующего слоя материального анализа, возникающего в случае привнесения вневременного потенциала технологий АТП-уровня в тот материальный и экономический мир, каким мы его знаем сегодня. Этот шаг включает в себя анализ возможных изменений материальных издержек, обусловленных переменами в требованиях к производству и объему выпуска, а также к продуктам и результатам их использования.

Сырьевые и материальные издержки

Внедрение АТП способно повлечь за собой изменения в структуре глобального спроса на ресурсы, поскольку в этом случае производство будет предъявлять спрос на иные сырье и материалы. В частности, дефицитные сегодня материалы потеряют значительную часть своей ценности, поскольку аналогичные функциональные требования будут выполняться при помощи имеющихся в изобилии на Земле веществ². При этом и в произ-

2. Помимо углерода, водорода, азота и кислорода к числу полезных

водстве, и в эксплуатации будут достигнуты значительные результаты.

Что касается более редких элементов, таких как цинк, олово и свинец (используемых, например, при производстве припоя, дешевых сплавов и антикоррозийных покрытий для металлоизделий), то они, скорее всего, будут пользоваться ограниченным спросом. В мире бесшовных и не поддающихся коррозии продуктов, отличающихся дешевизной и высокими эксплуатационными результатами, не остается места паяным соединениям, цинковым формам или луженым банкам. Некоторые другие редкие металлы (включая марганец, хром, никель и кобальт) будут использоваться преимущественно для изготовления различных стальных сплавов. Однако сокращение потребления стали может привести к устареванию и этих материалов.

Как эти различия повлияют на стоимость исходного сырья и материалов? Во-первых, наиболее полезные элементы сравнительно недороги. В форме дешевых составных образований (например, не кремния, а диоксида кремния или кварца), углерод, азот, водород, алюминий и кремний могут приобретаться по цене порядка одного доллара за килограмм.

Для того чтобы оценить перспективы изменений стоимости сырья и материалов, необходимо принять во внимание и сокращение в цене за килограмм исходных ресурсов, и уменьшение потребности в них (в килограммах). Например, замена стали алюминием и пластиковыми конструкциями из более прочных материалов позволила бы добиться уменьшения общей массы изготовленной из них продукции, по меньшей мере, в 10 раз. Учет вспомогательных материалов в большинстве случаев не окажет сколько-нибудь значительного влияния на результат (во многих случаях он даже улучшится).

и широко доступных элементов относятся кремний и алюминий, в изобилии присутствующие в земной коре.

В сухом остатке. Большинство сырья и материалов, которые будут использоваться для выпуска АТП-продуктов, широко распространены и недороги (их стоимость не превышает одного доллара за килограмм). С учетом сокращения веса продукции это означает, что стоимость сырья снижается примерно до десяти центов за килограмм (стоимость «эффективного килограмма»).

Энергетические издержки

В будущем затраты, связанные с очисткой исходного сырья и химическими преобразованиями на ранних стадиях процесса производства (направленных, например, на преобразование кварца в кремний), вероятно, немного уменьшатся по сравнению с текущими издержками. Принимая во внимание затраты энергии на последующих стадиях и увеличение расхода энергии при осуществлении высоконадежных стадий молекулярного производства, представляется разумным принять затраты энергии примерно в один доллар в расчете на килограмм в текущих ценах на электроэнергию (без учета сокращения веса производимой продукции).

В сухом остатке. С учетом более высоких результатов производства затраты на энергию, сырье и материалы будут примерно равными; это означает, что энергетические издержки добавляют к стоимости эффективного килограмма продукции около десяти центов.

Стоимость земли

Естественный масштаб производственного предприятия сопоставим с размерами самых крупных продуктов, его размеры кратны их длине и ширине. Системы размером с письменный стол способны будут выпускать настольные компьютеры, а системы размером с гараж — автомобили.

В сухом остатке. По сравнению с современными промышленными системами, производство на основе АТП-технологий будет занимать значительно меньшие по размерам земельные участки.

*Стоимость труда
непосредственно занятых работников*

АТП-системы преобразуют сырье и материалы в продукты «самостоятельно», не допуская вмешательства человеческих рук, точно так же, как, например, цифровые вычисления не предполагают участия людей, перебрасывающих костяшки на счетах или записывающих числа на бумаге.

В сухом остатке. Поскольку само по себе производство не предполагает участия в нем людей, все затраты на оплату труда относятся лишь к сопутствующим внешним процессам.

*Издержки, связанные с отходами производства
и загрязнением природной среды*

Сама природа атомарно точной обработки открывает возможность контроля над структурами и основных, и побочных продуктов производства. Поскольку производство не предполагает использования процесса горения, какие-либо основания для синтеза или эмиссии CO_2 (по крайней мере, в крупных объемах) практически отсутствуют. Точно так же в условиях контроля над точным процессом обработки отсутствуют основания и для выбросов отходов производства в воду или в воздух. Ядовитые примеси, извлеченные из сырья и материалов, могут обрабатываться и возвращаться в производство в малоопасных формах (например, в виде гранул минералов естественного происхождения, остающихся устойчивыми в геологическом масштабе времени).

Существенным побочным продуктом является тепло, которое выделяется в значительном количестве (пропорционально массе) на ранних стадиях производственного процесса, в масштабе химических реакций. Но его отрицательное влияние практически устраняется эффективным воздушным охлаждением.

В сухом остатке. Передовым производственным системам совсем не обязательно должны сопутствовать ядовитые выбросы, парниковые газы или токсичные отходы. Они могут с незначительными затратами полностью соответствовать политике нулевых выбросов.

Риски аварий на производстве

Архитектура процесса (см. главу 10) оставляет совсем мало места для аварий на производстве. Если на предприятии не предусмотрено пространство для персонала, ущерб здоровью рабочих никак не возможен. Предприятие, на котором не создаются значительные запасы ядовитых, легковоспламеняющихся или взрывоопасных веществ, не создает обычных рисков для живущих в его окрестностях людей. Представляется, что существенную угрозу несут с собой только складские запасы сырья и материалов, но у поставщиков нет никаких оснований доставлять их в небезопасных формах. Например, использование углеводов или других органических жидкостей в качестве производственного сырья дает предприятию целый ряд преимуществ. Но нет никаких разумных причин для того, чтобы поставлять их в плохой таре или ненадежной упаковке (для поставок углеводов вполне подошла бы такая жидкость, как минеральное масло).

В сухом остатке. Производственные системы, основывающиеся на АТП-технологиях, естественным образом будут более безопасными, чем современные промышленные предприятия, и легко будут соответствовать самым строгим требованиям безопасности.

Стоимость основного капитала

Оценка материальной стоимости основного капитала базируется на двух основных характеристиках АТП — высокой производительности и широкой номенклатуре изделий.

Рассмотрим от начала и до конца полную цепочку АТП, от обработки сырья и материалов до выпуска конечной продукции. Приведенная выше оценка производительности показывает, что рассматриваемые механизмы способны производить продукцию, масса которой примерно равна совокупной общей массе оборудования, причем в течение часов, а не дней и лет (если не учитывать временные задержки, вызванные транспортировкой). Далее, как и в случае с современными промышленными системами (охватывающими весь мир, рассматриваемый *in toto*), номенклатура доступных продуктов включает в себя всю линейку оборудования, необходимого для построения цепочки от начала и до окончания процесса производства. Если бы затраты на создание подобной высокопроизводительной производственной системы амортизировались в течение 1000 дней (что довольно быстро, по современным стандартам бухгалтерского учета), то стоимость основного капитала в расчете на килограмм продукции была бы меньше, чем одна тысячная затрат в расчете на килограмм самой системы АТП. Поскольку машины сами по себе были бы продуктами АТП, то амортизированные материальные издержки этого основного оборудования были бы действительно очень низкими — согласно сделанным выше оценкам, они составляли бы доли цента в расчете на килограмм продукта. (Заметим, что в данном случае речь идет о предельных издержках, но другие издержки, в частности затраты на R&D, могут быть аналогичным образом амортизированы по огромной продуктовой базе за короткое время).

В сухом остатке. В материальном смысле издержки, связанные с приобретением основного оборудования, увеличивают стоимость продукта на практически незаметную величину. Нет никаких сомнений, что материальная стоимость капитала в расчете на единицу выпуска оставалась бы вполне доступной даже в том случае, если бы оборудование использовалось на 1% мощности (аналогично тому, как домашняя стиральная машина используется всего несколько часов в неделю).

Суммирование издержек

Суммируя два основных вида издержек, упоминавшихся выше — затраты на сырье и материалы и энергию, и округляя небольшие величины издержек до достаточно большой погрешности, мы определяем типичные материальные издержки в размере 20 центов на эффективный, с поправкой на структурную массу, килограмм. Затраты на материалы и энергию оцениваются по самым консервативным меркам как с точки зрения единичных издержек, так и требований к входящим ресурсам (поскольку они не учитывают перспективы сокращения издержек входящих ресурсов в результате внедрения АТП).

За пределами материальных затрат: модель цифрового средства информации

Обычно в издержки производства включают не только прямые, материальные, затраты, но и расходы, связанные с конструированием, менеджментом, финансами, маркетингом, продажами, службой обеспечения, юридическими услугами и тому подобными видами деятельности. Учитывая постпродажный цикл в соответствии с комплексной концепцией, в издержки в числе прочих затрат должны включаться расходы на дистрибуцию, а также установку и техническую поддержку пользователей продукции.

Переход к производству, основанному на АТП, скорее всего, приведет к увеличению этих затрат, выраженных в процентах к общим издержкам. Одновременно произойдет сокращение общих издержек. Наилучший пример — модель, используемая в наши дни в цифровых средствах информации и в производстве программного обеспечения. АТП может рассматриваться как цифровое средство информации, подобное цифровым звукам, изображениям или печати. Различия между этими цифровыми средствами информации заключаются в размерах необходимых ресурсов в расчете на единицу по-

требления. Ресурсные затраты могут быть ничтожными, если речь идет об энергии, необходимой для воспроизведения песни или отображении картинки, и небольшими, когда для того, чтобы напечатать текст, требуется несколько листов бумаги и чернила для принтера. Но они могут быть весьма значительными, если мы говорим о материалах и энергии, используемых для выпуска АТП-продукта, даже если издержки измеряются десятками центов в расчете на эффективный килограмм.

Как и в случае с современными системами цифровых средств информации, основное различие между одним продуктом и следующим за ним заключается в цифровом описании, подобном текстовому, аудио- или видео-файлу. Но в случае АТП имеет место описание строения материи, а не персонажей, звуков или пикселей. Следовательно, материальные издержки дистрибуции нового продукта (или, скорее, информации о новых его свойствах) равны издержкам передачи файла.

Соответственно, затраты на менеджмент, маркетинг, регулятивный надзор, судебные разбирательства и тому подобное, исчисляемые на предельной, в расчете на единицу, основе, эффективно равны нулю. Таким образом, современные цифровые медиа и АТП-системы имеют во многом схожие структуры издержек. Стоимость производства первого экземпляра продукта подобна издержкам создания нового изображения, видеозаписи или программного приложения, в то время как затраты на дистрибуцию или доставку могут быть очень низкими и децентрализованными. К тому же они возникают только по запросу потребителя. Как и в случае с современной печатью книг на заказ, складские запасы готовой продукции отсутствуют. Покупатели книг получают возможность выбора не из ассортимента изданий, имеющегося на складе у продавца, но из каталога потенциально ничем не ограниченного библиотечного хранилища.

Учитывая стоимость создания и лицензионные отчисления (авторские права, патенты), в некоторых слу-

чаях, с точки зрения покупателя, цифровые продукты оказываются очень дорогими. По тем же самым причинам единичные расходы на покупку АТП-продуктов могут значительно превышать издержки их производства. Тем не менее многие художники, фотографы и разработчики программного обеспечения распространяют свои произведения бесплатно. Данная тенденция сохраняется и в зарождающемся сообществе 3D-печати. Модель общедоступных продуктов может быть применена и в отношении АТП.

Производительность, издержки и необходимость изменений

В нашем путешествии идей эта глава обозначает своего рода порог на пути от физических принципов к перспективам, последствия которых будут иметь значение для всего человечества. Достигнув «контрольного пункта», обозначающего идею вневременного ландшафта технологического потенциала, мы миновали такие «достопримечательности», как физика, инженерное дело и методология исследовательской инженерии, и добрались до места, в котором частично просматривается область атомарно точного производства с его возможными продуктами.

Отсюда наше путешествие продолжается в сторону потенциальных возможностей применения производства АТП-уровня, которое станет движущий силой изменений в отдельных направлениях. Эти перемены приведут не к тем или иным предсказуемым результатам, но к изменению баланса сил, движущих действиями людей и оказывающих влияние на их исходы. Например, если в продукте сочетаются низкая стоимость и высокие результаты эксплуатации, то он, скорее всего, будет вытеснять конкурирующие товары. Если технология предлагает военные преимущества, потенциально имеющие решающее значение, конкуренция выразится в усили-

ях, направленных на ограничение ее распространения. Если технология может быть применена для решения проблемы с меньшими затратами и без особой необходимости в переговорах, возникнет более сильная тенденция к эффективным действиям.

Мы видели, что АТП обещает снижение стоимости и более высокие результаты использования в отношении широкого спектра промышленных товаров и процессов. Следствием этого становятся потенциально решающие военные преимущества, что потребует определенных ответных действий со стороны других государств, включая глубокую переоценку национальных интересов.

Современная промышленная цивилизация привела к тому, что развитие человечества происходит в направлении, ведущем к возникновению коллизии с ограниченностью ресурсов Земли и устойчивостью ее климата. Технологии, основывающиеся на АТП, способны развернуть движение нашей цивилизации, открывая возможность эффективных подходов к проблемам, которые во всех иных случаях оставались бы неразрешимыми.

В последующих главах я вернусь к изучению этих вопросов. Сначала мы рассмотрим технологические возможности, которые будут движущей силой изменений, а затем — некоторые проблемы, которые наиболее вероятно возникнут в качестве реакции. Изучаемые нами проблемы глубоко укоренены в историческом контексте, сформировавшем текущую ситуацию и перспективы ее развития. Эта история прогресса, перспектив и конфликта и подготовит сцену, на которой развернется следующее действие.

Часть V

Траектория развития
технологии



Современные технологии атомарной точности

РАЗВИТИЕ используемых человечеством технологий в конечном счете привело нас к созданию и использованию машин. Но начиналось оно с целенаправленного применения дерева, шкур животных, камней и рук, то есть с биополимеров (целлюлозы, коллагена) и более прочных, неорганических материалов, из которых создавались ручные орудия труда. По схожему пути происходит и развитие атомарно точных нанотехнологий. Отличие заключается в АТ-контроле над биополимерами и неорганическими материалами, когда сборка осуществляется не с помощью рук, а с использованием броуновского движения.

Траектория развития вновь приводит нас к машинам для изготовления вещей. Точно так же, как молоты и щипцы первых кузнецов отличаются от автоматизированных машин и механизмов на современной часовой заводе, применяемые в наши дни АТП-системы имеют мало общего с теми, которые получают широкое распространение в будущем. Точно так же, как развитие технологии кузнечного дела привело к машинам наших дней, современные атомарно точные молекулярные технологии приведут нас к наномашинам завтрашнего дня.

В каком месте пути, по которому движется атомарно точная фабрикация в направлении создания АТП-технологий, мы находимся? Как ни удивительно, мы прошли по нему значительно дальше, чем полагает большая часть публики. Для того чтобы оценить перспективы ра-

дикального обновления, нам необходимо понять природу современных быстро прогрессирующих технологий атомарно точной сборки. Они не слишком похожи на АТП, но прокладывают к нему дорогу.

Довольно часто идея атомарно точной сборки рассматривается как футуристическая, хотя такое ее восприятие страшно далеко от реальности. АТ-производство стало исходным пунктом развития молекулярных наук. Ученые получили первое представление о точном расположении атомов и связей не из изучения молекул, а из процесса обучения построению этих структур. Атомарно точная сборка началась более века назад, и с тех пор она прошла очень длинный путь.

Однако если говорить о продвижении к АТП, прогресс, местами решающий, во многом остался незамеченным. Если бы не историческая случайность современные технологии атомарно точной сборки пользовались бы известностью «истинных брильянтов» в короне современной нанотехнологии, повсеместно превозносились, получали бы достойное финансирование и были бы значительно лучше представлены в новостях. Но к 1986 г. все действительно важные области нанотехнологий уже существовали на протяжении длительного времени и были хорошо известны под другими различными названиями. Вследствие этого они оказались лишенными футуристического глянца и рекламной шумихи, сопровождавших запуск и финансирование нанотехнологических программ совсем другого типа.

Короче говоря, огромный прогресс в атомарно точной сборке оказался вне сферы действия «радара» общественного внимания. Люди искали прогресса не там, где он происходил, и приходили к выводу о торможении развития нанотехнологий. Знание истории идей и политики помогает объяснить разрыв, образовавшийся между первоначальным видением нанотехнологии, основывающейся на АТП, и современным ее восприятием, задачами, упущениями и проблемами. Следующая глава посвящена тому, что собственно произошло и почему.

Между тем исследователи, занятые в наиболее релевантных областях — современные мастера атомарно точной фабрикации, не слишком склонны в силу культурных резонов или не имеют непосредственных причин для того, чтобы изучать скрытый потенциал своей деятельности с позиций системной инженерии. Поскольку эти области сформировались задолго до появления концепции АТП, исследователи были полностью поглощены решением других задач, связанных, прежде всего, с биологией, медициной, материаловедением и химией малых молекул.

Давайте поближе познакомимся с этими областями исследований и попытаемся ответить на вопрос о том, каким образом достижения в атомарно точной сборке способствуют прогрессу в инженерии молекулярных систем, представляющих собой основу для технологий, которые позволят распахнуть двери, ведущие к АТП? К числу важнейших областей исследований относятся, в частности, «органический синтез», «белковая инженерия» и «вычислительная химия».

АТ-инженерия и химия

Химики создают соединения/молекулы, превращающиеся для нас в объекты созерцания. Тем самым мы приближаемся к искусству, к художникам. Но для того, чтобы не переборщить с романтикой (что может быть интересно только тому, кто никогда не пытался заработать искусством себе на хлеб), центральность направляет нас в инженерную сторону.

Роальд Хоффман

В наши дни химия известна не столько атомарной точностью операций, сколько сопровождающими их очень неприятными запахами (зловонием, если честно). В средней школе химию чаще всего представляют как науку, в которой используются пробирки, защитные очки, стехиометрия реакций, периодическая таб-

лица элементов, молярные доли веществ, кислоты и щелочи, растворители и тому подобное. Обучение химии происходит таким образом, что на уроках почти ничего не говорится о структуре молекул, за исключением их состава и типов связей. Да, учителя имеют возможность расширить учебную программу, но традиционные темы никак не предполагают, что химия включает в себя и атомарно точный синтез макромолекул, то есть наноразмерных объектов с определенными формой и функциями. Поскольку курс химии, выходящий за пределы ознакомительного, изучают небольшое количество будущих химиков, большинство людей изначально недооценивают ее возможности.

В течение более сотни лет специалисты по органической химии оттачивали свои навыки и умения в АТ-сборке по двум основным направлениям: в синтезе молекул, идентичных обнаруженным в природе (уже существующих продуктов биологических машин), а также молекул, в высшей степени не похожих на естественные образования, характеризующихся новыми комбинациями атомов и связей. В некоторых случаях химикам-органикам удавалось создавать молекулы, в существование которых было трудно поверить — с неправильным расположением связей или конфигураций с искаженными нестабильностями.

Как следует из высказывания Роальда Хоффмана, иногда химики-органики воспринимают себя как специалистов, в равной степени принадлежащих и науке, и инженерному делу (интуиция и чувство прекрасного, которых требует эта область, безусловно, приближают ее к искусству).

Наша модель различий между научными изысканиями и инженерным проектированием поможет нам пролить свет на концептуальные трения, возникающие в органической химии. Несмотря на то, что химики-органики конструируют и синтезируют материальные объекты, в большинстве случаев они относятся к области своей деятельности как к науке. Но эта область деятель-

ности представляет собой нечто большее. С точки зрения различий, проводившихся в главе 8, более близким к действительности было бы описание органической химии как области, в которой происходит смешение наукоемкой инженерии и инженероемкой науки. Восприятие органической химии как науки означает, что ее представители проявляют склонность к сосредоточению внимания на упоминавшихся нами выше направлениях — на естественных молекулах (загадках, которые задает нам природа) и на искусственных молекулах, раздвигающих границы, устанавливаемые физическими пределами. Оттачивая свои методы, химики-органики одновременно создали практичные надежные инструменты, в отношении которых может использоваться инженерный подход. Широкие химические исследования как раз и служат достижению этой цели.

В опубликованной в 2001 г. своей знаменитой статье Барри Шарплесс призывал химиков изменить основное направление приложения усилий, обосновывая необходимость перехода от воспроизводства естественных структур и использования наиболее надежных, инструментов («нескольких хороших реакций»), позволявших избегать трудных шагов и необычных молекул, к сосредоточению на проблемах, определяемых молекулярной функцией. В общем, нельзя сказать, чтобы химики игнорировали этот путь, но Шарплесс первым четко сформулировал эту цель с точки зрения ее практического содержания, предложил критерии и метрики, а также привел уместные примеры¹. В сущности, ученый использует инженерный подход: сначала определяется основная цель, после чего осуществляется поиск струк-

1. Б. Шарплесс назвал этот подход «клик-химией» или «быстрой химией». Оказалось, что одна из упоминавшихся в его статье реакций демонстрирует удивительно высокие результаты и сегодня ее называют «клик-реакцией». К сожалению, такое использование предложенного Шарплессом термина затеняет его более глубокую инженерную идею.

тур, позволяющих ее добиться, с учетом экономической целесообразности производства.

Довольно трудно правильно описать комплекс проблем и практических подходов, характеризующих современный органический синтез. Изучение гор книг и журнальных публикаций за несколько прошедших лет способны подтолкнуть ученого к хорошей идее некоей структуры, а в литературе описывается множество мощных инструментов (например, клик-химических) ее построения, хотя консервативный исследовательско-инженерный подход предполагает возможность получения немного большего, чем то, что уже было продемонстрировано. Поэтому никто особо не удивляется, если результаты химиков превосходят ожидания.

Масштаб исследований в области органического синтеза поистине огромен. На момент написания этих строк регистр Химической реферативной службы Американского химического общества включает в себя описания 66 883 986 «коммерчески доступных химикатов» (многие из них и сами используются в процессах синтеза) и 56 703 135 описания процедур синтеза. По сообщению ее официального представителя, в настоящее время регистр увеличивается на более чем десять описаний в минуту.

В своем стремлении к воспроизводству продуктов, уже имеющих в природе, химики разработали инструменты, которые могут быть с успехом использованы в атомарно точной макромолекулярной инженерной деятельности. В частности, они научились синтезировать биополимеры, то есть модульные молекулы, состоящие из цепочек взаимозаменяемых мономерных компонентов, например, из четырех нуклеоснований ДНК и двадцати аминокислот пептидных полимеров. Создание синтетических ДНК стало ключевой технологией в биологии и биотехнологиях, а пептиды нашли применение не только в биологических исследованиях, но и в медицине (объем производства некоторых пептидных препаратов измеряется тоннами).

Подобные синтетические макромолекулы могут изготавливаться на заказ, когда используемые в них последовательности приспособлены под определенные функции и кодирующие части генов, а также привязаны к биологическим рецепторам. В то же время химики способны на большее, синтезируя цепочки, содержащие неизвестные в природе мономеры, тем самым расширяя круг доступных нам функциональных продуктов.

Амидные связи, подобные тем, которые были обнаружены в нейлоне, используются для объединения в цепочки пептидных мономеров. Схожий химический принцип может быть применен и для создания других строительных блоков, таких как бета-аминокислоты с добавочным атомом углерода в осто́ве; пептоиды, получаемые присоединением к остову боковой цепочки из атомов азота (а не углерода); «пептидно-нуклеиновые кислоты», в которых нити ДНК переплетены теснее, чем они связаны друг с другом в самой ДНК; а также все перечисленные выше в различных сочетаниях и комбинациях.

Молекулы такого типа называют фолдамерами. Они могут быть спроектированы таким образом, чтобы имитировать биологические функции. Фолдамеры способны связываться и складываться, образуя особые структуры, функциональные макромолекулярные объекты, которые могут использоваться как компоненты более крупных молекулярных систем. Таким образом, в процессе создания фолдамеров химики взяли на вооружение модели, позаимствованные из биологии, как, впрочем, с самого начала области, именуемой органическим синтезом.

Инженерное проектирование с использованием природных инструментов и моделей

Для изготовления генов, вырабатывающих белок, специалисты по генетической инженерии осуществляют различные манипуляции с ДНК. Специалисты по бел-

ковой инженерии, в свою очередь, используют генную инженерию для синтеза сконструированных ими белков. А вот в структурной ДНК-инженерии используют непосредственно ДНК.

В биологии отдельные виды белков (вместе с молекулами, которые они связывают) функционируют подобно молекулярным машинам, обрабатывающим молекулы в процессах усвоения живыми существами пищи, обмена веществ, копирования ДНК и синтеза белка. Белки образуют цитоскелеты, придающие форму клеткам человеческого организма, а также молекулярные машины, изготавливающие актин и миозин, необходимые для движения клеток и их работы в мускулах, что позволяет человеку двигаться в соответствии с сигналами к сокращению, которые им посылают нейроны, в основе работы которых также лежат белковые механизмы.

Для меня лично осознание возможности инженерного проектирования молекулярных машин такого типа сыграло важную роль в понимании богатейшего потенциала атомарно точного производства. В то время эта идея была новой, так как белковую инженерию ошибочно считали невозможной.

Белковая инженерия началась с осознания различий между наукой и инженерным делом, понимания того, что задача по конструированию и укладке белка в соответствии с замыслом специалиста, принципиально отличается от задачи по предсказанию того, как будет уложен натуральный белок. Ученые, специализировавшиеся на изучении белка, разработали алгоритмы конструирования. Испытание и доработка этих алгоритмов потребовали огромных научных усилий, которые привели к созданию целого ряда методик инженерии молекулярного уровня.

Довольно часто исследователи, разрабатывающие инженерные методы, используемые в молекулярном мире, по своему образованию, чувству принадлежности и культуре являются учеными. Вследствие этого, белковой инженерии свойственна ориентация на научные за-

дачи, на конструирование белков и последующее изучение их поведения, что способствовало бы углублению понимания биологических законов.

В наши дни исследователи уже умеют изготавливать белки с заранее сконструированной укладкой, способные соединяться с другими структурами, такими как ионы металлов, небольшие молекулы и макромолекулы, включающие в себя другие белки и ДНК. В некоторых случаях белки конструируются с нуля, в соответствии с встречающимися в природе образцами, но не копируя их. Представители других областей исследований в белковой сфере в большей степени следуют за биологией, начиная с частичной реконструкции естественных белков — изменяют некоторые связи, склеивают друг с другом части различных белков или вносят структурные изменения, направленные на повышение устойчивости.

Многие естественные белки являются весьма чувствительными образованиями; если не обеспечить их хранение в холоде или не заморозить, они быстро теряют структуру и разрушаются. Специально сконструированные белки могут быть гораздо более «прочными». Попадая в стиральную машину, в условиях высокой температуры и наличия моющих средств, естественные белки быстро разрушаются. Вот почему стоящие на полках супермаркетов стиральные порошки с энзимами содержат реконструированные молекулы, то есть продукты белковой инженерии.

При взгляде на биомолекулярные науки со стороны, оценить потенциал устройств на белковой основе довольно трудно. В обывательском смысле белок ассоциируется с мясом. В свою очередь, при слове «мясо» на ум приходит нечто, что можно приготовить и съесть, то есть предмет, скорее, кулинарного, а не инженерного искусства. В действительности мясо состоит преимущественно из воды, представляя собой волокнистый желатин, в то время как белки подобны кератину, из которого состоят рога и копыта. По плотности белки превосходят мясо в миллион раз. Неудивительно, что та-

кой белок, как шелк, использовался для изготовления бронезилетов.

Казалось бы, использование биомолекулярных механизмов резко ограничивает масштаб фолдамерной инженерии, поскольку она позволяет создавать только такие биополимеры, как полипептидные цепочки, для построения которых рибосомы используют двадцать генетически закодированных аминокислот. Но исследователям удалось преодолеть это очевидное ограничение. В генетическом коде используются три нуклеотида в расчете на кодон; при этом каждый кодон определяет одну аминокислоту. Каждый нуклеотид имеет одно из четырех оснований, что означает возможность использования 64 кодонов для всего 20 аминокислот (и сигналов об остановке). Решить проблему позволяет подпитка рибосомы привнесенной аминокислотой, которая была выбрана для приведения в соответствие (и преодоления стоп-сигнала). Благодаря этому методу в белки были внедрены более сотни альтернативных, не встречающихся в природе, аминокислот (некоторые из них значительно отличаются от естественных). Рибосомы оказались гораздо более гибкими органоидами, чем это можно было себе представить. Исследователи добились того, что «обучили» рибосомы считыванию четырех, а не трех оснований в расчете на кодон, добившись увеличения количества вариантов до 256.

Наличие более широкого выбора открывает возможность использования компонентов, обладающих особыми химическими, механическими или оптическими свойствами, а также создания деталей с новыми формами и связующими свойствами, что позволяет проектировать более прочные, предсказуемые структуры.

Одно из преимуществ целиком искусственных фолдамеров заключается в том, что химический синтез позволяет избавиться от всех проблем, сопровождающих биологическое перепроектирование, и открывает прямой путь к масштабному расширению выбора. Я уже упоминал о том, что одним из наиболее при-

влекательных классов фолдамеров являются пептоиды. Последние могут собираться из строительных блоков, получаемых из широко распространенных химикатов, преимущественно аминокрупп. Тем самым количество доступных вариантов выбора увеличивается до тысячи и более, и пептоиды уже используются для построения схожих с белками макромолекулярных объектов.

В 1980-х гг. Надриан Симен начал разработку структур, основывавшихся на сборке разветвленных структур ДНК. Через десять лет в структурной ДНК-нанотехнологии (такое название получила эта область исследований) были достигнуты первые значительные успехи. С тех пор она пережила целую серию революций, кульминацией которых стало обретение возможности проектирования атомарно точных молекулярных структур размером в несколько сотен нанометров, состоящих из миллионов атомов, с использованием технического приема, получившего название «ДНК-оригами». Простая комплиментарность компонент нитей ДНК позволяет предсказуемо собирать жесткую стержнеподобную структуру двойной спирали дезоксирибонуклеиновой кислоты. Это дает нам в руки такой метод молекулярной инженерии, который так же предсказуем, как плотницкие работы. Продолжая эту аналогию, короткая единичная нить ДНК играет роль гвоздей (или «скрепок», как их называют специалисты), «вбиваемых» между двойными спиралевидными нитями и скрепляющих их друг с другом.

С помощью этой методики сегодня уже возможно создание прямоугольников, состоящих из сотен ДНК-адресуемых связывающих участков, опор, образующие октаэдры, и корпусов с открывающимися и закрывающимися крышками. Воспользуемся увеличительным стеклом из главы 5, усиливающим остроту нашего зрения в 10 миллионов раз. Мы видим, что если обычный белок достигает размеров детского кулачка, то типичная структура, созданная благодаря использованию ДНК-оригами, — размеров письменного стола.

Белки связываются с белками, ДНК связываются с ДНК, и эти материалы могут сочетаться. В биологии уже осуществлен весь комплекс основных исследований и разработок, необходимых для изготовления белков: нуклеаз белкового домена (так называемых цинковых пальцев) и транскрипционных активаторных эффекторов (TAL), способных выбирать в качестве цели и связывать особые ДНК-последовательности. Исследователи приступили к изучению потенциала сложных систем, в которых сочетаются эти и другие материалы.

Методы обработки материалов, которые иногда являются атомарно точными

В некоторых случаях применяемые сегодня методы обработки материалов способны производить АТ-изделия уникальной ценности, однако диапазон конструкций, которые можно создать с их помощью, ограничен. Там, где специалисты по органической химии или белковой инженерии способны конструировать и строить атомарно точные структуры, соединяя между собой молекулярные строительные блоки, методы обработки материалов в большинстве случаев предполагают использование, например, смешивания, нагревания, измельчения, выпаривания, конденсирования, растворения, осаждения и дробления. Поскольку в данном случае отсутствует поэтапное конструирование и сборка, возникает проблема контроля результатов. Образно говоря, это методы «смешай и запекай», когда успех в значительной степени зависит от удачи, а атомарно точные результаты получаются очень редко.

Например, для получения углеродных нанотрубок может использоваться высокотемпературная спонтанная конденсация паров углерода (с использованием катализатора). Полупроводниковые наночастицы, известные как «квантовые точки», получают посред-

ством осаждения исходных реагентов в растворе. Однако ни тот, ни другой метод не применим в случаях, когда необходимо создать набор структур с точно спроектированными вариациями.

Как ни удивительно, но большая часть продуктов, именуемых нанотехнологическими, были получены посредством методов «смешай и запекай». Это одна из причин того, почему современные нанотехнологии не имеют почти ничего общего с наномашинами, атомарно точным производством или другими действительно революционными технологическими решениями. Действительно, если мы используем наше уже привычное увеличение, то типичная наночастица будет выглядеть не как машина, но как обломок скалы, в то время как небольшой образец типичного наноматериала — как сама скала весом миллион тонн, покоящаяся на бетонном основании. Однако для того, чтобы мы могли рассуждать о настоящих нанотехнологиях, размер этих скал в диаметре не должен был бы превышать одного метра. В следующей главе будет рассказана история о том, как и почему производство мельчайших частиц и мелкозернистых материалов стали называть «нанотехнологией».

Использование сканирующего зондирования для построения АТ-структур на кристаллах

Специалисты по физике поверхности научились собирать комплексные двумерные АТ-структуры, используя для передвижения по поверхности атомов и молекул инструменты сканирующего зондирования. Впервые этот метод был продемонстрирован в 1990 г. Доном Эйглером, который, перемещая 35 атомов ксенона, выложил на атомарно плоской кристаллической поверхности три заглавные буквы, образовавшие аббревиатуру IBM. Методы сканирующего зондирования основываются на ис-

пользовании машин, способных перемещать атомы или молекулы и создавать различные рисунки, используя атомарную точность кристаллической поверхности. В этом отношении они во многом напоминают технологии АТП и могут рассматриваться как частичное доказательство лежащего в их основе принципа.

Тем не менее методы сканирующего зондирования, используемые для перемещения молекул, значительно отличаются от полезных методик АТП. Инструменты сами по себе имеют крупные размеры, а атомарная точность достигается в редких случаях. Возвращаясь к нашему 10-миллионнократному увеличению, представьте себя стоящим на поверхности, используемой в типичном эксперименте. Оглянувшись вокруг, вы видите на рабочей поверхности сотни миллиметровых по размерам возмущений, возникающих от молекулярных толчков. Площадь этой поверхности составляет несколько квадратных метров. Молекулярные толчки образуют атомарно точную картину, возникающую благодаря тому, что молекулы спонтанно выравниваются с атомарно точными неровностями кристаллической поверхности. За пределами этой области вы бы увидели случайные возмущения, охватывающие территорию сопоставимую с площадью города. Предположим, вы способны перемещаться по близлежащим окрестностям. Вдруг перед вами предстает наконечник сканирующего устройства — конус, сужающийся в направлении локальной нерегулярности размером с ваш большой палец. Подняв глаза, вы увидели бы над собой конусообразную башню, напоминающую огромный сталактит размерами с небоскреб, а главное — механизм, перемещающий наконечник, размером с огромную гору. Учитывая соответствующее нашему увеличительному стеклу десятиллионнократное масштабирование времени, упорядочивание 35 атомов, длившееся несколько часов, превратилось бы для вас в многовековое наблюдение с участием не одного вашего потомка. Совершенствование этой методики позволило добиться не-

которого ускорения процесса, но по самым обычным стандартам показатели производительности остаются бесконечно малыми.

Все это страшно далеко от комплекса наноразмерных АТ-механизмов, способных изготавливать различные компоненты в соответствии с заводскими установками. Под нашим взором, усиленным миллионнократным увеличительным стеклом, типичная машина, выполняющая повторяющиеся АТ-операции, помещалась бы на ладони. При этом она выполняла бы множество циклов в секунду, что соответствовало бы десяткам миллионов операций в секунду в реальном времени.

Учитывая ограничения метода сканирующего зондирования (низкая скорость и текущее ограничение в виде компоновки атомов и молекул только в двух измерениях), мне довольно трудно представить себе, каким образом он мог бы вывести нас на сравнительно короткую дорогу, ведущую к передовой АТ-сборке. Напротив, молекулярная самосборка в растворах уже позволяет осуществлять трехмерную АТ-сборку структур, состоящих из миллионов атомов, а их реальное производство измеряется уже в миллиардах атомов. Данный подход обладает огромной привлекательностью. Я с самого начала выступал защитником самосборки, как направления исследований, ведущих нас непосредственно к созданию технологий АТП-уровня. Сравнительно низкий уровень эффективности методов «подталкивания» молекул с помощью сканирующих зондовых микроскопов стал тупиковым направлением технологического развития.

Инженерия молекулярных систем

Основной движущей силой прогресса в создании атомарно точных макромолекулярных технологий стали биомедицинские исследования, поскольку молекулярные устройства очень подходят в качестве цели биомолекулярных исследований. Крупные достиже-

ния в расшифровке ДНК, например, привели к снижению стоимости секвенирования генома с миллиарда долларов в 1990-х гг. до тысяч долларов в наши дни (и она продолжает быстро уменьшаться). Все современные методы работают с ДНК последовательно, мономер за мономером, и используют биомолекулярные устройства, позаимствованные у природы. В качестве еще одного примера можно привести антитела, представляющие собой устройства на основе белков, широко используемые для обнаружения других молекул. Белковая инженерия часто применяется для поиска новых применений антител. Еще одной областью, в которой биомедицинские приложения стали движущей силой прогресса в АТ-сборке, является органический синтез, играющий жизненно важную роль в разработке новых медицинских препаратов.

У каждой из упомянутых выше областей имеются собственные направления исследований, но все они вносят важный вклад в создание технологической платформы для разработок, ведущих непосредственно к АТП. Биомолекулярная инженерия, прежде всего, является АТ-технологией, естественным образом поддерживающей прогресс в технике макромолекулярных систем, независимо от непосредственных намерений занятых в этой области исследователей.

Совмещение отдельных фрагментов — составные молекулярные системы

Современные атомарно точные молекулярные технологии обладают взаимодополняющими преимуществами. Органический синтез, например, предоставляет коммерчески доступные строительные блоки, функциональные молекулы и методы их модификаций и совмещения, подгоняя с атомарной точностью полностью новые структуры к потребностям исследователей. В то же время, если отставить в сторону по-

строение цепочек, продуктом органического синтеза являются малые молекулы, которые под нашим увеличительным стеклом не превышали бы по размерам ширину карандаша. Молекулы такого размера слишком просты и не способны направлять комплексные процессы самосборки. Для того чтобы устранить это размерное ограничение, используются дополнительные технологии.

В этом деле весьма преуспела структурная ДНК-нанотехнология, способная создавать структуры метровых размеров в нашем увеличенном масштабе. Далее, ее регулярная модульная структура стала использоваться как модель для достижения схожих результатов с использованием иных средств и последующего расширения набора компонентов, применяемых для создания крупных сложно устроенных структур. В то же время у ДНК есть недостатки, заключающиеся в том, что она состоит всего из четырех крупных строительных блоков нуклеиновой кислоты, что ограничивает возможности проектирования разнообразных мелкозернистых структур.

Между тем биология показывает нам огромное разнообразие структур и функций, основывающихся на пептидных фолдамерах, то есть белках. Молекулы этого класса дополняют и малые органические молекулы, и ДНК, поскольку они способны присоединяться к обеим, а значит, и связывать их друг с другом. Таким образом, пептидные фолдамеры усиливают способность ДНК к образованию крупных каркасов и способность химии к предоставлению специальных компонентов, объединяя первые и вторые в единой структуре.

Теперь давайте диверсифицируем технологический портфель, добавляя к его содержимому (например, пептоидам, с их бесконечным разнообразием строительных блоков) подобные белкам фолдамеры, атомарно точные наноразмерные структуры, создаваемые неорганической химией, а также не принадлежащие к числу атомарно точных, но весьма полезные наночастицы, которые способны присоединяться к АТ-структурам и ста-

новиться их частью. Этот список можно продолжить, добавляя и другие технологии с детальным описанием, но и без них общая картина представляется очевидной.

Что касается возможностей практического применения, то расходы на исследования в области нанотехнологий составляют миллиарды долларов. Часть из них тратится на изучение широкого диапазона малых функциональных структур, таких как квантовые точки, углеродные нанотрубки, металлические плазмонные компоненты, металлические и полупроводниковые кластеры «магического размера» и многое-многое другое. Некоторые из полезных компонентов являются атомарно точными, но все они обещают принести огромную пользу, если мы научимся упорядочивать их так, как это происходит с компонентами печатных плат. АТ-структурные основы с атомарно точными соединительными деталями способны предоставить нам эквиваленты плат, гнезд и разъемов. В разработки наноразмерных компонентов были вложены миллиарды долларов, отведенных на научные исследования. Если эти деньги были потрачены с умом, мы обязательно получим отдачу от них, после того научимся собирать компоненты и использовать для создания более сложных систем. Я полагаю, что само по себе это говорит больше, чем любой перечень потенциальных возможностей практического применения, и, как подсказывает опыт, научная аудитория согласна со мной.

Критическая технология: вычислительные инструменты проектирования

В современной макроскопической механической инженерии широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Они применяются на каждой стадии процесса, от набросков форм различных частей и прорисовки деталей до моделирования

эксплуатационных нагрузок и деформаций, а также используются (при наличии специального программно-аппаратного обеспечения на производстве) в расчете перемещений режущих инструментов при обработке металлических заготовок и в программировании машин, перемещающих и собирающих отдельные детали.

В соответствии с этим стандартом, разработчикам систем автоматизированного молекулярного проектирования (САМПР) удалось добиться огромного прогресса. Но им предстоит пройти еще долгий путь. Программное обеспечение САМПР, наиболее широко используемое в фармацевтической отрасли, в значительной степени основывается на численном моделировании, которое является плодом многолетних исследований в вычислительной химии. Использование будущего потенциала САМПР (используя этот термин в инклюзивном смысле, включая инженерию макромолекулярных систем) потребует интеграции множества методов моделирования, тесно связанных как с вычислительным, так и ручным проектированием.

В данном случае человеку отводится его обычная роль руководителя процесса, которая заключается в формировании архитектуры системы в целом и проектировании частей, способных обеспечить осуществление замысла. Аналогично свою стандартную роль играет и моделирование (описывает поведение данной конструкции в различных условиях). Но в моем понимании используемый в макромолекулярной сфере вычислительный дизайн имеет существенные отличия. Они определяются тем, что нерегулярные фолдамеры должны соответствовать друг другу как части трехмерной головоломки, но у нас отсутствует первоначально заданный набор частей, а наилучшее соответствие никогда не бывает очевидным и точным. Пока же компьютерные программы основываются на использовании общих описаний молекулярных форм и функций, а также поиске обширного пространства возможностей для последовательностей мономеров, которые соответство-

нали бы друг другу после укладки и действовали в соответствии с задумками специалистов.

Сегодня «правильными» компьютерными программами располагают только специалисты по белковой инженерии. Вскоре будет создано соответствующее программное обеспечение для пептоидов. В дальнейшем процессы поиска, используемые в автоматизированном проектировании, должны быть интегрированы с определениями ролей системного уровня, описанием структур ДНК, связанных органических молекул и так далее. Сделать это не так уж и сложно (тем более что часть работ уже выполнена). Однако чтобы достичь успеха, понадобится потрудиться, задействовав открытую архитектуру, что позволит привлечь большое количество рабочих групп, действующих в условиях не слишком тесной координации.

Современные САМПР сегодня напоминают лоскутное одеяло, и им недостает должного уровня интеграции, системного фокуса и широты охвата. Весьма вероятно, что скорость усовершенствования САМПР будет определять темпы прогресса в разработках систем, поскольку технологии сборки уже доступны нам благодаря биотехнологам и химикам, в то время как дизайн остается главной проблемой.

Пути к революции

От современных технологий к АТП пролегает широкая открытая дорога. Мы прошли уже большой путь, но, чтобы добраться до цели, предстоит пройти еще немалое расстояние. Зато нам не придется преодолевать ни пересеченную местность, ни пропасти. Наша дорога пролегает по ландшафту молекулярных технологий от современной атомарно точной самосборки до строительства АТ-машин. Я попытаюсь набросать план местности, в которой мы находимся, и указать пути, движе-

ние по которым будет способствовать появлению новых возможностей.

Два метода сборки деталей

Новые горизонты открывает перед нами развитие и совершенствование стереотактического контроля — способности направлять молекулярную сборку, задавая направления движения молекул; современным исследователям удалось пока лишь чуть-чуть ощутить мощь этой технологии. Стереотактическую сборку можно сравнить с тем, как мы, собирая мебель, вставляем деревянный колышек в отверстие на панели или полку на отведенное ей в книжном шкафу место. Это общераспространенный, основывающийся на здравом смысле способ создания вещей: *поместите детали в отведенное для них место и соедините их друг с другом*. Метод самосборки, напротив, выглядит довольно необычно: *предоставьте деталям свободу передвижения, но потребуйте, чтобы каждая из них нашла и закрепилась на своем особом месте*.

Исследователи узнали о принципах самосборки из молекулярной биологии и начали широко их использовать; в молекулярных науках самосборка воспринимается как проявление здравого смысла, а прямой контроль над соединением деталей часто выглядит странным.

Для того чтобы правильно понять наши следующие шаги по ведущей вперед дороге, необходимо рассмотреть возможность взаимодополняющих способов комбинирования самосборки и стереотактических методов.

Современные методы самосборки

Самосборка обладает одним важнейшим преимуществом: поскольку для перемещения деталей в нужное место используется тепловое движение, их сборка не требует привлечения наноразмерных механизмов. Для изготовления деталей исследователи имеют возмож-

ность использовать традиционные биологические или химические средства для создания частей, и, при условии их должного проектирования, тепловое броуновское движение довершит начатое людьми.

Впрочем, рука об руку с самосборкой идут трудности и ограничения. Условием ее использования для создания сложных уникальных структур является привязка каждой детали к строго определенному месту и позиции. Следовательно, все детали должны иметь уникальную форму, подобно частям в мозаичной головоломке. Эти молекулярные кусочки общей мозаики не могут быть ни слишком маленькими, ни слишком простыми, ни слишком похожими друг на друга. Они не должны слишком сильно связываться с соседними частями, поскольку в случае допущенной ошибки деталь невозможно будет переместить в правильное место. И наконец, подобно законченной мозаичной головоломке, в конечном продукте будут обязательно просматриваться швы, соединяющие его части.

Неизбежные в случае использования самосборки проблемы затрудняют проектирование. Поэтому в наши дни единственным видом комплексных крупных структур, образуемых из соответствующих компонентов методом самосборки, являются свернутые полимерные макромолекулы. Однако все перечисленные выше трудности могут быть преодолены, и, как мы уже видели, макромолекулярные продукты, полученные методом самосборки, могут оказаться весьма полезными.

Передовые стереотактические методы

У нас имеется возможность объединить сильные стороны самосборки и стереотактический контроль. Чтобы убедиться в этом, давайте рассмотрим возможности передового стереотактического контроля и проблемы, сопровождающие его применение.

На достаточно высоком уровне стереотактический контроль может быть использован для внедрения АТП.

Как описывалось в главе 10, наиболее передовые его формы предполагают перемещение малых реакционно-способных молекул по сложным, четко ограниченным путям. Движения должны быть сложными; так механизмы обязаны задавать направление, определять позицию и ориентировать большое количество различных деталей; одновременно перемещения должны быть четко ограниченными, поскольку детали обязаны прибывать в предназначенные им места, несмотря на тепловые флуктуации. Исследовательская инженерия позволяет сделать вывод, что выполнение этого требования возможно в случае применения комплекса машин, построенных из жестких деталей, изготовленных, в свою очередь, из мелкозернистых, тесно связанных материалов с высоким модулем упругости. В то же время условием создания подобных машин является жесткий стереотактический контроль. Не ходим ли мы по кругу?

На первый взгляд, технология АТП-уровня может показаться неким воздушным замком, красивым и привлекательным, но который нельзя построить в реальной жизни. И действительно, это первое впечатление получило довольно широкое распространение, так как энтузиасты передовых нанотехнологий воображали себе множество высоких замковых башен, в то время как специалисты по молекулярным наукам были слишком заняты, чтобы заняться постройкой фундамента.

На современном этапе строительства «замка» (выше нулевой отметки) мы должны направить усилия на возведение стен, используя строительные блоки, изготовленные из доступных материалов. Архитектурное решение остается за исследовательской инженерией, которая должна будет найти способы преодоления ряда ограничений, налагаемых сегодня на фабрикацию продуктов; производственное оборудование каждого нового уровня (каждый новый зарождающийся класс систем) должны вводиться с использованием мощностей, доступ к которым был получен уровнем ниже. Ключом к пониманию нескольких следующих, более высоких уровней являет-

ся объединение самосборки и стереотактического контроля, что позволило бы образовать сплошной континуум без пробелов.

Соединение двух методов

Принципы самосборки и стереотактического контроля прекрасно сочетаются друг с другом. Второй позволяет компенсировать слабости, присущие первой. Самосборка, в свою очередь, смягчает трудности, возникающие при осуществлении стереотактического контроля. Мягкий контроль позволяет легко ограничить общие позиции, а самосборка обеспечивает наиболее близкое соответствие. Таким образом, системы, сочетающие в себе оба метода, могут быть относительно простыми и мягкими. При этом исчезает потребность в использовании чего-то подобного АТП-системами.

Объединение взаимодополняющих сильных сторон самосборки и стереотактического контроля открывает возможность использования эффективного подхода к АТ-фабрикации:

- Применение крупнозернистых строительных блоков для создания структур, с четко отделенными друг от друга и легко определяемыми местами связывания.
- Использование мягких машин для выбора специфических мест открывает свободу движения, достаточную для достижения самосоответствия.
- Применение самосоответствия и связывания (локальной самосборки) для фиксации каждого строительного блока в заранее отведенной ему позиции.

По сравнению с чистой самосборкой, данный подход открывает возможность применения более мелких строительных блоков, отличающихся легкостью изготовления и более стандартной конструкцией; одновременно такие блоки более разнообразны по своим свойствам и могут применяться для изготовления широкого диа-

пазона продуктов. Что еще лучше, необходимые машины сами по себе могут быть построены посредством чистой самосборки путем расширения уже используемых технических приемов. В случае приложения узконаправленных скоординированных усилий, белковой инженерии, органического синтеза и структурной ДНК-нанотехнологии более чем достаточно для создания компонентов всех необходимых типов. В данном случае основная трудность заключается в проектировании, а не синтезе.

Поскольку использование более мелких разнообразных блоков позволяет расширить диапазон выпускаемых продуктов, последние могут включать в себя машины, способные обеспечить более тщательный стереотактический контроль. Мелкозернистые, более жесткие материалы и упрощение проектирования позволяют наладить более точный контроль над более сложными перемещениями, ужесточая тем самым стереотактический контроль. Перед нами открывается картина эволюции технологий от текущего уровня лабораторных возможностей к стереотактическому контролю уровня АТП, выход на который будет означать начало АТП-революции.

И никаких разрывов и пробелов².

В свете достижений в области технологий АТ-производства и описывавшегося мною пути дальнейшего развития, возникает вопрос: почему, несмотря на прекрасное финансирование и проводившиеся в течение десятилетия нанотехнологические исследования, нам не удалось добиться значительного прогресса в этой сфере?

В следующей главе мы обращаемся к истории принятия нанотехнологической программы, ее финанси-

2. Более подробно эта эволюция технологий, ее дополнительные аспекты и промежуточные пункты, рассматриваются в приложении II.

рования и изменения направления. Первоначально программа обещала разработку передовой АТ-сборки. Но после получения крупных денежных средств произошло переопределение самого понятия нанотехнологии, что привело к полному изменению ее содержания. Цели, средства и финансирование разошлись в разные стороны.

Не зная о том, что произошло, мы не можем правильно понять текущее состояние дел.

На пути в будущее произошло нечто странное...

В НАШИ дни каждая экономически развитая страна поддерживает собственные нанотехнологические исследования. Некоторые мировые лидеры рассматривают нанотехнологии как важнейшую часть будущего, разделяя видение, представленное в моей работе. Например, когда президент Индии доктор Абдул Калам, в прошлом руководивший национальной ракетно-космической программой, выступил с серией посланий к нации, посвященных нанотехнологиям, в них приводились цитаты из лекции Ричарда Фейнмана «There's Plenty of Room at the Bottom» («Там внизу много места») и из моей технической книги *Nanosystems* («Наносистемы»). В 2011 г. я встречался с президентом России Дмитрием Медведевым, выступившим на открытии международного форума RUSNANOTECH 2011. Оказалось, что он читал мою первую книгу «Машины создания». Более десяти лет назад, президент США Билл Клинтон объявил о намерении принять первую в мире национальную нанотехнологическую программу, основывавшуюся на видении атомарно точного производства; современная аналогичная общегосударственная программа Китая имеет более крупный бюджет, который продолжает увеличиваться.

В наши дни государственные расходы на исследования в области нанотехнологий в США, Европе и Китае

измеряются миллиардами долларов. Сравнимое финансирование исследований и разработок осуществляется корпорациями. О полученных результатах сообщают множество научных журналов, ежедневно публикующих такое количество статей, которое не способен прочитать ни один человек.

Казалось бы, у нас были все основания ожидать, что темпы прогресса в АТ-нанотехнологиях будут сопоставимы со скоростью этого потока исследований. Мы действительно продвинулись вперед, но далеко не в той степени, на которую могли бы рассчитывать. В период между начальным вдохновением и принятием национальных программ история сделала неожиданный зигзаг.

В США в период разработки и принятия общенациональной программы ее руководители продвигали видение нанотехнологий, в центре которого находилось атомарно точное производство. Впоследствии понятие «нанотехнологий» было пересмотрено так, что их связь с АТП оборвалась, и в программе не осталось ни одного упоминания об атомах. Вам кажется, что это невозможно? Теперь у вас всегда будет в запасе пример, иллюстрирующий насколько удивительной может быть политика и насколько сильно могут разойтись убеждения и реальность. Возможно, социологи и историки проведут специальные исследования документов публичного характера, посвященных этому вопросу (на них основывается мой рассказ в этой главе), и дадут новые оценки соответствующей научной литературе.

Поскольку мы пытаемся заглянуть в будущее, важно понять причины искажения фактов, что позволило бы исправить ошибочные впечатления о прошлом и избежать их повторения. Я надеюсь, что «знакомство с документами» поможет объяснить некоторые загадки современных дискуссий и послужит назидательной историей, полезной для будущего диалога.

Наша история начинается со слова и его значения.

Два вида нанотехнологий

Некоторые типы нанотехнологий обладают атомарной точностью, некоторые — нет. Граница между ними может быть расплывчатой, но, как мы увидели в предыдущих главах, она определяет важное в практическом смысле отличие. Так уж случилось, что эта граница также стала своеобразным политическим разломом, разделившим нанотехнологии на две части, находящиеся в противоречии друг с другом.

Нанотехнологии

как атомарно точная сборка

Нанотехнологии начались с концепции атомарно точных технологий, бурно развивающихся в наши дни. Они включают в себя области, связанные с химическим синтезом и биомолекулярной инженерией, а также различные АТ-технологии, разрабатываемые в рамках особых направлений физики и материаловедения. В предыдущих главах мы познакомились с некоторыми из современных АТ-технологий (структурами, состоящими из миллиона атомов, фолдамерных образований, и так далее), а также наметили путь к созданию новой дисциплины — инженерии атомарно точных молекулярных систем¹. Эти бурно развивающиеся АТ-технологии, независимо от долгосрочных ожиданий, обладают своими собственными внутренними достоинствами, которые и являются движущей силой прогресса на дорогах, ведущих к разработке и практическому применению АТП.

1. В 1981 г. я опубликовал статью под названием «Molecular Engineering: An Approach to the Development of General Capabilities for Molecular Manipulation» («Молекулярная инженерия: подход к развитию общих возможностей молекулярного манипулирования») и продолжаю придерживаться намеченного в ней направления исследований.

*Нанотехнологии
как наноразмерные материалы
и устройства*

В рамках изменения направления американской программы понятие «нанотехнологий» было заново определено исключительно с точки зрения масштаба, что выразилось в избавлении от любых упоминаний об атомарной точности. Для того чтобы некая структура была достойна называться «нанотехнологической», ее размеры в одном или более направлений должны были составлять «приблизительно от одного до ста нанометров». Во многих случаях АТ-нанотехнологии полностью удовлетворяют этому критерию. Однако ему также соответствуют и транзисторы на кремниевой микросхеме, и частицы ультратонких порошков.

Атомарная точность имеет важное значение, но она не должна использоваться для обозначения глубокого различия между областями. И в атомарно точных, и в не относящихся к ним нанотехнологиях могут использоваться одни и те же методы, общие инструменты и технические приемы моделирования, и их комбинация дает гораздо лучшие результаты, чем каждая из них по отдельности. Например, включение атомарно точных наноустройств в обычные кремниевые схемы может привести к рождению новой перспективной технологии в мировой полупроводниковой отрасли. Действительно, атомарно точные и не относящиеся к ним технологии принадлежат к одной и той же области и будут идти рука об руку. Так уже происходит в различных научно-исследовательских сферах, от биомедицины до структурных ДНК-нанотехнологий.

Тем не менее в силу причин, находящихся вне технической сферы, отношения между нанотехнологиями этих двух типов складывались далеко не просто и вскоре перешли в противостояние.

Два вида обещаний

Исходным пунктом формирования сферы нанотехнологий, вызвавшей огромный интерес и ставшей престижным направлением, было отнюдь не внезапно вспыхнувшее увлечение наноразмерными частицами или транзисторами. Изначально «нанотехнологии» были просто названием, словом, которое я предложил использовать (где то между первым и вторым вариантами черновика «Машин создания») для обозначения концепции технологии, основывающейся на АТП.

Я полагаю, что без обещания разработки технологий АТП-уровня, нанотехнологии в широком смысле развивались бы менее быстро и, скорее всего, под более традиционными названиями. Им едва ли удалось бы неожиданно привлечь огромное внимание прессы, очаровать публику мифологией наноразмерных роботов и проникнуть в массовую культуру благодаря книгам, кинофильмам и компьютерным играм. Самим по себе наночастицам никогда не удалось бы выдать себя за технологию, способную перевернуть мир.

Волна интереса к нанотехнологиям начала подниматься в 1986 г. после выхода в свет «Машин создания». В течение нескольких месяцев обзорные статьи в журналах и публикации в популярной прессе донесли изложенные в ней идеи до миллионов читателей. В последующие годы эта тема была подхвачена научно-фантастической литературой, что еще более разогрело воображение публики. Укрепившаяся в общественном сознании идея «нанотехнологий» постепенно переросла в видение футуристической технологии, основывавшейся на использовании крошечных машин, довольно слабо связанной с моей первоначальной концепцией высокоэффективного АТ-производства. О других наномасштабных технологиях упоминалось довольно редко, и иные концепции получали известность довольно медленно.

Исследования в области наноразмерных материалов обещали улучшение их качества. Разработки в сфере на-

поразмерных устройств были сосредоточены на улучшении электроники, сенсоров и тому подобного. Ценность разработок в этих областях могла измеряться и в миллионах, и в миллиардах долларов, но они не имели ничего общего с АТП. Упомянутые выше технологии значительно отличаются друг от друга, а потенциальная отдача от исследований несопоставима по величине. Было очевидно изначально, что, с точки зрения общества, долгосрочные обещания технологий АТП-уровня затмевают собой любые возможные краткосрочные результаты исследований.

Объединение, путаница и конфликт

Начиная с 1990-х гг. все шире начала распространяться путаница между производственными решениями, которые могли быть разработаны и внедрены в ближайшем будущем, и долгосрочными технологиями. Одним из ее следствий стало представление о тесной связи отношений, узком разрыве и, соответственно, короткому пути от уже существовавших технологий до перспективных способов производства, которые на самом деле могли бы быть созданы только через несколько десятилетий. Возникло мнение, что нанотехнологии уже рядом. Усиливавшаяся неразбериха создала условия для получения крупных денежных средств учеными, которые не проявили достаточной инициативы в разъяснении разницы между наночастицами и наномеханизмами. Данное несоответствие привело к напряжению.

Только представьте себе положение, в котором оказались специалисты, занимавшиеся изготовлением, изучением и применением очень мелких частиц с самыми разнообразными свойствами. До 1986 г. проводимые ими исследования не привлекали особого внимания. Но уже в начале 1990-х гг. мир начал проявлять к ним все более растущий интерес — если, конечно, они начали называть их нанотехнологиями.

Общественным вниманием завладели представители не только этого направления, но и целого ряда других

областей, которые начали называть свою работу нанотехнологиями. Действительно, почему бы им не воспользоваться этим наименованием? Само слово полностью соответствовало характеру их деятельности — она была связана и с «нано-», и с «технологиями». По мере того как исследователи, специализировавшиеся на изысканиях в различных сферах, следовали друг за другом в применении этого названия, оно на самом деле принесло реальную пользу, так как привело к разрушению границ между научными дисциплинами и образованию новых сообществ. Время от времени различия между исследователями приводили к вспышкам напряженности в отношениях, но они продолжали трудиться под общим знаменем нанотехнологий, приносившим и вознаграждение, и удовлетворение от долгожданного признания. Создавалось впечатление, что нечто под названием «нанотехнологии» расцветает во всей своей красе.

В те далекие дни рост нанотехнологий проявлялся преимущественно в переименовании направлений исследований, что превратилось в хорошо известный тактический прием для получения финансирования. Это обстоятельство стало предметом шуток на различных конференциях. В воздухе залов, в которых проводились научные форумы, витал один и тот же вопрос: «Что же *такое* эти нанотехнологии?» Я не знаю другой такой области исследования, которая была бы склеена из столь разнородных кусочков. И конечно, ни в одной из них не использовался настолько общий критерий выделения, как размер².

-
2. Сразу после написания этого параграфа мне на глаза попался последний номер журнала *Science*, в котором я нашел еще один пример расширительного толкования нанотехнологий. В названии статьи содержались слова «наночастицы оксида железа». Аннотация к ней начиналась словами «Медицинские применения нанотехнологий...», а заканчивалась «...использованием нанотехнологии для активации клеток». В статье описывался новаторский способ применения мельчайших частиц особого рода, но не было ничего, что имело бы четко выраженное отношение к «нанотехнологии». Таким образом, этот термин использовался исключительно в рекламных целях.

Поскольку переименование влекло за собой получение финансирования, под эгидой нанотехнологий собиралось все больше исследовательских групп. Вскоре у них обнаружился общий интерес, заключавшийся в продвижении и контроле использования самого названия. Термин «нанотехнологии» оказался на удивление эластичным и хорошо растяжимым, прикрывая собой буквально все, что можно, — от волокон и красок до частиц металла с мелкозернистой кристаллической текстурой. Нанотехнологии такого типа привлекли миллиарды долларов на финансирование исследований. Жесткий контроль использования названия приобрел огромное значение, ведь «нанотехнологии» превратились в бренд, который стоило защищать.

Независимо от риторики сторонников нанотехнологий, ее связь с АТП оставалась довольно расплывчатой. Идея передового, атомарно точного производства (определенного вида, которое будет когда-нибудь создано) оставалось ярким лозунгом, но не стало ничем большим, чем расплывчатая мечта без конкретного плана реализации. Путаница понятий стала прибыльной и институционализированной, в то время как идеи, послужившие толчком к образованию новой области, стали в большей степени предметом слухов, нежели исследований.

Более того, вместе с получением очевидной выгоды от названия исследований в области материаловедения нанотехнологиям пришлось заплатить и определенную цену. Слово «нанотехнологии» стало ассоциироваться с несбыточными ожиданиями. Возникло опасение, что оно не имеет никакого отношения к реальной действительности.

* * *

Вообразите себя исследователем, который живет в начале 1990-х гг. и изучает свойства наночастиц под флагом нанотехнологий. В разговорах со специалистами в других областях, вы и ваши коллеги слышите уважительные отзывы о своей работе. Одновременно вы сталкиваетесь

тес с неуместными ожиданиями и необоснованными страхами. Люди задают вам довольно странные вопросы, наподобие этого:

«Когда будут созданы эти крошечные роботы, которые, как мы читали, будут использоваться для очистки человеческих артерий?»

Или:

«Вы не боитесь, что крошечные роботы, над которыми вы работаете, выйдут из-под контроля и разрушат наш мир?»

Вопросы первого типа вызывают досаду, так как они задают невероятно завышенные ожидания, а вопросы второго типа — беспокойство, поскольку они основываются на предположении об опасности вашей работы. Изготавливаемые вами в лабораторных условиях наночастицы не имеют ничего общего с машинами, но люди, интересующиеся нанотехнологиями, постоянно переводят разговор на крошечных роботов. Вы приходите к выводу, что пресса, по всей видимости, одержима этой идеей, и она все более овладевает массами. Что вы можете сказать на это?

Эти вопросы не имеют отношения ни к вашей работе, ни к сфере интереса ваших коллег, ни к возможностям современных технологий. В подобных ситуациях ученый должен развеять популярные фантазии и постараться четко сформулировать истину.

И все же, решающее значение имел третий вопрос, очень часто следовавший за первыми двумя:

«Когда же специалисты по нанотехнологиям создадут рой разнообразных крошечных роботов, способных атом за атомом создавать почти все, что ни пожелаешь?»

И вот, раздражение вызывает уже сама идея АТП. Концепцию стали слишком тесно связывать с обещаниями и опасностями, воспринимавшимися (во многих случаях справедливо) как абсурдные, а машины атомарно точной сборки — с воображаемыми полчищами крошечных, но грозных роботов способных в прямом и переносном смысле жонглировать атомами.

Простейший неинформированный отклик на этот странный набор идей был бы в том, чтобы отрицать наличие в них хоть какого-то смысла. Обещания революции, основывающейся на АТ-технологиях, произносились вновь и вновь, но сами технологии сначала были неправильно поняты, а затем отвергнуты.

Что же произошло?

Предназначение, успех и рождение чудовищного мема

Некоторые из заблуждений публики прослеживаются вплоть до «Машин созидания». Появление этой книги привело в движение последовательность событий, первоначально развивавшихся в соответствии с намеченными мною ориентирами. Особенно важно, что «Машины» познакомили публику с огромным потенциалом (и с его положительными, и отрицательными сторонами) передовых АТ-нанотехнологий. К тому же книга позволила оценить масштабы потенциальных выгод и рисков — в комплексе. В общем, мне удалось добиться успеха, пусть и частичного. Нельзя не упомянуть, что некоторые читатели восприняли «Машины» как утопию, другие — как сбалансированный анализ перспектив, третьи — как источник своих ночных кошмаров, а четвертые — как фантастику чистой воды. Но были и те, кто рассматривал мою книгу как первичный обзор целого комплекса возможностей, исходный пункт для дальнейших размышлений о будущем думающей части общества.

В начале книги я упоминал о чувстве моего собственного жизненного предназначения. Я видел свою миссию в том, чтобы внести личный вклад в решение глобальных проблем человечества. Согласно моему представлению, он мог заключаться в исследовании технологий, способных преобразовать производство и общество и в анализе открывающихся возможностей. А затем мои

знания должны были становиться общим достоянием. Обнаружив огромный потенциал передовых нанотехнологий, я не мог игнорировать его. Направление приложения дальнейших усилий подсказало мне чувство собственного предназначения. Я стремился не рекламировать нанотехнологии, а донести до общественности сбалансированную точку зрения на возможности их применения — описать их потенциальные выгоды и предупредить о возможных рисках за несколько десятилетий до того, как они могли бы возникнуть в реальной действительности. Преимущества нанотехнологий АТП-уровня неизбежно должны были вызвать подлинный энтузиазм, который, как мне представлялось, станет толчком к разработкам. Как мы убедились, разработки в этой сфере действительно получили мощный импульс. Но он сопровождался заявлениями о том, что нанотехнологии уже существуют, что вызвало неуместные тревоги и завышенные ожидания.

Попытавшись оценить реалистичные сроки создания технологий АТП-уровня, я пришел к выводу о необходимости (не самой насущной, но всё же важной) постепенного роста понимания потребности в создании основы для осуществления трудного социального перехода, для разработки регулятивных механизмов надзора над созданием передовых технологий самого широкого спектра, а также плана внедрения системы контроля над ними, подобной используемой для контроля над вооружениями.

Мои усилия по пробуждению чувства озабоченности в целом оказались успешными, но последовавший отклик вызвал разочарование. Наряду с серьезными проблемами, я указывал на риск, связанный с мельчайшими опасными, но бесполезными самовоспроизводящимися машинами, которого можно было *легко избежать*³. К со-

3. Эти гипотетические машины (массовые скопления которых получили название «серой слизи») имели поверхностное сходство с быстро вышедшей из моды концепцией возможности органи-

жалению, эта яркая, хотя и второстепенная озабоченность, распространилась быстро и широко, благодаря массовой культуре и досужим разговорам. Крошечные машинки, способные выйти из-под контроля человека, стали восприниматься как огромный неконтролируемый риск, якобы внутренне присущий нанотехнологии. Если бы проблема заключалась только в возникшей путанице, непосредственный ущерб был бы не слишком велик и со временем его отрицательное воздействие, скорее всего, сошло бы на нет.

Трудность заключалась в том, что публика познакомилась с чем-то под названием «нанотехнологии» задолго до того, как они реально появились на свет, что привело к возникновению путаницы и неразберихи, когда проблемы и тревоги довольно далекого будущего наполнялись современным пониманием. В тех случаях, когда исследователи приходили к собственному пониманию передовых нанотехнологий, они обнаруживали, что их деятельность вызывает немалые опасения. В массовом сознании наночастицы превратились в аналоги опасных механических наножучков — в неконтролируемый неотъемлемый риск таинственного наномира.

Исследователи в сфере нанотехнологий обнаружили, что им приходится то и дело отвечать на вопросы о наномашинах, построенных из атомов, и крошечных роботах, которые могут выйти из-под контроля человека.

зации наноразмерной машинерии для создания более крупных по размерам продуктов. Источником этой идеи стала биологическая аналогия (например, с растительными клетками в результате деления которых происходит рост деревьев), вскоре пустившая корни в общественном сознании и после скрещения с «серой слизью» приведшая к рождению яркой устойчивой мифологии. В мире исследовательской инженерии практическая и эффективная фабричная модель была вытеснена более ранними, менее практичными и более легко перенастраиваемыми концепциями. Впрочем, сама идея заводов и фабрик вызывала гораздо меньший интерес, чем полчища наножучков. Неудивительно, что она пребывала на заднем плане и в прессе, и в общественном воображении.

Все эти проблемы смешивались и приписывались автору книги под названием «Машины создания». Специалисты пытались осадить тех, кто задавал подобные вопросы. Но вместо того, чтобы попытаться исправить неправильные представления, они полностью отвергали весь комплекс идей, которые и сами понимали некорректно.

Образы будущего, финансирование и идеальный шторм

Те же самые нечеткие представления, приведшие к тому, что машины превратились в массовом сознании в потенциально опасных «жучков», привели и к тому, что в качестве переднего края АТП-революции или чего-то похожего на нее стал рассматриваться «винегрет» из наноразмерных технологий, а не молекулярная инженерия.

Исследовательские группы часто стремятся взобраться на сцену, которая привлекает внимание. В этом нет ничего нового, и этот эффект может принести науке немало выгод. Нанотехнологии способствовали «перекрестному опылению» научных «полей», появлению новых направлений исследований, а также принесли с собой новые научные знания и способы практического применения. И, конечно же, исследования, проводившиеся в различных направлениях, внесли важный вклад в создание технологий, которые могли использоваться в АТП.

В ретроспективе расплывчатое восприятие фактов ознаменовало начало бури, вихрем закрутившей мечтания и ночные кошмары и создавшей огромную неразбериху. Мечты подхлестывали усилия, направленные на получение федерального финансирования, ночные кошмары угрожали свести их на нет, в то время как неразбериха приводила к неправильным откликам. Когда полемика достигла точки кипения, вашингтонские руководители, движимые алчностью и страхом, внезапно бросились разрушать то, что как они полагали, стояло у них на пути.

Все это началось с расплывчатости восприятия и неправильного понимания того, как законы физики огра-

ничивают потенциал технологий. Поскольку исследовательская инженерия не пересекалась с концептуальной структурной основой науки, очень немногие ученые видели, что в ее рамках могут *быть* найдены объективные факты, имевшие непосредственное отношение к делу. Поэтому круг тех, кто пытался установить их, был очень узким.

Область, обреченная на неоднозначность

Продвижение нанотехнологий осложнялось глубокой структурной проблемой, связанной с отсутствием однозначности в рассматриваемой нами области. Четкость и ясность имеют важное значение в науке. Но четкое понимание природы новой нанотехнологии могло привести к ограничению поддержки, поскольку она произрастала из беспорядка и путаницы. Наибольшей глубины эта проблема достигла в годы формирования области, когда уровень общественных ожиданий задавался обещаниями технологий АТП-уровня — и полного изобилия, в то время как отдача от исследований наноматериалов (а также частиц, волокон, устройств, не относившихся к атомарно точным, и так далее) была совсем невелика.

С самых первых дней существования новое сообщество восприняло риторику «строительства атом за атомом», поскольку она была частью принятия бренда «нанотехнологии». Однако идея использования наноразмерных машин для строительства с атомарной точностью превратилась в камень преткновения. В то время эта перспектива выходила за пределы ближайших горизонтов исследований и к тому же была обременена определенным «багажом». Тем не менее идея АТ-производства с использованием АТ-машин оставалась существенной частью концепции, и, несмотря на полное отсутствие определенности, наномашин оставались основой образа нанотехнологий как революционного явления.

Естественная реакция сообщества заключалась в сохранении идеи «строительства атом за атомом» как ча-

сти риторики. Идея же производства, основывавшегося на использовании наномашин (крошечных роботов!), была отвергнута как фантастическая — каковой она, собственно, и была в популярной форме изложения, поскольку так привлекала максимум внимания.

Не имело никакого значения, что АТП-фабрика в коробке ни в коей мере не являлась микроскопическим роботом или что нанотехнологические обещания могли быть выполнены только благодаря использованию наномеханических систем. Огромные плотные облака популяризации едва ли не полностью скрыли реальный нанотехнологический ландшафт. Технические идеи так и не смогли преодолеть туманную завесу, и в циркулировавших в обществе историях ни словом не упоминались ни инженерия молекулярных систем, ни заодвы, ни законы физики, ни упруго ограниченное молекулярное движение, ни конвергентная сборка микроразмерных блоков, ни проектирование и анализ на системном уровне. Публику не интересовали ни факты, ни современные идеи, ни технические публикации, способные перевести теоретические дискуссии в практическую плотность. Ее воображение было целиком и полностью захвачено мириадами наножучков.

* * *

В конце концов, опираясь на общественный интерес и поддержку зарождавшихся исследовательских сообществ, вашингтонское руководство изыскало необходимое финансирование, что приблизило нас к успеху. В 2000 г. президент США Билл Клинтон предложил, а конгресс одобрил принятие федеральной программы «Национальная нанотехнологическая инициатива» (ННИ, NNI) с объемом финансирования в миллиарды долларов.

Казалось, что обещанная нанотехнологическая революция приближается с огромной скоростью. Но это впечатление создалось только у тех, кто понаслышке знал о реальных разработках и был плохо знаком с тех-

нической стороной дела. Никто не знал, что нас ждет дальше. Даже после завершения событий я обнаружил, что очень немногие осознали, что же на самом деле произошло.

*На переломе: обещанный и преданный
образ будущего*

Какие обязательства взяли на себя участники ННИ перед конгрессом США и обществом? В двух словах, создатели программы предложили поддержать исследования в области атомарно точного производства или во всяком случае чего-то очень на это похожего. Именно на это Конгресс и выделил средства. В свете последующих событий — нигде не афишировавшегося отказа ННИ от поставленной перед ее участниками цели — было бы важно напомнить, что собственно произошло. Тем более что, как мне представляется, многие факты потихоньку исчезли в «дыре памяти».

В 1999 г. архитекторы ННИ опубликовали глянцевую «брошюру для населения», под названием «Нанотехнологии: формирование мира атом за атомом». Она открывалась вопросом: «Что если бы мы научились создавать вещи так, как их творит природа — атом за атомом и молекула за молекулой?» После этого следовало описание будущих чудес, которые сулят нам атомарно точные нанотехнологии. Эта довольно длинная декларация, основным содержанием которой стал желаемый образ близкого будущего, была выпущена под эгидой Межведомственной рабочей группы по нанонаукам, инженерии и технологии совместно с государственным Национальным советом по науке и технике (НСНТ, NSTC).

Затем, уже в июле 2000 г., Рабочая группа и НСНТ выпустили более официальный документ, озаглавленный «Национальная нанотехнологическая инициатива: первые шаги и план по ее осуществлению», переданный через Белый дом членам Конгресса. *План*

по осуществлению определял суть нанотехнологии как «возможность работать на молекулярном уровне, атом за атомом, и создавать крупные структуры с фундаментально новой молекулярной организацией». Далее говорилось об «установлении контроля над структурами и устройствами атомарного, молекулярного и надмолекулярного уровней и приобретению знаний об эффективном производстве и использовании этих устройств», об «устройствах атомарного/молекулярного размера», а также о «природных наномашинках», способных осуществлять атомарно точную фабрику.

Это было достаточно четкое и ясное видение будущего.

На этой основе Конгресс принял решение о выделении средств, необходимых для осуществления Национальной нанотехнологической инициативы, ясно и четко сформулировав поручение о проведении исследований, посвященных атомарно точной сборке. В разделе закона, озаглавленного «Определения», утверждалось, что «термин „нанотехнологии“ означает науку и технологии, которые будут позволять изучать, измерять, манипулировать и осуществлять производство на атомарном, молекулярном и надмолекулярном уровнях» (отметим, что понятие «надмолекулярный» относится к молекулярной самосборке как части естественного пути в направлении инженерии атомарно точных молекулярных систем).

В этих документах описывались текущие задачи исследований в сфере АТП, сначала обещанные, а затем профинансированные. Я не участвовал в консультациях, но в целом поддерживаю принятые решения.

Затем произошло поразительное событие, не имевшее параллелей. Как если бы НАСА получило поддержку идеи космических полетов, а затем сделало «поворот кругом», обещая покорение человеком Луны, но без использования ракетной техники.

Располагая необходимым финансированием и находясь в условиях, когда к власти пришла новая админи-

страция, архитекторы, превратившиеся во влиятельных руководителей, «вычистили» из планов ННИ все упоминания об атомах или молекулах в связи с производством и дали новое определение «нанотехнологий», включив в него все достаточно малые объекты. В нанотехнологии вошли все крошечные частицы, а все, что было связано с атомарной точностью было изгнано. Продолжая рассказ, вновь обратимся к официальным документам.

В Конгрессе был разработан законопроект, определявший нанотехнологии как область, «в которой управление материей осуществляется на атомарном уровне (то есть атом за атомом или молекула за молекулой)»,⁴ вторя обещанию о «способности к работе на молекулярном уровне, атом за атомом». Однако через некоторое время ННИ объявил об изменении повестки исследований, удалив сущность нанотехнологии и переопределив область как:

Нанотехнологии означают достижение понимания и установление контроля над веществом в диапазоне масштабов от около 1 до 100 нанометров... На этом уровне физические, химические и биологические свойства материалов фундаментально и значимо отличаются от свойств отдельных атомов и молекул.

Другими словами, ННИ определяла принадлежность к нанотехнологии исключительно в зависимости от размера. При этом понятия «атомы» и «молекулы» не просто не использовались, но противопоставлялись «нанотехнологическим объектам». Для того чтобы вы осознали, насколько сильно изменились первоначальные планы, перечислим категории, о которых в новом документе больше не упоминалось.

4. Значительно позже, в 2008 г. на рассмотрение Конгресса был внесен законопроект, в котором понятия «атомарный, молекулярный и надмолекулярный уровни» были заменены «наноразмерным».

В 2000 г. в принятом НСНТ *Плане по осуществлению ННИ* в объяснениях видения атомарно точной нанотехнологии количество упоминаний атомов превышало сотню. В последующем документе, принятом в 2004 г. *Стратегическом плане Национальной нанотехнологической инициативы*, содержалось лишь три упоминания атомов, из них в основном тексте — всего одно.

В сопроводительном письме советник президента по науке Нил Лейн описывает нанотехнологии как «сборку материалов и компонентов атом за атомом или молекула за молекулой».

Но в основном тексте единственное упоминание об атомах содержится в приведенном выше определении, согласно которому атомы и молекулы находятся за рамками новой нанотехнологии.

И наконец, атомы вновь появляются в библиографическом списке, в котором цитируются давние обещания: *Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom* («Нанотехнология: формирование мира атом за атомом»). В то же время «наноразмерность» упоминается шестьдесят раз, а определение сущности нанотехнологии бесследно исчезло из текста.

* * *

Короче говоря, нанотехнологии теперь включали в себя все, за исключением основы былых обещаний, для выполнения которых и были выделены государственные средства. Прогресс в атомарно точной сборке непрерывно ускоряется, но только в молекулярных науках в отсутствие сколько-нибудь значительной поддержки со стороны ННИ и редко называется «нано».

Можем ли мы сказать, что ННИ финансирует действительно важные исследования? Да, конечно! Способствуют ли некоторые из этих исследований разработке передовых АТ-технологий? Да, конечно! Расширение нанотехнологии и включение в нее большего количества областей исследований несет с собой множество преимуществ. Проблема ННИ состоит не во включе-

нии, а в исключении — не в поддержке широкого круга исследований, но в узурпировании и отказе от рассмотрения самой основы нанотехнологий, в отказе от развития «способностей к работе на молекулярном уровне, атом за атомом».

Изменение такой величины, игнорирование самой основы исследований в документе, определяющем федеральное планирование, не является ни случайным упущением, ни игрой слов. Отправка концепции атомарно точной фабрикации в «дыру памяти» была лишь одним из этапов грязной научной войны, в которой на стороне ННИ, распределявшей миллиарды долларов, была задействована тяжелая артиллерия.

На пути к принятию программы, предусматривавшей финансирование на миллиард долларов, случилось что-то странное, — но что? Давайте отмотаем запись назад, в те дни, когда до выделения средств для ННИ оставалось совсем чуть-чуть. Однако принятие необходимого решения оказалось под угрозой.

Паника и финансирование в 2000 г.

Отказ руководства ННИ от своей миссии мог произойти только в результате некоего внутреннего переворота, вышедшего за рамки обычной политики. Я могу предложить не более чем частичное объяснение этого внезапного поворота. Мне представляется, что ключом к разгадке является последовательность событий, происходивших в середине 2000 г. Их основная причина — конфликт спирально развивавшихся фантазий 1990-х гг.

В январе 2000 г. президент США Билл Клинтон выступил с предложением о создании общенациональной программы по осуществлению исследований в области нанотехнологий. Затем в апреле 2000 г. Билл Джой из корпорации *Sun Microsystems* опубликовал в журнале *Wired* статью о технологиях будущего. Это было содержательное эссе, автор которого рассматривал широкий круг вопросов технологического развития (впоследствии оно

было «разобрано на цитаты»). По мнению Билла Джоя, испытывавшего тревогу относительно будущего робототехники, генной инженерии и нанотехнологий, исследования и технологическое развитие в каждой из этих областей могли, в той или иной форме, привести к вымиранию человеческого рода. По словам автора, его точка зрения на нанотехнологии сформировалась под влиянием моих «Машин создания», и он выступал за запрет на исследования в области нанотехнологий. Вслед за статьей Билла Джоя последовала шумиха в прессе и телевизионные интервью, вызвавшие немалый общественный резонанс, поставивший под угрозу планы политиков.

Решение о том, чтобы одобрить предложение о создании ННИ или отвергнуть его, должен был принять Конгресс. Сегодня легко представить себе, что охватившие общественность страхи могли, подобно снежному кому, вызвать лавину, которая унесла бы с собой всех сторонников нанотехнологий, навсегда лишив их «приза».

Между тем руководители, выступавшие за развитие нанотехнологий, поддерживали любые проявления веры в то, что технологии производства АТП-уровня тождественны наножучкам, что они представляют собой не более чем заведомо ложные обещания и абсурдные угрозы. Все выглядело так, как будто лидеры рассматривают всю совокупность этих идей как одну фатальную ошибку. В этой мифологии было запятнано и мое имя, а теперь Билл Джой по неосторожности снова подставил меня под удар.

Обратившись к официальным документам, мы можем получить представление о настроениях, царивших в узком кругу руководства. В докладе об итогах сентябрьского рабочего совещания, фактический пресс-секретарь по научным вопросам Ричард Смолли⁵ указал на то, что рассматривалось руководством как угроза:

5. В 1996 г. он вместе с коллегами был удостоен Нобелевской премии за открытие фуллерена — прекрасной в своей симметрии молекулы, спонтанно образующейся, например, в пламени свечи.

Основные страхи связаны с возможностью создания новой формы жизни, самовоспроизводящихся наноразмерных роботов, «нанороботов»... Они открывают простор для фантазий и ночных кошмаров в популярной концепции нанотехнологии... Мы не должны позволить этим расплывчатым ночным кошмарам отпугнуть нас от нанотехнологии... ННИ обязана двигаться вперед.

Другими словами, шумиха связанная с нанороботизированными жучками, финансированием, страхами и политикой не имела под собой ни малейших реальных оснований; в 2001 г. на страницах журнала *Scientific American* Р.Смолли открыто приравнял АТП в самом общем смысле к полчищам опасных нанороботов (разумных и готовых к преступному сговору, никак не меньше). Примерно в то же время, выступая на слушаниях в конгрессе и в других своих заявлениях, Смолли характеризовал атомарно точную сборку то как существенно важную, то как невозможную в принципе. Оценка моей роли колебалась вместе с генеральной линией. Смолли говорил обо мне и как о человеке, познакомившем его с нанотехнологиями и заразившем его своим энтузиазмом, и как о невежде, готовом к безрассудным действиям, обвиняя меня в запугивании «наших детей» сказками об ужасных нанороботах, которых он объявил моим изобретением. (Впоследствии Смолли выступил с критикой и учения Ч. Дарвина.)

Мы видим, что хаотически распространявшаяся паника могла привести к поспешным действиям, а также выступлению руководства ННИ против идей, воспринимаемых как угроза, хотя реальные события выходят за рамки этого сценария. Руководство сначала положительно восприняло идею атомарно точной фабрикации, добилось ее одобрения конгрессом и финансирования программы, а затем тихо «вычистило» из официальных документов любые упоминания об атомарной точности. Если бы не документы, мне было бы очень трудно поверить в возможность подобных действий. Мне очень трудно объяснить их даже в ретроспективе.

Усмирение

Скорее всего, резкий поворот, отраженный в официальных документах, был обусловлен скрытым тихим, но сильным давлением. Последнее привело к формированию в рамках нанотехнологических исследований, осуществлявшихся под эгидой ННИ, своего рода партийной линии.

Например, в конце 1990-х гг. в принадлежавшем НАСА Исследовательском центре Эймса осуществлялась относительно небольшая, но очень успешная программа по молекулярному производству (синонимом которого является АТП). Она предусматривала финансирование привлеченных исследователей из Калифорнийского технологического института и Окриджской национальной лаборатории, которым было поручено компьютерное моделирование инженерных разработок наномеханизмов. Принятие ННИ привело к закрытию этой программы (ее консультантами были многие мои коллеги).

Как межведомственная программа, ННИ оказала влияние на деятельность различных организаций и учреждений федерального правительства (не только НАСА). Тем самым нам приходится рассматривать ее как единственную «точку сбой», как институт, ответственный за утрату США лидирующих позиций в нанотехнологиях. Руководителям, которые несут полную ответственность за финансирование (и отказ в выделении денежных средств) исследований, не с руки комментировать отсутствие платья на своем короле. Для установления самоцензуры вполне достаточно понимания того, что твоя карьера может оказаться под угрозой. На орбите ННИ и в условиях быстрой поляризации взглядов, карьерный риск был вполне реальным и не мог не повлиять на качество дискуссий.

«Машины» стали источником вдохновения для многих интересующихся нанотехнологиями исследователей (не только Смолли). Некоторые из них начали делать карьеру в нанотехнологиях еще в то время, когда

в этой области царило правильное видение будущего. Но, оказавшись под давлением, они уже не могли говорить ничего против или обсуждать, изучать, формулировать или продолжать исследования вне согласованных исследовательских программ.

Стоимость альтернатив была огромной. Схемы финансирования были искажены. Что еще более важно, люди, считавшие себя экспертами в нанотехнологиях, укрепились в своих заблуждениях, которые затем начали распространять все шире.

Развитие событий в США отрицательно отразилось на исследованиях в области нанотехнологий, осуществлявшихся в других странах мира. Зарубежные руководители науки, естественно, были уверены в том, что ННИ была одной из самых передовых научных программ, финансирование и осуществление которой направлено на достижение декларируемых целей. В других странах цель, заключавшаяся в присоединении к глобальным усилиям, направленным на разработку чего-то подобного технологиям АТП-уровня, естественным образом была преобразована в поддержку внутренних исследований, примером для которых служила ННИ. Принять какое-либо иное решение было бы довольно трудно. Поэтому исследования в зарубежных странах характеризовались такой же, как в США (хотя и не такой ядовитой), динамикой двусмысленности, шумной рекламы и финансирования, а также схожей конфигурацией умов и интересов.

Наибольший ущерб, однако, был нанесен самим США. Сегодня финансирование исследований в сфере нанотехнологий осуществляется США, Европой и Китаем примерно в равном объеме. Однако что это означает на практике, не слишком понятно, в силу неопределенности самого понятия «нанотехнологий». Однако наиболее четко понятно, что сильные стороны США в большинстве наиболее релевантных нанотехнологиях областей были подорваны раной, которую страна нанесла сама себе.

Перечисленные выше проблемы, безусловно, являются временными. Силы противоборствующих сторон постепенно истощаются, появляются новые лидеры, изменяются точки зрения и предпринимаются соответствующие действия. Даже в США, по сравнению с прошлым, произошли значительные изменения.

Участвуя в деятельности нанотехнологического сообщества за пределами США, я нахожу его менее подверженным ошибкам и неразберихе, более открытым к дискуссиям и с большим уважением относящимся к фактам. Со временем, а также с учетом дистанции, измеряемой географией, культурами, институтами и научными дисциплинами, синдром отрицания сходит на нет. Устранению предвзятости в области нанотехнологий способствовали и независимые исследования.

*На пути к выздоровлению:
исследование на федеральном уровне
и дорожная карта*

В США функцию независимого источника научной экспертизы для федерального правительства выполняет Национальная академия наук. В 2003 г. Палата представителей конгресса приняла законопроект, в соответствии с которым на Национальную академию наук была возложена ответственность за руководство исследованиями в сфере молекулярного производства с целью «определения ключевых научных и технических барьеров... изучения текущего состояния технологического развития... [и] текущей и планируемой исследовательской деятельности». Соответствующие мероприятия должны были осуществляться в рамках анализа результатов трехлетнего исполнения планов НИИ. После того как палата представителей сделала этот запрос, одному из связанных с НИИ руководителей удалось убедить сенатора, входившего в согласительный комитет палаты представителей и сената, в необходимости исключения соответствующего пункта из закона. В то же время

за Национальной академией наук сохранялось право на расширение направлений исследований, которым она и воспользовалась.

В опубликованном тремя годами позже докладе Национальной академии наук упоминается мой анализ, результаты которого были представлены в *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* («Наносистемы: молекулярная машинерия, производство и расчеты»). Авторы академического доклада настаивали на необходимости финансирования программы экспериментальных исследований для изучения перспектив АТП-технологий и возможных путей их развития. Сегодня те, кто хотел бы получить институциональное подтверждение идей АТП, могут ссылаться на результаты этого исследования⁶.

В 2005 г., по мере улучшения отношения общественности к нанотехнологиям, стали возможны дальнейшие шаги в правильном направлении. По инициативе Алекса Кавчака (вице-президента отделения биопродуктов и наноструктурированных материалов Баттельского мемориального института) была организована разработка дорожной карты с участием нескольких американских национальных лабораторий под общим руководством Баттельского института. Я присоединился к этому проекту как соруководитель. В его рамках две сотни участников изучали направления исследований, которые способствовали бы разработкам различных технологий АТП. Как рассказывал мне Алекс, в самом начале проекта его потенциальные участники испытывали немалые опасения по поводу того, как он отразится на их карьерах. Ближе к его окончанию эти страхи почти полностью исчезли.

С течением времени репрессии прекратились, но я уверен, что в ближайшие годы еще услышим их отзвуки.

6. Ни для кого не стало неожиданностью, что руководители ННИ никак не откликнулись на содержащиеся в докладе рекомендации.

Наука, техника и возможность

Мы убедились, что основным составляющим, отсутствием которого стало главным препятствием на пути к АТП, был не научный прорыв, но прорыв в осознании основного предназначения и организации. Казалось, что ННИ позволит заполнить этот пробел. Однако в действительности эта программа стала тормозом в развитии нанотехнологий. Она не позволила устранить исходную структурную проблему создания новой области атомарно точной техники на фундаменте, построенном благодаря научной культуре.

Сегодняшние возможности куда шире, чем раньше.

Достижения в таких областях, как структурные ДНК-нанотехнологии и белковая инженерия, прогресс в молекулярных науках, обеспечили создание еще более прочного фундамента для систематического инженерного конструирования молекулярных систем. В последнее десятилетие были созданы достаточно мощные средства проектирования и строительства молекулярных компонентов.

Мы уже располагаем различными технологиями производства компонентов. Пришло время научиться собирать из них более крупные продукты. Решение этих задач в значительной степени зависит от организационной культуры.

Как ускорить прогресс

В ОДНОЙ из предыдущих глав вы познакомились с притчами об элѐфантологах и автомобилистах, двух исследовательских сообществах, организация которых основывалась на любознательности. Элѐфантологам удалось получить согласованный результат, выразившийся во все более глубоком понимании предмета исследований; их научные описания основывались на изучении собственно слонов. Автомобилистам, напротив, так и не удалось создать ничего похожего на самоходную машину, так как движущей силой их исследований была любознательность, а не стремление к проектированию на системном уровне. Не имея согласованной концепции проекта автомобиля, невозможно ни определить направление исследований, ни создать основу для получения непротиворечивых результатов. Автомобилисты разработали различные компоненты будущей самоходной машины (колеса, передаточный механизм, устройства, напоминающие двигатель, и тому подобное). Но в большинстве своем компоненты не соответствовали друг другу и не могли быть применены для обеспечения движения и создания должным образом функционирующей системы. В частности, к числу модных никогда не относились исследования тормозной системы. Более того, никто из ученых даже не задумался о необходимости дифференциальной передачи.

Мораль этих историй такова: независимо от того, насколько наукоемким является проект, для получения конкретных инженерных результатов необходима ко-

ординация усилий, в центре которой находились бы конкретные инженерные цели и задачи. Независимо от того, называют ли руководители проекта себя инженерами или нет (и первоначально руководство может быть рассредоточенным), основной вопрос заключается в том, известно ли руководящему сообществу, как следует осуществлять координацию деятельности большого количества групп для того, чтобы создать сначала комплекс сочетающихся друг с другом технологий, а затем и работоспособные системы.

Данное правило действует и в физике высоких энергий с ее ускорителями стоимостью в миллиарды долларов, детекторами и системами обработки данных, и в космонавтике с ее космическими кораблями и марсоходами стоимостью в миллиарды долларов. Оно же распространяется и на исследование с бюджетом в десять миллионов долларов, результатом которого становятся передовые системы секвенирования ДНК. Все эти системы являются продуктами наукоемкой техники, поставленной на службу науки.

В аналогичных целенаправленных усилиях, а также предварительных разработках, направленных на повышение их эффективности, нуждается современная инженерия атомарно точных молекулярных систем. Назрело время сделать этот следующий шаг. Мировое исследовательское сообщество продвинулось далеко вперед по избранному пути. Теперь необходимо направить усилия на разработку комплексной системы сочетающихся друг с другом технологий и компонентов.

Технологическая платформа такого типа — основа для более эффективного и систематического инженерного конструирования — способна обеспечить достижение научных и практических целей. Если говорить о перспективе, то наиболее важное ее практическое приложение будет заключаться в создании систем начального уровня для руководства молекулярной сборкой следующего поколения, дополняющей самосборку с мягким стереотактическим контролем.

Создание дорожной карты

(Образцовую модель скоординированных исследований, направленных на разработку передовых технологий, предлагает нам полупроводниковая отрасль. Помимо прочего, достижения инженеров отрасли позволяют нам более глубоко осознать масштаб возможных результатов прикладываемых усилий, так как они являются основной движущей силой информационной революции, одним из проявлений которой стало создание наноразмерных цифровых информационных систем.

Ключом к успеху отрасли было создание дорожных карт, путем которых не только осуществлялась координация исследований и разработок, но и, в частности, был реализован механизм подготовки взаимодополняющих планов и обмена уверенностью в том, что успех в реализации каждого из них по отдельности может в итоге привести к вкладу в общее целое. Таким образом, дорожные карты могут помочь решить проблему координации планов.

Дорожная карта для закона Мура

Формализованный процесс разработки дорожных карт с горизонтом планирования 15 лет способствует продвижению революционного закона Мура в электронике уже несколько десятилетий. В результате этого совместного усилия всех участников отрасли создан и постоянно обновляется такой грандиозный документ, как «Международная дорожная карта развития полупроводниковой технологии» (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS).

Составление дорожной карты способствовало ускорению прогресса посредством координации усилий и ограничения риска в процессе выполнения тех действий, которые действительно необходимы.

Каждое поколение фотолитографии требовало вне-

дрения нового комплекса усовершенствованных и сочетающихся друг с другом технологий (источников света, оптики, масок, степперов, резистов и множества других операционных технологий). Для того чтобы уверенно инвестировать средства в разработку источников света с наименьшей длиной волны (обладающих адекватной апертурой и яркостью) в конкретный момент времени, нужно точно знать параметры будущего рынка. В свою очередь, рынок будет существовать только в том случае, если другие компании готовы поставлять сочетающиеся с новым источником света оптику, маски, степперы и все остальное, и только тогда, когда крупнейшие производители планируют создание производственных мощностей, использующих новое поколение технологий.

Процесс ITRS способствует большей уверенности и закреплению общих ожиданий в формальных публичных документах. Одновременно он открывает возможность развития взаимных ожиданий участвующих в процессе экспертов и корпораций.

Дорожная карта для квантовых информационных систем

Дорожная карта по развитию науки и технологии в области квантовой информации (*Quantum Information Science and Technology Roadmap*, QISTR) — еще один пример прокладки научного и технологического маршрута в области, отличающейся неопределенностью с точки зрения практического внедрения технологий. Участники ITRS могут быть уверены, что в ближайшее время в отрасли будет безраздельно царить кремний. В отличие от них, участникам QISTR приходится иметь дело с целым рядом различных конкурирующих подходов: квантовые биты, представленные состояниями (одним или несколькими) атомов, удерживающихся внутри ловушек в вакууме; спиновые состояния атомов в толще кремния; ядерные спины жидкофазных молекул; или

фотоны в чистой фотонной системе. Они принципиально отличаются друг от друга с точки зрения масштабируемости и технологичности, а также диапазона реализуемых функций.

Поэтому документ QISTR должен быть более абстрактным, чем ITRS. Он с необходимостью сосредоточен не на метриках результатов, а на принятии «критериев Ди Винченцо» (включая масштабируемость, универсальность ключей, время декогерентизации и соответствующие способы измерения входных и выходных состояний). По этим критериям оцениваются основные функциональные возможности, которые впоследствии используются в рамках QISTR для сравнения различных подходов и их потенциала выйти за пределы непрактичных прототипов.

QISTR показывает как сообщество может исследовать области, в которых имеется большое количество альтернатив, идентифицируя технологии, действительно обладающие потенциалом исполнения той или иной роли в функциональной системе, и отставляя в сторону бесперспективные. (Например, для демонстрации основных принципов использовались технические приемы ядерного магнитного резонанса в жидкой фазе, но они не могли быть масштабированы более чем на несколько битов; поэтому они не проходят отбор в качестве основы для дальнейших разработок).

Разработка дорожной карты для АТП

Разработка атомарно точных нанотехнологий — непрерывный процесс. Как упоминалось выше, первая попытка прокладки технологического маршрута предполагала достижение целей системного уровня (проект Баттельского мемориального института с участием нескольких американских национальных лабораторий). В итоговом документе *Productive Nanosystems: A Technology Roadmap* («Производительные наносистемы: технологическая дорожная карта», PNTR) представлен обзор

путей, ведущих от современной атомарно точной сборки к атомарно точному производству. Прочитируем аннотацию:

Эта первоначальная дорожная карта отображает небольшую часть огромной территории. Но даже ограниченные по масштабу изыскания позволяют открыть богатые плодородные земли. Более глубокая интеграция знаний, содержащихся в журналах, базах данных и человеческом разуме способна помочь нам составить более точную информативную карту. Решение этой задачи должно быть приоритетным. Некоторые исследовательские пути ведут в направлении обычных практических приложений, другие — к стратегическим целям, благодаря достижению которых открываются самые широкие возможности, множество новых путей и создаются новые области исследований и разработок. Эти пути находились в центре внимания тех, кто работал над дорожной картой. Они требуют дальнейшего изучения.

План PNTR занимает промежуточное положение. Подобно QISTR он направлен на изучение альтернативных технологических комплексов. В то же время те, кто составлял QISTR, четко осознают общий характер работоспособных систем. В этом смысле АТ-технологии напоминают полупроводниковые, хотя ITRS, в отличие от PNTR, опирается на многолетний опыт, когда каждое технологическое поколение становилось основой для создания следующего. Дорожные карты эволюционируют вместе с технологиями, для которых они разрабатываются.

Наукоемкая техника

Оптимальный способ сохранения равновесия организации и управления зависит от характера задач и природы области исследований и разработок. В полупроводниковых технологиях существует воронка, раскрывающаяся в сторону фундаментальных наук, сосредоточенных

на поиске новых явлений в новых материалах и процессах, и сужающаяся в сторону целенаправленного решения проблем для систем, которые будут использоваться в микросхемах следующего поколения, с четко сформулированными требованиями относительно разрешения литографии, свойств подзатворного оксида и всего остального. Широкая часть воронки, фундаментальные исследования, определяют общее направление в сторону ее более узкого конца, где научные изыскания превращаются в разработки и пошаговое улучшение процесса производства.

Когда технология еще далека от стадии зрелости, далека от выпуска успешных поколений продуктов, ее требования не могут быть полностью осознаны. На начальном этапе развития технологии четко очерченной воронки (как в случае полупроводниковой технологии) не существует. Фундаментальная наука может быть развита сравнительно хорошо (как и широкий, образуемый фундаментальными исследованиями конец формирующейся воронки), но конечные цели все еще остаются довольно расплывчатыми. Однако даже на ранних стадиях, когда основная деятельность будет (и должна) носить наукоемкий характер (когда основной движущей силой является любопытство), она может не иметь определенных ориентиров направления; при этом деятельность может быть тем или иным образом связана с критериями и метриками перспективных инженерных приложений.

В наши дни на этой ранней стадии находится инженерия молекулярных систем, испытывающая проблемы с пониманием общего направления развития. Ее прогрессу может помочь расширение общих знаний, но скорость движения вперед будет определяться, прежде всего, более глубоким пониманием возможных целей и приобретением новых знаний о способах их достижения. Инженерия молекулярных систем находится на стадии развития. Вопрос заключается в том, как действовать дальше, в каких направлениях и с какими амбициями по отношению к достижению результатов.

*Путь, предстоящий инженерии
молекулярных систем*

Причины необычности данного примера мы рассмотрели ранее. Открытые пути ведут к огромному вознаграждению, к созданию классов физических систем, выходящих далеко за пределы обычных горизонтов экспериментальных исследований. В то же время по целому ряду технических причин задача изучения и анализа более дальних целей является более легкой, чем задача изучения и анализа первоочередных целей. Например, пока у нас отсутствует техническая возможность внедрения компонентов машин, основывающихся на жестких ковалентных структурах, хотя задача их проектирования и моделирования с использованием стандартного программного обеспечения вычислительной химии полностью решена. Эта беспрецедентная ситуация требует применения методов исследовательской инженерии ко всему спектру технологических уровней с целью углубления понимания потенциальных путей и направлений необходимых исследований.

Как уже отмечалось, в центре некоторых из этих наиболее перспективных областей находятся макромолекулярные структуры, самосборка, а также проектирование и моделирование на основе вычислительных методов. Другие области исследований дополняют эту основную линию развития. Они включают в себя достижения из самых разных областей нанотехнологии в ее достаточно широком смысле, как это определено сейчас. Некоторые из них являются атомарно точными, другие — нет.

Мы видели, что технологический континуум простирается от чистой самосборки до стереотактических методов, применяемых и к самосборке, и к слабо контролируемому позиционированию, включая в себя все способы жесткого контроля над перемещениями, необходимые для передового АТП. Этот градиент методов сборки и продуктов может быть пересечен посред-

ством осуществления серии небольших успешных шагов. Нельзя сказать, что дорога будет короткой, но мы способны пройти ее от начала и до конца.

Там, где развитие вызывает определенную тревогу, основные трудности никак не связаны с техническими проблемами. Важнейшую роль в данном случае играет человеческий фактор: необходимо изменение предмета обсуждений, выработка общего понимания перспектив и формирование исследовательской среды, способствующей установлению более информированного и скоординированного фокуса инженерных задач.

* * *

В приложении II мы пристальнее рассмотрим технологический градиент от современных лабораторных возможностей к разработке технологий АТП-уровня. Мы увидим, что несколько измерений поступательного развития естественным образом соответствуют друг другу, включая достижения в создании новых материалов, устройств, систем и инструментов проектирования. На предстоящей перед нами картине мы увидим, какие большие шаги могут быть осуществлены нами на пути, образованном близко расположенными друг к другу ступеньками.

Из этого обсуждения следует несколько общих выводов. Один из них заключается в том, что многие ведущие вперед дороги являются достаточно широкими и на них остается множество неизведанных участков. Например, несколько лет назад новые открытия в сфере структурных ДНК-нанотехнологий неожиданно привели к появлению интереснейших и очень перспективных возможностей. Кроме того, оказалось, что темпы общего прогресса будут задаваться скоростью развития технических приемов (физических и вычислительных), позволяющих ускорить и повысить предсказуемость циклов проектирования. И наконец, сокращение длительности циклов проектирования означает, что темпы прогресса могут ускориться настолько, что даже в случае высокой



РИС. 3. Пути к созданию производства и продуктов АТП-уровня

прозрачности исследовательских программ, некоторые результаты способны будут заставить врасплох весь мир.

В свете этой перспективы, оценка последствий, которые будет иметь внедрение передового АТП с точки зрения глобальных проблем современности, отнюдь не является преждевременной. Имеются в виду, в частности, последствия для таких неразрешимых сегодня проблем, как климатические изменения. Я полагаю, что пришло время рассмотреть возможные революционные последствия технологий АТП для общества, экономики и международных отношений. Мне представляется, что они будут очень глубокими, и по мере приближения трудностей для нас будет существенно важным правильное понимание основных вариантов выбора, позволяющих избежать ненужных рисков и управлять потенциально катастрофическим успехом.

Если говорить о дне сегодняшнем, то у нас нет ни малейших оснований рассматривать АТП как способ бы-

строого решения насущных проблем. Но было бы в равной степени неразумно откладывать соответствующий анализ в долгий ящик. Консервативная оценка должна учитывать весь диапазон неопределенностей, включающий в себя и медленный, и быстрый прогресс.

Давайте вернемся к тому, что могут сказать нам о потенциале АТП современная физика и техника, если рассматривать их ответы через линзы человеческих потребностей и желаний.

Часть VI

Будущие перспективы



Преобразование материальной основы цивилизации

КАКИМИ могут быть естественные практические следствия использования материальных возможностей технологий АТП-уровня? Какое значение они будут иметь для людей и Земли? Методы исследовательской инженерии дают лишь частичное представление, но даже то понимание, что они нам дают, является серьезным основанием для призыва к серьезному переосмыслению перспектив XXI столетия. На практике такое переосмысление должно начинаться с малых шагов, с попытки найти ответы на ключевые вопросы (потенциал технологий, время их доступности, ограничения и различные варианты стратегии). Затем, в зависимости от полученных ответов, мы попытаемся минимизировать наши риски: интеллектуальные, технологические, финансовые, политические и так далее.

Как отмечалось в главе 11, основные материальные возможности включают в себя недорогое производство высококачественных материалов и, в дальнейшем, компонентов продуктов самого разнообразного типа: более прочные и легкие структуры, более совершенные двигатели, более безопасные, более экологичные, более производительные компьютеры. Преимущества атомарной точности, безусловно, распространяются и на медицину, в которой молекулярные взаимодействия имеют решающее значение.

С точки зрения технологий решающую роль играют издержки. Поэтому до тех пор, пока затраты не достигнут приемлемого уровня, самые высокопроизводительные технологии будут оставаться лабораторными диковинками. Но в случае производственных технологий АТП-уровня, высокая производительность является практически синонимом производства с низкими издержками. Технологии, предлагающие более высокую по сравнению с наилучшей производительность вместе с более низкой, чем наинизшая себестоимость, представляют собой редкий феномен взрывной технологии. Это как раз то, что АТП должно нам дать, и отнюдь не только в каком-то одном секторе промышленности.

Эти общие характеристики результатов использования технологий уровня АТП и издержек — с учетом того, что мы ни словом не обмолвились о связанных с ними принципиально новых возможностях, — повлекут за собой далеко идущие изменения. В рамках этой главы будут перечислены лишь некоторые самые естественные последствия применения АТП в нескольких наиболее важных сферах. В соответствии с духом исследовательской инженерии, цель предлагаемых описаний заключается в том, чтобы представить не наилучшие в технологическом смысле возможности, а низшую границу использования высокопроизводительных технологий, чтобы оценить ожидаемый интервал гарантированно достижимой производительности.

Несколько слов о потребительских продуктах

Использование технологий АТП-уровня позволит расширить диапазон доступных нам продуктов для вождения, ношения или занятия спортом: удобства, развлекательные системы и широкий спектр товаров широкого потребления. Читатель легко увидит результаты применения новых технологий производства в потребитель-

ской сфере: они начинаются со значительного снижения себестоимости и включают в себя набор технологических решений, как улучшенных, так и совершенно новых.

Во многих случаях они будут оказывать неожиданные по своей природе и последствиям воздействия. Например, никто не мог предсказать, какую роль сыграет появление и широкое распространение автомобилей в изменении структуры городов и повседневной жизни их жителей. Точно так же никто не предвидел появления современного Интернета и его превращения в неотъемлемую часть повседневного человеческого опыта. Размышления на эту тему имеют ценность только тогда, когда они воспринимаются с достаточной долей скептицизма, и в нашем случае они выходят за рамки анализа.

Потребительские товары являются неотъемлемой частью нашей жизни; в то же время они не образуют ее фундаментальный физический базис. Именно на этом глубинном уровне можно ожидать изменение основных движущих сил, причем с достаточно большой уверенностью.

Преобразование средств производства

Для того чтобы более глубоко осознать последствия грядущей трансформации, было бы полезно рассмотреть отличия АТП от современных промышленных технологий. Как мы уже видели, источником основных отличий являются два основных свойства технологий АТП-уровня: наноразмерные компоненты и атомарная точность процессов и продуктов. С точки зрения перспектив практического применения АТП они определяют ряд ключевых следствий.

Во-первых, наноразмерность открывает возможность кардинального повышения продуктивности, что является следствием законов механического масштабирования. Кроме того, небольшие универсальные и высокопроиз-

водительные машины способны схлопнуть глобальные технологические процессы до всего лишь нескольких стадий, включающих в себя этап получения очищенных исходных материалов из сырья, этап производства стандартных микроблоков из исходных материалов и этап сборки микроблоков в продукты, выполняющие совершенно разные функции: солнечных батарей и космических кораблей, автомобильных двигателей и бетона, компьютеров и медицинских инструментов. Малое число стадий и гибкость производства дают возможность коренной децентрализации промышленности.

Во-вторых, атомарная точность начинается с запасов низкомолекулярного промышленного сырья, атомарно точного по самой своей природе и в большинстве случаев доступного по низкой цене в расчете за килограмм. Последовательность шагов атомарно точной обработки обеспечивает точный контроль структуры материалов и компонентов, позволяя получать продукты с характеристиками, превосходящими свойства обычных аналогов в 10–1 000 000 раз. Поскольку атомарно точное производство контролирует как конечные, так и побочные продукты, АТП-системы не станут источником опасных выбросов.

И промышленность, и АТП производят материальные продукты, но их сравнение приводит к выводу о кардинальных отличиях. Как мы видели, информационная революция предлагает альтернативную модель.

Производство атомарных структур с использованием технологий, основывающихся на АТП, во многом напоминает создание последовательностей битов с помощью информационных технологий. Быстрое производство, основывающееся на многозадачных, масштабируемых платформах; независимость от протяженных, специализированных цепочек поставок; потенциал радикальной децентрализации; важнейшая роль программного обеспечения и получаемых в режиме реального времени данных; новые продукты, не требующие значительных капиталовложений; низкие предельные издержки

производства и дистрибуции; потенциал быстрого глобального распространения новых продуктов — все эти свойства объединяют АТП и информационные технологии. И этим они резко отличаются от характеристик современной промышленности.

Преобразование информационных технологий

Внедрение производства, основывающегося на АТП, придаст новый импульс информационной революции. На физическом уровне информационных технологий, на котором быстрые изменения приобрели уже рутинный характер, атомарно точное производство способно ускорить уже наблюдаемые тенденции, способствуя их дальнейшему (и, вероятно, более быстрому) развитию, выходящему за прогнозируемые пределы.

Современные компьютеры, телекоммуникации, сенсоры, дисплеи и все, что дают нашей повседневной жизни, экономике и обществу, стало возможным благодаря продолжающейся в соответствии с законом Мура производственной революции. Экспоненциальный рост привел к тому, что одна современная микросхема превосходит по производительности устройства, которые десять лет назад называли суперкомпьютерами.

Но экспоненциальный прогресс не может продолжаться бесконечно, и предел современных технологий производства полупроводниковых микросхем уже виден. Начиная с 1970-х гг., размеры транзисторов уменьшились примерно с десяти тысяч диаметров атома до десяти его диаметров, хотя изначально они создавались с использованием методов, по определению не позволявших добиться атомарной точности. Технологии АТП-уровня открывают возможность продвинуться гораздо дальше, но как далеко — будет зависеть от успехов других технологий, которые постоянно совершенствуются. Скорее всего, специализированные техноло-

гические процессы АТ-производства позволят создавать гибридные микросхемы, что сгладит процесс перехода.

Оценить возможные улучшения в сравнении с современными технологиями гораздо проще. Мы можем ожидать сокращения потребления энергии (по сравнению с наиболее экономичными современными процессорами сопоставимой вычислительной мощности) с милливатт до нановатт и уменьшения размеров процессора с миллиметров до микрометров, что в пересчете на объем дает фактор в один миллиард. Рост производительности одноядерных процессоров зависит от роста тактовой частоты. Фундаментальные физические ограничения позволяют предположить, что остающийся в запасе потенциал повышения тактовой частоты будет меньшим, чем тот, свидетелями которого мы были в процессе эволюции транзисторных устройств.

Стоимость телекоммуникаций снизились в еще большей степени, чем затраты на вычисления. Современные технологии позволяют передавать терабиты информации по волоконно-оптическому кабелю диаметром несколько десятков микронов каждую секунду. Вместе с быстрым ростом мощностей волоконно-оптических сетей, активно развивается и беспроводная связь. В настоящее время (2012 г.) беспроводной доступ в Интернет (WiFi) позволяет передавать десятки мегабит в секунду и отрасль планирует увеличить мощность устройств не менее, чем в 100 раз. При этом до физических пределов скорости передачи данных пока еще довольно далеко.

И вновь технологии АТП-уровня, вероятно, будут способствовать увеличению мощностей и снижению издержек. В расчете на единицу массы, важнейшая электронная начинка современных телекоммуникационных систем стоит более \$1000 за килограмм, что оставляет пространство для сокращения издержек в тысячи раз. Повышение производительности оценить труднее, но и оно, вероятно, будет значительным.

Цифровые информационные системы взаимодействуют с миром посредством датчиков, дисплеев и кон-

трольных сигналов. Что касается сенсоров, лабораторных устройств и высококласных коммерческих систем, то они уже нащупали нижний предел того, чего можно ожидать. Например, чувствительность цифровых камер уже приближается к квантовому пределу и работе в режиме счета фотонов. Химические сенсоры способны распознавать единичные молекулы. Можно ожидать, что вскоре будут созданы быстрые устройства для считывания ДНК с себестоимостью получения информации, близкой к нулю. Что касается дисплеев, то уже существует множество устройств, испускающих свет и изменяющих отражательную способность, достигших по показателю разрешения пределов человеческого восприятия. Области усовершенствований включают в себя носимые устройства и трехмерные изображения, сравнимые по качеству с видом за окном. Но если мы говорим об управлении механизмами, то наиболее впечатляющих достижений следует ожидать не в сфере контроллеров, а среди самих устройств.

Если собрать все элементы мозаики вместе, то возможные направления применения информационных технологий, позволяющих использовать АТП, включают в себя воплощение самых совершенных форм того, что можно вообразить — повсеместных вычислений, сетей, информационные сервисов и наблюдения. В какой степени этот потенциал будет реализован, нам еще предстоит увидеть. Но будет лучше, если вместо пассивного наблюдения мы примем участие в оценке, обсуждении, переговорах, законотворчестве и реализации.

Преобразование инфраструктуры

Промышленное оборудование

Естественным результатом внедрения атомарно-точного производства в широкий круг отраслей станет сокращение капитальных затрат на закупку и эксплуатацию промышленных систем, включая крановое и транспор-

тировочное оборудование, производственные мощности и такие коммунальные услуги, как вода и электроэнергия. Позже мы уделим внимание коммунальным услугам, но сначала рассмотрим такие базовые отрасли, как строительство и транспорт.

Строительство

Технологии АТП-уровня позволят улучшить эксплуатационные характеристики используемых в строительстве материалов, структур и функциональных компонентов, при одновременном снижении стоимости их производства и применения. Поскольку стоимость в расчете на килограмм веса большинства применяемых в строительстве структурных материалов (например, бетона) и так невелики, эффект снижения себестоимости, скорее всего, будет скромным и в конечном итоге будет зависеть от обстоятельств применения АТП. Напротив, в сфере функциональных материалов открывается широкий простор для возможных усовершенствований.

Например, вакуумные аэрогели (пока еще довольно дорогие и хрупкие) способны вытеснить широко используемое в строительстве в качестве изолирующего материала стекловолокно, обеспечивая такую же теплоизоляцию при десятикратно меньшей толщине. Изоляционные материалы, производимые по новым технологиям, будут обладать такими же или лучшими свойствами, но при этом будут более разнообразны и дешевы. В области технологий обогрева или охлаждения ожидать больших прорывов не приходится, так как в обоих случаях уже почти достигнут термодинамический предел эффективности, но, опять же, продукты, превосходящие по своим свойствам самые лучшие образцы современности, могут быть произведены гораздо дешевле и поэтому получают более широкое распространение. Так, тепловые насосы и воздухо-воздушные теплообменники позволяют экономить энергию, но их сегодняшняя стоимость ограничивает их использование.

Значительную часть затрат на строительство составляет стоимость сборки различных конструкций. Существенные улучшения могут быть достигнуты благодаря производству недорогих, сборных, но очень точно подогнанных друг к другу сегментов крупных структур — легких, свободно транспортируемых и собираемых.

Транспорт

Меньшая себестоимость производства, более прочные и легкие материалы, двигатели с большей удельной мощностью и эффективностью, безотходные источники энергии — все это позволит добиться снижения издержек транспортировки, включая воздействие на природную среду.

В наибольшей степени преимущества проявятся там, где издержки являются очень высокими, а эксплуатационные характеристики имеют решающее значение. К таким областям принадлежит авиакосмическая сфера в целом и космических систем в частности. В наши дни стоимость выхода в космос почти не зависит от энергетических требований (что удивительно), и едва ли не полностью определяется издержками, массой и надежностью космических аппаратов. Несколько десятилетий назад стоимость космических полетов стала непреодолимым барьером на пути к осуществлению мечты о внеземных поселениях, но со временем этот барьер должен пасть.

Преобразование сферы энергетики, ресурсной области и сельского хозяйства

На промышленное оборудование, строительство и транспорт приходится значительная доля современной экономики. Изменение материальной основы этих сфер будет иметь самые широкие последствия, включая изменения в структуре спроса и предложения ресурсов.

Энергия

Если посмотреть на спрос, то технологии АТП-уровня приведут к повышению эффективности (в некоторых случаях весьма значительному) потребления энергии в самых различных областях. Рост эффективности преобразования энергии, уменьшение массы автомобилей, улучшение теплоизоляции и энергосберегающее освещение — вот только некоторые из примеров. В сфере наземных и воздушных перевозок доступные усовершенствования включают десятикратное уменьшение массы транспортных средств и удвоение средней эффективности двигателя. Совокупность таких изменений приведет к значительному снижению спроса, в то время как низкие издержки производства откроют возможность быстрой замены и модернизации используемых систем. Другие положительные моменты (снижение вредных выбросов, повышение безопасности, увеличение производительности и так далее), скорее всего, будут способствовать ускорению замены существующих основных производственных фондов.

Со стороны предложения усовершенствования технологий и снижение издержек открывают возможность повсеместного и быстрого замещения и модернизации энергетической инфраструктуры. Энергетическая отрасль является в высшей степени неоднородной, но каждый ее сектор является капиталоемким; поэтому снижение затрат на приобретение основных производственных фондов будет означать уменьшение издержек на установку нового оборудования всех типов и будет способствовать замещению основного капитала самыми высокими в истории темпами.

В частности, усовершенствование технологий и снижение издержек ускорит развитие солнечной энергетики. Это означает, что современные тепловые электростанции, работающие на угле (в США их количество достигает 2300), столкнутся с угрозой быстрого замещения. В сочетании с эффективными и недорогими

технологиями взаимного преобразования электрической и химической энергии, построенными на базе АТП, солнечная энергетика способна обеспечить и основную электрическую нагрузку, и получение жидкого топлива в глобальном масштабе. Как отмечалось в главе 11, для создания эффективных наноструктурированных тонкопленочных фотоэлементов могут использоваться широко распространенные на Земле элементы. Произведенная с их помощью электроэнергия может храниться как в виде привычного нам жидкого топлива, с последующим преобразованием в электричество для использования в автомобилях или энергетической инфраструктуре.

Что касается вопросов мощности и эффекта, то для удовлетворения текущего глобального спроса на энергию (он оценивается примерно в 15 тераватт, включая используемые для отопления дерево и компост), потребовалось бы около 0,2% площади земной суши, или около 1% территории, используемой сегодня для выпаса скота и выращивания сельскохозяйственных культур. Большую часть необходимых мощностей могли бы обеспечить панели солнечных батарей, изготавливаемые из жестких, износоустойчивых композитных материалов, которые могли бы размещаться на крышах домов и дорогах.

Сырье

В производстве используются сегодня и будут применяться и завтра самые разнообразные материалы в качестве сырья. Данное обстоятельство затрудняет поиск ответа на вопрос о том, как технологии АТП-уровня повлияют на сырьевой спрос. В главе 11 мы изучали это отношение и пришли к выводу, что внедрение АТП способно привести к сокращению спроса на редкие ресурсы двумя путями:

1. Создавая возможность использовать для осуществления общих функций более легкие решения

(архитектурные и механические структуры, электрическую проводку, электронные системы и так далее).

2. Создавая возможность применения широко распространенных элементов (прежде всего, водорода, углерода, азота, кислорода, алюминия и кремния) для замены редких материалов (меди, никеля, кобальта, цинка, олова и других) в большинстве решений, одновременно с увеличением их характеристик.

Эти изменения способны значительно ослабить давление, оказываемое редкостью ценных ресурсов, во многом обуславливающее происходящий в наши дни рост международной напряженности. В отношении материалов, все еще пользующихся высоким спросом, повышение эксплуатационных характеристик промышленного оборудования и снижение его стоимости может привести к сокращению затрат на добычу сырья, его очистку, контроль над загрязнением природной среды и рекультивацию. (Заметим, что более ранние оценки издержек атомарно точного производства основывались на узком понимании экономического контекста, игнорировавшем перспективы снижения стоимости используемых в производстве исходных материалов и энергии.)

Вода

Непрерывно нарастающая нехватка воды, используемой для нужд людей и сельского хозяйства, является одной из наиболее насущных глобальных проблем, усугубляемой ростом численности населения, ухудшением состояния природной среды и климатическими изменениями. Доступная энергия и низкая стоимость продукции промышленного назначения могут непосредственно повлиять на решение этой проблемы, так как они способствовали бы уменьшению затрат на опреснение морской воды и доставку пресной воды потребите-

лям. Атомарно точная сборка позволяет производить специальные мембраны, способные пропускать только молекулы воды, что открывает возможность создания высокопроизводительных систем обратного осмоса, применяемых для опреснения морской воды, и (что имеет решающее значение) может снизить издержки производства, очистки и вторичной переработки мембран и других подверженных загрязнению поверхностей.

Сельское хозяйство

На сельское хозяйство приходится более 80% мирового потребления запасов пресной воды. В результате происходит ее загрязнение связывая ресурсные и экологические факторы с потенциалом усовершенствования методов ведения аграрного производства.

На протяжении большей части XX столетия, темпы производства зерновых культур опережали темпы роста населения Земли, сравнявшись с ними в 1990-е, после чего начали отставать, в то время как цены на продукты питания начали расти, и в последнее время — стремительно. К тревогам относительно эффекта от изменений климата и недостатка воды добавились страхи, вызванные возможной нехваткой продовольствия. И вновь производство, основанное на атомарно точных технологиях, способно удовлетворить растущий спрос, соблюдая при этом строгие экологические правила.

Для увеличения производства продовольствия весь мир традиционно использовал три основных метода: расширение площадей обрабатываемых земель, применение химических удобрений и повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Эффективность каждого из этих методов со временем падает, поскольку площадь новых плодородных земель уменьшается, эффект от удобрений с каждым применением снижаются, а потенциал выращивания более урожайных культур ограничен температурными условиями, качеством поч-

вы и доступностью воды. Последнее ограничение приводит к тому, что в засушливые годы урожай может быть сведен к минимуму или его вообще не удастся собрать.

Сельскохозяйственное производство в обособленных закрытых местах (например, в теплицах) позволяет значительно увеличить и стабилизировать урожайность выращиваемых культур, в значительной степени освобождая производителя от ограничений, связанных с температурой, почвой и водой. В сравнении с незащищенной средой, где условия произрастания определяются особенностями местоположения земель и климата, использование контролируемой среды позволяет добиться повышения продуктивности земли в 10 и более раз.

Оптимизация условий роста требует использования таких обособленных закрытых мест, в которых имелась бы возможность контроля над температурой (местный климат должен быть теплым, но ни в коем случае не слишком жарким), влажностью (обычно высокой, но не предельной), освещенностью (обычно свет должен быть ярким, но рассеянным, а не прямым) и почвой, в которой должно быть достаточно азота, фосфора и калия. Хорошо контролируемое обособленное закрытое место позволяет не допустить проникновения вредителей, избавляя от необходимости использования пестицидов, а также повторно перерабатывать азот и фосфор, применяя полученную продукцию в качестве удобрений и избегая загрязнения природной среды.

Важнейшим условием широкого распространения контролируемого сельскохозяйственного производства является доступность основных материальных фондов в форме структурных компонентов для строительства и обустройства обособленных закрытых мест — насосов, труб и фильтров для повторной переработки воды, тепловых насосов и теплоаккумуляторов и, наконец, источников энергии, необходимой для их работы.

Выгоды от расширения сельского хозяйства в «закрытых помещениях» будут включать в себя не только более высокую урожайность на единицу площади, но и более

высокое качество продукции, отсутствие в ней пестицидов, увеличение продолжительности сезонов (во многих регионах урожай можно будет собирать круглогодично), избавление от ограничений по качеству земли, доступности воды и защиты от засухи. С биосферной перспективы потенциальные выгоды включают в себя сокращение спроса на воду и снижение уровня ее загрязнения, а также удовлетворение человеческих потребностей в пище при одновременном сокращении площади сельскохозяйственных земель и ослаблением давления, вызвавшего, например, вырубку лесов в бассейне Амазонки. «Чистое» увеличение объема сельскохозяйственной продукции в 10 раз изменило бы и человеческую жизнь, и лицо планеты Земля.

Преобразование экологических факторов

Преобразование материальной основы цивилизации способно привести к изменению антропогенного влияния на Землю, и хочется верить — к лучшему. Несмотря на то, что снижение издержек может вызвать усиление урона, наносимого человечеством, я убежден, что более чистые технологии, оказывающие меньшее воздействие на природную среду, позволят нам получить лучшие чистые результаты. Для этого необходимо лишь, чтобы люди, которых волнует судьба Земли, не оставляли своих стараний сделать ее лучше. Перспектива значительного расширения производства и одновременного сокращения воздействия на природу Земли предлагает возможность разрешения некоторых из наиболее острых конфликтов современности и создания новой схемы сосуществования человеческой цивилизации и остального мира.

Мы уже рассмотрели несколько способов снижения влияния, которое человечество оказывает на природную среду, благодаря более экономному использованию материалов и более простым методам производства без отходов, загрязняющих воздух, воду или землю.

Сюда же следует добавить создание электроэнергетической инфраструктуры, основывающейся на преобразовании солнечной энергии, приемники которой размещались бы в таких местах и в таких конфигурациях, которые позволяли бы сократить не издержки, уже и без того низкие, но влияние на экосистемы.

Полное изобилие будет способствовать достижению самых разных целей, включая те, которые многим из нас представляются несовместимыми друг с другом. Мы должны анализировать этот феномен не как привычное всем «больше» или изменения соотношения в знакомом всем балансе, а как смещение вверх кривой сбалансированного набора параметров в целом, что означает получение результатов, лучших с точки зрения целого комплекса перспектив, включая те из них, которые представляются несовместимыми друг с другом. Данное обстоятельство способно (и должно) привести к изменениям ряда политик.

Восстановление экологии

Материальные проблемы могут сделать экологическое восстановление слишком дорогим или неэффективным. Например, для устранения последствий открытых горных разработок, вероятно, потребуется перемещение многих миллионов тонн скальных пород и земли. Известные в наши дни способы удаления из почвы ядовитых химических веществ и тяжелых металлов в одинаковой степени дороги и неэффективны. Следовательно, все точки на кривой сбалансированного набора параметров являются неудовлетворительными.

И вновь производство, основывающееся на АТП, способно обеспечить снижение издержек и повышение эксплуатационных характеристик необходимого оборудования. Помимо этого, технологии АТП-уровня открывают новые возможности по улавливанию и извлечению ядовитых материалов из подземных вод и почвы и решению более тонких проблем.

*Обращение вспять воздействия
основной движущей силы климатических изменений*

С помощью атомарно точного производства и продуктов открывается возможность проектирования таких источников энергии и таких способов ее использования, углеродные выбросы которых близки к нулю. Например, различные виды углеводородного жидкого топлива могут производиться из водорода, извлекаемого из воды, и углерода, получаемого при переработке углекислого газа.

В то же время обращение вспять воздействий прошлых выбросов, потребовало бы широкомасштабной переработки атмосферного углекислого газа в количестве не менее 3 триллионов тонн. Представляется, что решение этой задачи, в силу огромной потребности в энергии, окажется не под силу промышленной цивилизации, которая и породила проблему выбросов CO_2 . Даже если углекислый газ будет улавливаться с высокой эффективностью, объем необходимой для этого энергии составит приблизительно десятилетний объем всей мировой выработки¹.

В то же время с точки зрения АТП эта проблема не является непреодолимым барьером. Технологии АТП-уровня способны предложить термодинамически эффективные средства улавливания углекислого газа из воздуха и его последующего сжатия. Необходимая для этого энергия может быть произведена в течение десяти лет на солнечных электростанциях. При этом общая площадь, занятая фотоэлектрическими батареями составила бы не более 0,5% земной суши, например, в пустыне Сахаре (если свести все батареи воедино, они заняли бы участок 200×200 километров). Тем самым производство, основывающееся на АТП, будет способно обеспечить существенные мощности по улавливанию углерода,

1. Это обусловлено обязательной с точки зрения термодинамики работой, необходимой для сжатия всего избытка углекислого газа, выброшенного в атмосферу в промышленную эпоху до жидкого состояния (составляет примерно 10^{21} джоулей).

которые позволяют в течение десяти лет при относительно невысоких затратах обеспечить такой состав земной атмосферы, каким он был в доиндустриальную эпоху. Следовательно, проблема избыточного углекислого газа вполне может быть решена, хотя и не прямо сейчас, а со временем, после довольно продолжительной и рискованной задержки.

* * *

В своей совокупности, перспективы предотвращения столкновения цивилизации и ограниченных ресурсов Земли дают основания для надежды там, где ее раньше особенно не наблюдалось.

Преобразование технологий безопасности

Перспективы применения атомарно точных технологий с точки зрения безопасности носят двойственный характер. Технологические достижения всегда находят применение в сфере вооружений, а замещение одного поколения вооружений следующим оказывает смешанное воздействие на человеческую жизнь.

«Технологии безопасности» включают в себя средства нападения, обороны и разведки, применяемые в самых разных целях — для ведения войны, защиты соседних государств и политических репрессий. Попытавшись заглянуть в их будущее, мы видим, что диапазон потенциальных последствий простирается от неограниченной, смертельно опасной и непостижимой силы до сбора информации, осуществляемой по тщательно продуманным правилам, которые не угрожают, а защищают гражданское общество. Сегодня технологии безопасности включают в себя и физические, и информационные системы. В этом разделе мы обсудим только физические аспекты технологий, отложив вопросы политики и стратегии до следующей главы.

Платформы и наблюдение

Выше мы отмечали, что атомарно точное производство способно усилить уже действующие тенденции, наращивая потенциал повсеместно распространенных, сетевых, требующих интенсивных вычислений систем сенсоров, расширяющих уже имеющуюся инфраструктуру наблюдения. Постоянные наземные сети наблюдения не нуждаются в новом обновлении, а потенциальное снижение издержек и повышение эксплуатационных характеристик механических и воздушно-космических систем привлекает внимание к возможностям, которые несут с собой быстро развертываемые на земле, в небе и на море сети беспилотных летательных аппаратов.

Новые возможности открывают малоразмерные компоненты и системы. Предположим, что у нас имеется платформа весом в один грамм, построенная на основе передовых технологий. Ее средняя вычислительная мощность составляет несколько терафлоп (и в пике может быть больше), объем памяти измеряется в миллионах терабайтов, а чувствительность датчиков превосходит человеческие возможности. При этом объем потребляемой энергии сравним с объемом энергии, потребляемым мобильным телефоном в режиме ожидания. Как вы думаете, как могла бы использоваться такая платформа, если бы устройства подобного класса стоили около \$1 за килограмм и могли бы доставляться на небольших беспилотниках? Для того чтобы разместить такие устройства на каждом квадратном метре земной суши потребовалось бы всего \$100 миллиардов.

Применение силы

Как показывает история военных беспилотников, применение систем наблюдения может сопровождаться летальными последствиями. Однако в мире низкозатратного производства и потенциально интенсивной

разведки, смертоносное оружие может утратить былое значение.

Мы наблюдаем тенденцию к сокращению смертности от применения оружия. Например, самое смертоносное термоядерное оружие достигло апогея (по показателю количества смертей в расчете на один доллар) в 1960-е гг. В последние десятилетия высокоточные виды вооружений стали более популярными, чем ковровые бомбардировки. Применение меньшей силы с большей точностью привело к сокращению количества смертей, хотя полностью избежать человеческих жертв удастся очень редко.

Отчасти причины использования смертоносного оружия имели экономический характер. В расчете на единицу издержек несмертельное оружие в большинстве случаев является менее эффективным — угроза открыть огонь на поражение может быть более действенной, чем облако слезоточивого газа; при этом пули обходятся дешевле. В то же время, при условии невысокой стоимости разведки и производства оружия, крупномасштабное, высокоэффективное размещение несмертельного оружия будет становиться все более приемлемым по издержкам, а естественное направление в развитии несмертельных вооружений позволило бы ужесточить контроль над применением средств насильственного принуждения, избегая нанесения физического вреда.

Сила всегда была основой власти, и радикальные изменения в средствах ее применения должны вызывать глубокую озабоченность. В частности, распространение все более эффективных видов несмертельного оружия ведет к ослаблению моральных и политических ограничений на насилие. В контексте внутренних дел страны более свободное обращение к насилию способно раскрыть двери к масштабным злоупотреблениям власти, разрушающим общество. В военном контексте те же самые возможности способны снизить порог, препятствовавший действиям, сопряженным с риском расширения конфликта и его перерастания в войну.

Усложнению проблем безопасности, связанной с АТП, и возрастанию озабоченности по их поводу способствует контекст, в котором они будут зарождаться, контекст, обещающий бурные изменения. Я еще вернусь к этой теме в следующей главе.

Преобразование медицины

Технологии АТП-уровня естественным образом находят применение в медицине, которая непосредственно связана с биологией, в свою очередь, основывающейся на атомарно точных структурах. АТ-устройства широко применяются в современных биомедицинских исследованиях и для получения знаний, и для медицинских воздействий.

Знания и диагностика

Как это часто происходит в науке, достижения в технологиях задают темпы прогресса в биологии. Однако в биологии значительная часть технологий построена на адаптации биомолекулярных устройств. Важнейшую роль в исследованиях генома человека сыграли методы секвенирования ДНК, в которых используются заимствованные у клеток атомарно точные механизмы. Все то же самое справедливо и в отношении исследований транскриптом, протеом и метаболом, то есть комплексных исследований транскрибируемых из генома молекул РНК, белков, кодируемых этими молекулами и метаболических продуктов функций белка. В процессе исследований были открыты структуры, чрезвычайно подробно раскрывающие изменения в состоянии здоровья и при заболевании. Эти структуры, естественно, варьируются от ткани к ткани и от молодости к старости.

В наши дни затраты на проведение обширных сравнительных исследований такого рода достигают миллионов долларов. Передовой АТ-инструментарий, ко-

торым были бы оснащены небольшие наладонные устройства, позволил бы быстрее собирать возможно полные данные и обходился бы значительно дешевле. С этого момента использовавшиеся в прошлом дорогие научные технические приемы превратятся в рутинные клинические методы наблюдения и диагностики. Приведенные примеры иллюстрируют естественное соответствие АТ-технологий и биомедицинских исследований и позволяют примерно оценить их потенциал.

Борьба с инфекциями и раковыми заболеваниями

Когда человеческий организм борется с инфекциями и раковыми клетками, направления «ударов» определяется благодаря молекулярному распознаванию — специфическому соответствию между молекулами. И врожденная, и приобретенная иммунная система исполняет отведенную ей роль, но далеко не всегда способна откликнуться на «вторжение» достаточно быстро, достаточно глубоко или достаточно точно. Более того, в некоторых случаях ей просто не удастся дать должный ответ.

Исследования на молекулярном уровне позволяют установить отличительные черты болезнетворных микроорганизмов, а достижения в АТ-технологиях способны ускорить этот процесс, обеспечивая быстрый отклик. В соответствии с одним из подходов, следующий шаг должен заключаться в синтезе соответствующих антител или их специализированных аналогов — точно так же, как для экстренной профилактики от гепатита А или кори для временного повышения иммунитета пациенту вводится гамма-глобулин. Способность к быстрому развитию подобных реагентов и расширению их широкомасштабного производства открывает возможность справиться с новыми патогенными микроорганизмами.

Разновидности раковых клеток незначительно отличаются от нормальных, что затрудняет их иммунное распознавание и обуславливает системную токсичность химиотерапии. Исследования в области наномедицины

позволили добиться значительного прогресса в селективности наноразмерных частиц, более избирательно доставляющих химиотерапевтические вещества в клетки. Передовые АТ-технологии открыли бы возможность производства устройств, способных испытывать клетки по нескольким параметрам до начала доставки убивающих клетки препаратов. После доработки устройства, основывающиеся на этом принципе, позволили бы очень точно выбирать целевые раковые клетки, избегая значительных побочных эффектов.

Обеспечение коррекции, заживления и регенерации

Экспериментальная биомедицина (опыты обычно проводятся на мышах) не ограничивается исследованием возможностей избавления от болезнетворных микроорганизмов. Она уделяет пристальное внимание медицинским вмешательствам, направленным на заживление и регенерацию тканей. Изменение механизмов активации гена, подавление одних условий и увеличение других, способно оказывать глубокое воздействие на клеточный обмен веществ, их рост и дифференцирование. В частности, исследователям удалось добиться преобразования клеток рубцовой ткани в сердечную мышцу.

Обратите внимание, что ни одна из упоминавшихся выше разработок не предполагает обращения к спорным методам генной терапии или использования клеток, полученных из человеческой бластоцисты². Впрочем, нет ни малейших сомнений в том, что вокруг непрерывно развивающейся медицины будут кипеть нешуточные страсти. В некоторых случаях дискуссии будут вестись по поводу используемых в ней средств, но чаще всего в центре внимания будут находиться конечные результаты.

2. Эмбриональные стволовые клетки. — *Примеч. науч. ред.*

Технологии, достигшие АТП-уровня или приближающиеся к нему, будут способствовать расширению сферы влияния медицины в самых разных направлениях. Последствия этого процесса затронут самые разные области — медицинскую этику и практику, расходы на демографию и долгосрочные перспективы государственных бюджетов.

Ряд неудобоваримых истин

В этой главе изложено мое видение ряда технологических перспектив, воплощение которых может повлечь за собой разнообразные последствия, включая отрицательные. Рассматривая их с точки зрения физики и техники, мы видим, что эти перспективы базируются на хорошо известных знаниях о молекулярных взаимодействиях и на законах механического масштабирования. Поэтому многие последствия внедрения малоразмерной машинерии и точного контроля над молекулярными перемещениями представляются едва ли не очевидными — высокая производительность, более совершенные материалы и продукты по более низким ценам. Дополнительные изыскания в рамках консервативной исследовательской инженерии позволяют получить широкий набор более конкретных результатов.

Концептуальные проблемы возникают в тех случаях, когда мы пытаемся проследить сугубо технологические цепочки результатов до тех точек, когда они начинают вызывать тревогу у людей и общества. В этот момент, если мы рассматриваем вопрос с человеческой точки зрения, факты о физическом потенциале технологий атомарно точной сборки быстро перерастают в огромную совокупность разнообразных возможных последствий, представляя собой интеллектуальную пищу, которую я, например, нахожу непереваримой, хотя бы из-за ее количества.

* * *

В этой главе мы навели мост между инженерным уровнем ограничений использования АТ-технологий и возможностями их практического применения, которые будут иметь большое значение для отдельных людей и целых государств. При этом мы проанализировали отдельные аспекты АТ-технологий, а не их комплексное воздействие. В следующей главе мы расширим угол зрения и попытаемся оценить воздействие различных сочетаний новых возможностей и рисков на изменения экономических и социальных проблем, с которыми сталкиваются отдельные государства и международное сообщество в целом.

В результате мы получим некоторые ответы, но гораздо важнее, что мы сможем более четко сформулировать вопросы.

Управление прорывным успехом

КАК изменит мир АТП-революция? Сегодня у нас нет возможности подробно и уверенно ответить на этот вопрос. Но некоторые из потенциальных движущих сил революции уже заметны, что позволяет нам предварительно перечислить вероятные направления дальнейшего развития. Несмотря на ограниченность наших знаний, у нас нет никаких сомнений в отношении некоторых аспектов рассматриваемых вопросов, а имеющиеся соображения позволяют направить обсуждение в реалистическое русло.

Реализм начинается вместе с законами физики и безграничным во времени ландшафтом технологического потенциала и уже в рамках этой структуры — с пониманием некоторых возможностей технологий АТП-уровня. Изучение данной темы (а также природы процесса исследований самого по себе) и было основным предметом этой книги.

Реализм включает в себя и неопределенности — такой взгляд на мир, когда мы принимаем во внимание непознанное. В этом смысле некоторые неопределенности являются вполне надежными, так как мы можем быть уверенными в отсутствии достоверных ответов. Вероятно, вы уже знакомы с этим аспектом планирования — попытками численно оценить «рыночный риск», например, отражающий несокращаемую неопределенность, которую необходимо учитывать в рациональном

планировании. К нему относятся тревоги и обеспокоенность, возникающие в каждой сфере человеческой деятельности, обращенной в будущее.

Что касается технологий, то в число неизвестных входит и понимание, как и когда зародится АТП. Мы не способны предвидеть и природу его возможных практических применений. Помимо этого существуют неопределенности относительно ответных действий и результатов, того как (и в какой степени) будут использоваться потенциальные возможности АТП, а также кем, с какими целями и с каким результатом.

И наконец, реализм требует усилий, направленных на формирование *последовательных* точек зрения на будущее — не пророческих и не всеохватывающих сценариев, которых не может быть в принципе, но сценариев, которые не являлись бы очевидно противоречивыми по своей сути. Например, ошибочным являлось бы предположение, согласно которому некая «доза» АТП может быть «впрыснута» в традиционный во всех остальных отношениях мир, так как технологии АТП-уровня принесут с собой разнообразие возможностей, не сводимое к единственному пакету. Допустим, что мы рассматриваем будущее, в котором нефть полностью утратила былую ценность. Тогда предположение, в соответствии с которым мировые державы, располагающие технологиями АТП-уровня, продолжат конкурировать за доступ к нефтяным полям, является бессмысленным. Другой пример. Предположим, мы изучаем будущее, в котором технологии полного изобилия оказали разрушительное воздействие на занятость населения. В этом случае мы должны оказать от подразумеваемого допущения сохранения в нем текущих уровней дефицита ресурсов и материальных благ. Непоследовательные сценарии породили бы несогласованную политику, следствием которой стали бы ненужные риски и упущенные возможности.

Моя цель заключается в том, чтобы побудить читателей к поискам, размышлениям и участию в обсуждениях, направленным на выработку более реалистичной после-

довательной точки зрения на наше будущее. Тем самым у нас появится возможность сделать в будущем выбор, благодаря которому чаша весов склонится в сторону благоприятных исходов. Исходя из этой цели, я хотел бы поделиться с вами некоторыми своими наблюдениями о том, как перспективные технологии могли бы способствовать решению глобальных проблем, обязательно учитывая то, что рассматриваемые процессы будут тесно связаны с различными разрушительными воздействиями.

В следующей главе мы обратимся к вопросам безопасности и национальных интересов, которые возникнут не только в процессе развития технологий АТП-уровня, но и в преддверии их появления, в ожидании полного изобилия. В контексте потенциальных стратегических ответов, мир, возможно, находится на важной развилке.

Вопросы о темпах и направлениях развития

Как далеко? И как быстро?

Физика и техника способны задавать прямые вопросы относительно материального потенциала АТП, включая те из них, которые относятся к возможным темпам распространения технологий. Таким образом, изучая ответы на инженерный вопрос «Как далеко?», мы можем получить оценку того, «Как быстро?»

Когда?

Вопрос «Когда?» отличается от вопроса «Насколько быстро?», так как ответ на первый из них зависит от путей развития (альтернатив, трудностей, возможности пойти кратчайшим путем), масштаба и центра внимания исследований (в числе иных соображений). Достигнутые в прошлом темпы развития АТ-производства имеют не более чем косвенное отношение к вероятным темпам прогресса в будущем.

С какими результатами?

На этот открытый вопрос невозможно дать четкий уверенный ответ («Произойдет *вот это*»). Диапазон вероятных ответов может быть ограничен техноцентрическими фактами, не только в силу существования ограничений, определяемых законами физики, но и потому, что в конкурентном мире в некоторых случаях появление новых возможностей вызывает ответные действия.

*Множество участников
во множестве акселераторов*

Что касается темпов технологического развития в мировом сообществе в целом, многообразие и независимость потенциальных действующих лиц на этой сцене ограничивает вероятные исходы в связи с увеличением количества потенциальных акселераторов и отсутствием единого тормозящего элемента. Относительно самих технологий, можно сказать, что схожие последствия влечет за собой многообразие и независимость потенциальных путей развития, когда вокруг каждого отдельного «дорожного препятствия» возникает множество потенциально коротких путей и вариантов обхода.

Очень легко представить себе появление сильных исследовательских программ. Но давайте на секунду задумаемся о масштабах потенциальных научных изменений, направленных снизу вверх, и о низком пороге изменений направления.

В наши дни исследования АТ-сборки проводятся множеством групп в различных странах. На это есть много причин, включающих научную любознательность и практическое применение в материаловедении, химии, биологии и медицине. Очевидно, что эти исследования приносят участникам определенное вознаграждение. В то же время подход, в большей степени сосредоточенный на разработках атомарно точных инструментов и систем, сулит быстро расширяющийся диапазон воз-

награждений в тех же самых областях. К тому же в этом случае отсутствуют препятствия на пути к дальнейшему развитию. На начальном уровне требуется всего лишь изменение фокуса внимания групп в рамках областей профессиональной специализации — например, продолжение работы со знакомым классом молекулярных структур, обладающих свойством самосборки, но при условии выбора специфических задач с учетом целей системного уровня.

Где мы можем ожидать принятия исследовательских программ с сильным фокусом и более скоординированным подходом? В число кандидатов входят государства, осуществляющие финансирование исследовательских программ в сфере общих, не относящихся к атомарно точным, технологий, но стремящиеся добиться прогресса на пути к получению результатов АТП-уровня. В соответствии с данным критерием, мы можем отнести к кандидатам США, Китай, Европу (как отдельные государства континента, так и страны ЕС в целом), Россию, Японию, Индию, Южную Корею, Австралию, Сингапур, Малайзию, Таиланд и Бразилию (данный список следует рассматривать как частичный, иллюстративный).

И краткосрочные, и долгосрочные цели указывают в одном и том же направлении. Перемещение фокуса исследований в сторону инженерии молекулярных систем (следовательно, направляя их по пути, ведущему к АТП-технологиям) послужило бы достижению краткосрочных целей по всему спектру современных исследований, одновременно открывая перспективу получения добавочного растущего и в конечном счете огромного по своим размерам долгосрочного вознаграждения. Осознание его возможности захватывает дух. Как мы уже видели, эффект от технологий АТП-уровня распространяется не только на медицину, материаловедение и энергетику, но и на решение проблем на уровне глобального экономического развития и климатических изменений. И наоборот, если мы взглянем на ситуацию через призму национальной конкурентоспособности

сти, издержки того, что государство не подготовится к грядущей АТП-революции, могут оказаться губительными для него.

Чтобы дать общую оценку, нам необходимо будет положить на одну чашу весов открывающиеся возможности и конкурентное давление, а на другую — потенциальные издержки и риски разрушительных изменений. Некоторые из этих затрат, вероятно, далеко не обязательны, в то время как другие представляются неизбежными. Рассматривая выгоды, издержки и риски, мы сталкиваемся с фундаментальной асимметрией между ускоряющимся прогрессом и попытками его замедлить. Приложение добавочных усилий служит дальнейшему глобальному прогрессу, но их отсутствие отнюдь не означает, что прогресс повернется вспять. Скорее, это означает шаг в сторону, превращение в зрителя, обладающего меньшими возможностями присоединиться к общим усилиям, направленным на реализацию потенциальных выгод и смягчение проблем. С конкурентной точки зрения отступление в сторону ведет к возрастанию рисков, связанных с отставанием от других и снижением потенциала влияния на совместные действия, направленные на ограничение коллективных, системных, международных рисков.

Исходя из вышесказанного, что можно сказать о вероятном времени появления технологий АТП-уровня? В общих чертах пути потенциального развития ясны, а предсказать конкретные рубежи и даты их достижения невозможно; поэтому наше обсуждение вертится вокруг движущих сил, последовательностей тех или иных действий и относительной скорости без упоминания конкретных дат и цифр. Я убежден, что в настоящее время основные трудности связаны не с технологией *как таковой*, но с фокусом внимания и координацией. При этом условием вынесения обоснованных суждений относительно потенциальных темпов прогресса является понимание, знание особенностей технологической территории, по которой нам придется пройти.

Как мы уже видели, поступательное развитие атомарно точных технологий производства будет непосредственно способствовать дальнейшему прогрессу, по мере того как новые инструменты будут все шире применяться для создания еще более новых инструментов. Эти достижения откроют возможности сокращения во времени циклов проектирования, фабрикации и испытаний, что в свою очередь приведет к новым и новым достижениям и еще большему сокращению длительности циклов. Мы не способны предсказать точные даты тех или иных открытий, но сама картина представляется очевидной. Вероятно, мы станем свидетелями ускоряющейся восходящей спирали технологических возможностей, естественным конечным пунктом которой является АТП-уровень.

*Потенциал удивительно быстрого
распространения*

На пути от дизайна системного уровня до использования на деле новый продукт вынужден задерживаться в таких пунктах, как детальный проект, создание прототипов, испытания и повторное проектирование, после чего следуют разработка технологии производства, тестирование, масштабирование и, наконец, распространение и принятие рынком. Ни один из этих шагов не обладает иммунитетом к изменениям.

Когда в дело вступают технические возможности АТП-уровня, открывается перспектива сокращения времени разработки продуктов, усовершенствованных по сравнению с современными аналогами, при этом результат будет выдающимся. Например, поразительные преимущества могут быть получены даже в случае лишь частичного обновления уже существующих продуктов, когда на смену использовавшимся в прошлом структурным компонентам приходят более легкие, прочные и менее дорогие материалы. Если бы современный бизнес мог обеспечить замещение уже используемых про-

дуктов модернизированными, предлагаемыми по более низким ценам и обладающими более высокими эксплуатационными характеристиками по нескольким показателям (в два раза более легкие транспортные средства, электронные системы с мощностью, превосходящей сегодняшние аналоги в десять тысяч раз), мы, скорее всего, стали бы свидетелями быстрого исчезновения с рынков конкурирующих товаров и краха стоящих за ними цепочек поставок.

Выходя за рамки частичной модернизации, важно помнить о том, что циклы усовершенствования (и замещения) продукта могут быть сокращены благодаря производственной инфраструктуре АТП. Потребности в прототипировании, разработке производственных технологий и строительстве заводов будут резко снижены или исчезнут, а производство само по себе будет быстрым и масштабируемым. В дальнейшем в отношении распределения продуктов, адаптированных к децентрализованному атомарно точному производству, поставка продуктов больше не будет требовать физической доставки и будет больше напоминать загрузку из Интернета.

Значительное сокращение издержек, улучшение производительности, быстрое удовлетворение спроса и вытеснение существующих цепочек поставок — все эти характеристики производства, основывающегося на АТП, могут быть применены к промышленным продуктам всех видов. На большинстве рынков спонтанная динамика спроса и предложения привела бы к беспрецедентно быстрым изменениям. Потенциальные успехи по целому ряду показателей — радикальное повышение производительности труда и капитала, снижение себестоимости производства, улучшение характеристик продукции, сокращение потребления энергии и выбросов углекислого газа, а также уменьшение общего экологического воздействия — все это способствует повышению вероятности осуществления позитивных прорывных изменений.

Прорывные решения глобальных проблем

Физика и техника указывают на новые технические возможности; история и здравый смысл позволяют нам предположить, что, по крайней мере, некоторыми из не ожидавшихся последствий можно будет воспользоваться, некоторые — пережить, а некоторыми удастся управлять или вовсе предотвратить. Перспективы включают в себя и решения глобальных проблем, тесно связанных с целым спектром непредвиденных трудностей.

Медленно разворачивающийся кризис промышленной цивилизации

В отсутствие устойчивости, большее изобилие могло бы быстрее привести к несостоятельности нашего хрупкого мира, в котором постоянно углубляется пропасть между богатыми и бедными. В XXI столетии повышение устойчивости означает новую надежду. В предыдущей главе мы изучали возможность применения технологий АТП-уровня для удовлетворения широкого спектра человеческих потребностей, а также последствия этого с точки зрения ресурсных требований и экономической устойчивости. В какой степени рассматриваемый потенциал соответствует зарождающимся глобальным проблемам?

Мы столкнулись с глубочайшим, медленно разворачивающимся кризисом, коллизией между промышленной цивилизацией и ограниченными возможностями Земли. Недавно возникшие тенденции и текущие условия способствовали возникновению чувства необходимости срочных действий. Одним из наиболее явных признаков обостряющихся проблем с ресурсами является динамика цен. В конце XX столетия они были весьма благоприятными, но в последние годы их знак изменился на противоположный. После длившегося в течение многих десятилетий снижения цен, стоимость боль-

шинства промышленных сырьевых материалов начала возрастать. Некоторые регионы всегда испытывали недостаток пресной воды, но в последнее время их становится все больше. Энергетический кризис 1970-х гг. способствовал расширению свободы поставок углеводородного сырья, но в последние годы добыча нефти стабилизировалась, в то время как цены на нее взлетели на невиданную ранее высоту. На протяжении большей части XX столетия цены на продовольствие падали, однако начиная с 2000 г. произошел перелом тенденции. В последние годы высокие мировые цены на зерно стали причиной массовых беспорядков в ряде стран мира. Поэтому мы и говорим о глубоком медленно разворачивающемся кризисе.

Новые четко выраженные тенденции соответствуют давно известным прогнозам. Например, в книге «Пределы роста» (так встревожившей меня в 1970-е гг.) предсказывался устойчивый экономический рост вплоть до конца XX столетия и описывалось множество различных путей, которые могли привести мир к катастрофе в течение нескольких последующих десятилетий. Поворот важнейших тенденций вспять согласуется с рассчитанными на столетие проектировками, сделанными 40 лет назад, а последствия чрезмерных выбросов парниковых газов — одной из описывавшихся в «Пределах роста» моделей.

Что касается современного экономического развития и благосостояния человечества, то единственной величайшей положительной тенденцией является быстрый экономический рост Китая и более медленный, но неуклонный подъем Индии. В то же время этот огромный прогресс человечества в большинстве своем воспринимается как неустойчивый, поскольку он в значительной степени зависит от ограниченности земных ресурсов и прогнозируемых промышленных технологий. Жесткое ограничение поставок ресурсов и проблема выбросов углекислого газа указывают на коллизию не только между глобальной цивилизацией и возможностями

Земли, но и между растущими мировыми государствами и державами, поддерживающими *status quo*. Если бы Китай и Индия расходовали бы столько же ресурсов в расчете на душу населения, сколько США, то в мире в целом потребление возросло бы более чем в два раза. Значительно ускорился бы и рост содержания углекислого газа в атмосфере. Как и следовало ожидать, в американских официальных документах, посвященных военному планированию, выражается озабоченность тем, что в ближайшие десятилетия ограниченность ресурсов способна стать одним из важнейших источников международных конфликтов.

*Решения, касающиеся материального
экономического развития*

Как мы уже видели, в основе материального изобилия, которое по множеству измерений может оказаться полным, лежат общие источники сырьевых материалов и энергии. Одним из таких аспектов является потенциально возможный разрыв связей материального изобилия и традиционных условий его достижения, сложившихся в обществе.

Экономическое и человеческое развитие переплетены между собой и воздействуют друг на друга. Первое позволяет избавить население от голода и нищеты, от жизни, вращающейся исключительно вокруг самых неотложных потребностей, открывая возможность обучения детей и поддержки обществом работников образования. В свою очередь, поступательное человеческое развитие открывает возможность традиционным обществам присоединиться к современному, глобальному промышленному обществу и продолжить рост.

Производство, основывающееся на АТП, способно обеспечить материальное изобилие, необходимое для человеческого развития. Одновременно разрывается связь между человеческим развитием и материальным экономическим прогрессом. Так, сотовые телефоны

тоже способствуют развитию, несмотря на то, что использование этих устройств не требует ни специального обучения, ни высокоуровневой социальной инфраструктуры, включающей в себя законодательство, сбережения капитала, инвестиции или образование. Аналогично характеризуется и производство, основывающееся на АТП. Завтра к современным файлам изображений присоединятся файлы материальных продуктов. Сегодня человек способен распечатать изображение Моны Лизы, но не имеет возможности получить кольцо правильной формы; завтра он сможет получить, в случае необходимости, экран дисплея, не представляя себе, как изготавливаются провода.

В наши дни отсутствие и материального, и человеческого развития могут подкреплять друг друга, образуя порочный круг бедности и нищеты. Новый способ изготовления вещей способен разорвать его, приводя к непредсказуемым результатам.

На развитые страны мира распространяется та же самая картина разрыва с шаблонами прошлого. Достижения в материальном производстве потребовали создания комплексной новой технологической инфраструктуры. Например, условием производства автомобилей являются сложные цепочки поставок, необходимые как для выпуска продукции, так и для строительства заводов. Промышленное развитие ведет к возрастанию степени сложности и созданию паутины взаимозависимых экономик, которая год от года становится все более плотной.

Производство, основывающееся на АТП, приведет к тому, что сложность будет заключена в специфическую оболочку; при этом у пользователей не будет никаких резонансов, чтобы интересоваться ее устройством. Внутри сотового телефона находится компьютерная микросхема огромной сложности, но она самодостаточна; степень ее сложности недоступна человеческому пониманию, но для того, чтобы пользоваться телефоном, не требуется особых умений. Большинству людей

даже не надо знать о существовании этой микросхемы. И вновь, проведение параллелей между АТП и цифровыми системами позволяет нам получить хорошую описательную модель там, где аналогии с промышленными системами оказываются неуместными.

Вероятно, оценить потенциал материального уровня жизни, формируемый технологиями АТП-уровня, читатели смогут, обратившись к своему воображению. По всей видимости, если вообразить, что рынок вдруг оказался завален всеми видами лучших современных продуктов, мы получим представление лишь о низшей границе этого нового уровня жизни.

*Решения, затрагивающие устойчивое развитие
и стойкость к внешним воздействиям*

Изучение отчетов различных международных и неправительственных организаций позволяет сформировать перечень требований, выполнение которых рассматривается как залог устойчивого глобального развития. Одна из групп этих требований непосредственно относится к ресурсам и производству:

1. Сбережение материальных ресурсов.
2. Предоставление достаточного количества энергии, воды и продовольствия.
3. Сокращение бедности и повышение уровня жизни.

Как мы уже увидели, передовая атомарно точная сборка естественным образом приводит к сдвигу в предъявляемом спросе на ресурсы (и с точки зрения их объема, и с точки зрения их состава). Широко распространенных на Земле сырьевых материалов более чем достаточно для изготовления продуктов, превосходящих по своим характеристикам те, что выпускаются сегодня с использованием относительно редких материалов, таких как медь или цинк. Падение спроса приведет к тому, что наиболее редкие материалы уже не будут вы-

зывать экономической тревоги. В аналогичном направлении действуют перспективные разработки в области добычи и переработки материалов.

Аналогично снижение затрат на производство фотоэлектрических элементов поможет сделать общедоступной солнечную электрическую энергию; новые АТ-технологии взаимного преобразования электрической и химической энергии (запасаемой как водород или углеводороды) открывают возможность эффективного создания запасов энергии и производства топлива, преодолевая тем самым ночные, погодные и географические ограничения солнечной энергетики.

Широко доступная энергия и радикальное сокращение затрат на приобретение капитальных благ, опреснение и транспортировку воды на дальние расстояния позволят наладить обеспечение пресной водой в масштабах, позволяющих вести устойчивое крупномасштабное сельское хозяйство. Схожим образом недорогие энергия, оборудование и структуры делают возможным ведение низкозатратного закрытого сельскохозяйственного производства, позволяющего увеличить урожаи при одновременном сбережении воды и сохранении питательных веществ (азота, фосфора), которые сегодня попадают с открытых полей в ручьи, озера и реки. В некоторых случаях загрязнение приводит к возникновению мертвых зон даже в прибрежных морях.

Возможно, еще более важным является естественный, качественный результат расширения возможностей — невиданная прежде стойкость к внешним воздействиям. В материальном смысле стойкость представляет собой устойчивость перед шокowymi воздействиями со стороны природного и человеческого миров. В условиях закрытого сельского хозяйства засуха становится невозможной; изобилие энергии и холодильной техники означает, что волны жары уже не приведут к массовой гибели людей. Даже в буквальном смысле шокowe воздействия землетрясений приносят с собой смерти по большей части вызванные обрушением зданий, отно-

сительная неустойчивость которых является следствием высокой стоимости более прочных структур, обусловленной, в свою очередь, текущими издержками производства. Все то же самое справедливо в отношении уязвимости зданий и сооружений к наводнениям, ураганам и пожарам.

Прямую материальную форму принимают и многие другие чрезвычайные воздействия (включая вызванные действиями людей). Жители сельских поселений, регионов и государств могут страдать от недостатка продовольствия, воды, электроэнергии или поставок топлива. К аналогичным последствиям приводит и падение спроса на местные продукты, что ведет к ограничению доступа населения к денежным средствам, необходимым для приобретения товаров первой необходимости. Ослабление связей между экономическими и материальными условиями способно смягчить подобные проблемы, благодаря местному производству. Короткая цепочка поставок означает отсутствие необходимости пересечения океанов или континентов, в то время как предпочтения в пользу свежей пищи, произведенной в данной местности закрытым способом, позволило бы местным сообществам освободиться от зависимости от удаленных источников продовольствия. В сфере энергетики ослабление рассматриваемых нами связей позволило бы ослабить зависимость от зарубежной нефти и свободы прохода танкеров через Ормузский пролив. Поскольку производство материальных благ может быть таким же рассредоточенным, какими являются в наши дни информационные технологии, местные поставки этих благ будут означать исчезновение потребности в экспорте и импорте.

Безусловно, существование технологий АТП-уровня само по себе не гарантирует ни стойкости к внешним воздействиям, ни широкого распространения изобилия. Тем не менее новые технические возможности позволяют перевести эти цели из разряда дорогостоящих и, воз-

можно, неосуществимых мечтаний, в практический, недорогой, близкий к естественному вариант действий, хотя их исход, как всегда, будет зависеть от последовательности принимаемых решений о том или ином выборе и развитии событий.

*Решения, затрагивающие состояние
природной среды*

Помимо ресурсных требований (сырьевые материалы, энергия, вода, продовольствие), к устойчивому развитию предъявляются требования относительно природной среды. Авторы упомянутых выше докладов выделяют три основных требования:

- Сокращение давления на экосистемы.
- Сокращение выбросов ядовитых химических веществ.
- Сокращение выбросов парниковых газов.

В конечном счете распространение сельского хозяйства привело к усилению давления на экосистемы на большей части Земли с перспективой их полного уничтожения. Плодородная земля является биологически продуктивной, а биологически продуктивная земля, служившая в прошлом пристанищем для множества различных форм жизни, представляет собой землю, экосистемы которой наиболее быстро исчезают под плугом земледельцев. За последние несколько поколений на Земле исчезла огромная по площади ткань жизни, большая по размерам, чем помнит любой из ныне живущих людей. В наши дни разрушается больше экосистем, чем когда-либо в прошлом.

Возможности преумножения дохода, благодаря ведению сельского хозяйства в закрытых помещениях, вероятно, будут способствовать замедлению этой тенденции или обращению ее вспять. Очевидно, что стимулы к возделыванию новых земель уменьшатся, а естественный ход событий приведет к освобождению большей

части сельскохозяйственных угодий. Более слабые стимулы могли бы способствовать освобождению значительной части используемых в интересах сельского хозяйства земель — не только окраинных лугов и пастбищ, но и более плодородных участков, на которых прежде росли леса. Избавление сельского хозяйства от традиционных ограничений могло бы резко ограничить давление, оказываемое на природу. Других способов достижения этой цели не просматривается.

Что касается ядовитых выбросов, то АТП позволяет осуществлять точный контроль движения вещества, что приведет к ограничению спроса на редкие токсичные элементы. АТП-процессы отнюдь не всегда сопровождаются выбросом ядовитых химических отходов, и изменение структуры спроса, возможно, приведет к тому, что тяжелые металлы навсегда останутся в заброшенных шахтах.

Означает ли это, что производство, основывающееся на АТП, само по себе решит хотя бы одну из перечисленных выше экологических проблем? Ответ, конечно же, нет. В то же время оно позволяет принимать более эффективные решения, получая более высокие результаты с меньшими издержками. Поскольку давление оказывается эффективнее в тех случаях, когда основания для сопротивления не слишком сильные, изменение баланса затрат и выгод способно усилить эффекты действий, направленных на защиту окружающей среды.

Решение проблемы углекислого газа

Неправильное представление о роли углекислого газа в качестве парникового получило широкое распространение даже среди тех людей, кто воспринимает эту проблему как насущную. Несмотря на то, что негативные последствия роста уровня содержания CO_2 в атмосфере общепризнанны, даже существенное сокращение выбросов углекислого газа не привело бы к ожидаемому эффекту, так как он ведет себя совсем не так, как другие,

загрязняющие атмосферу соединения, будучи постоянной ее составляющей.

В свете непрекращающихся дискуссий, необходимо напомнить о нескольких простых фактах. Углекислый газ увеличивает количество тепла, остающегося в климатической машине Земли. Усилению его воздействия способствует увеличение объема водяного пара. Жители нашей планеты имеют возможность непосредственно наблюдать наиболее сильные воздействия увеличенного содержания CO_2 — таяние арктических льдов, более ранний приход весны и перемещение в направлении полюса животных и растений, обитавших и произраставших в умеренных широтах. Что касается экспертных прогнозов, то численному моделированию климата свойственны различные недостатки; поскольку ошибки могут быть сделаны в любых направлениях, неопределенности ничем нас не обнадеживают (темпы таяния морских льдов, например, значительно превосходят прогнозы). Аналогично, хотя мы не можем объяснить происходившие в прошлом климатические флуктуации, у нас нет оснований чувствовать себя спокойными: признаки спонтанной, необъяснимой неустойчивости климатической системы заставляют опасаться неожиданного удара.

Почему проблема изменения климата является столь трудной (оставляя в стороне масштабы ее воздействия и влияние потребления ископаемых видов топлива)? Потому что углекислый газ сохраняется в атмосфере очень долго. Так, уровни загрязнения атмосферы угольной и топливной сажей или сернистым газом весьма близки к норме выбросов. Если ликвидировать их источники, атмосфера быстро очистится. Время жизни даже таких веществ, как фторхлоруглероды и метан, измеряется всего несколькими годами.

Углекислый газ ведет себя по-иному. Он остается в атмосфере десятилетиями или даже столетиями. Дожди не вымывают CO_2 из атмосферы; известно, что углекислый газ медленно поглощается, главным образом Ми-

ровым океаном¹. В любой отдельно взятый момент времени уровень углекислого газа лишь немного превышает объем выбросов прошлого года, поскольку основное его количество является результатом совокупной эмиссии, происходившей на протяжении всей промышленной эры. Резкое сокращение текущих выбросов приведет не к пропорциональному снижению уровней углекислого газа, а к замедлению темпов их роста. Поведение системы напоминает ситуацию с полной ванной, в которой пробка немного пропускает воду: если водопроводный кран оставить открытым, то через некоторое время ванна переполнится.

Исследования химического и геофизического циклов Земли показывают, что температура и уровень содержания углекислого газа в атмосфере могут оставаться высокими на протяжении столетий, даже если выбросы сокращены до нуля. Все выглядит так, что только технологии улавливания атмосферного углерода способны быстро обеспечить существенное снижение уровней CO_2 . В предыдущей главе упоминалось о том, что для решения этой задачи — улавливания и сжатия трех триллионов тонн углекислого газа в течение примерно десяти лет потребовались бы энергетические ресурсы и оборудование, равные или превосходящие по объему мощности всей нашей промышленной цивилизации. Справиться с ней способно только низкочувствительное производство, основывающееся на АТФ.

Само собой разумеется, что было бы неразумно, если бы в наши дни человечество полагалось только на эту перспективу.

1. Несмотря на поглощение углекислого газа растениями, чистый эффект этого процесса невелик, поскольку CO_2 возвращается в атмосферу животными, бактериями и грибами в количестве, примерно равном объему фотосинтеза. Таким образом, мы можем рассматривать биосферу как в целом нейтральную по углероду.

Различные измерения прорыва

Быстрые глубинные изменения в человеческих делах способны мобилизовать силы, более предсказуемые, чем их эффект, реакция или конечный результат. Здесь я хотел бы указать на несколько общих перспектив. Это не столько прогнозы, сколько перечисление потенциальных эффектов прорывных сил, включая те из них, которые, возможно, могут быть смягчены посредством тщательно выбранных ответных действий.

Умение не только задавать правильные вопросы, но и оставаться в рамках подходящего диапазона, является очень ценным. Представляется, что перед нами откроются множество новых возможностей одновременно. Каждая из них будет приводить к изменениям контекста остальных, во многих случаях радикальным. Следовательно, вопросы, которые будут возникать, стоит рассматривать в комплексе. Мы обсудим некоторые из взаимосвязей, но я сознательно ограничил их круг, оставляя другим возможность рассмотреть более широкий спектр вопросов и предпринять попытку более глубоко проникнуть в суть потенциальных ответов и в их соответствие друг другу.

В каждой из обсуждаемых областей возникают вопросы двух типов. Первый звучит так: Какие разумные основания имеются у нас для ожидания определенных последствий от использования новых технологических возможностей? Имеются в виду последствия новых, ставших доступными технических возможностей, в зависимости от того, действительно ли они используются, остаются невостребованными или предвосхищаются. С первым вопросом тесно связан второй: В чем заключаются вероятные последствия ожиданий самих по себе? Имеются в виду последствия наших ожиданий относительно технологических перспектив, независимо от того, насколько хорошо они обоснованы и вне зависимости от практического смысла ответных действий.

Ожидания формируют восприятия и действия, в некоторых случаях задолго до наступления реальных событий. По мере продвижения в направлении создания технологий АТП-уровня, мы можем ожидать роста связанных с ними ожиданий, которые будут оказывать все большее влияние. Знание истории позволяет предположить, что нам отнюдь не гарантированы реалистичные ожидания и оценки неопределенности. В то же время ожидания участвуют в формировании тех или иных конечных результатов. Ожидания играют главную роль в рассмотрении вопросов, связанных с воздействием перспективных продуктов, производственными технологиями, изменениями в стоимости активов и экологическими последствиями, и могут очень рано принимать ту или иную форму.

Спектр потенциальных продуктов

Потенциал значительного расширения видов продукции вызывает опасения относительно того, что могло бы производиться. Потенциальные продукты передового производства включают в себя виды, выпуск которых является предметом жесткого регулирования, включая системы вооружений, лекарственные препараты, взрывчатые вещества, ядовитые химикаты и так далее. Даже без включения в этот перечень неких экзотических продуктов, мы понимаем, что у нас есть все основания для желания и ожидания введения разумных ограничений на производимую посредством АТП продукцию.

С инженерной точки зрения необходимо обеспечить проектирование только таких АТП-систем, которые способны производить ограниченный набор продуктов. Еще одной проблемой является установление ограничений на ключевые технологии — машины, используемые для изготовления других и более совершенных машин. В данном случае необходимо будет обеспечить прозрачность и осуществлять надзор на заключитель-

ных стадиях разработки. Это, в свою очередь, потребует осуществления соответствующих программ, политик и создания институтов, что может быть осложнено наличием конкуренции между коммерческими организациями и национальными правительствами.

Таким образом, производственные технологии, основывающиеся на АТП, задолго до своего появления на свет повлекут за собой немалые политические трудности. Несмотря на различия в их сути, трудности происходят из материальных основ АТ-производства. Точно так же проблемы контроля над технологией производства ядерного оружия определяются такой физической основой, как способность атомного ядра к делению.

Масштабы и организация производства

Прорывной потенциал АТП обусловлен не только широким спектром продукции, но и масштабом производственных мощностей. Мы видели, что благодаря своим характеристикам производство, основывающееся на АТП, способно значительно сократить длину пути от проектирования до прототипов и от первых образцов до стремительного завоевания доминирующих рыночных позиций, в основе которых лежат невиданные ранее преимущества в издержках и эксплуатационных свойствах. В данном случае стремительность является относительной, так как отдельные продукты будут продвигаться на рынок быстрее, чем отрасли в целом. Но естественная динамика конкуренции резко ускорится. Экономические изменения, которые приведут к устареванию целых отраслей (не нескольких, а многих) и созданных в них цепочек поставок, очень быстро достигнут макроэкономических пропорций. Происходящие события потребуют проведения экономического анализа, в котором учитывалось бы сокращение рабочих мест в различных секторах, падение реальных цен на самые разные товары и, как следствие, изменение покупательской способности и спроса.

С другой стороны, огромный с точки зрения предложения потенциал полного изобилия способен привести к широкому распространению повышенного спроса. Независимо от того, рассматриваем ли мы проблему с корпоративной или общечеловеческой точки зрения, креативный экономический прорыв будет полным и в своем созидательном, и в своем разрушительном измерениях.

Знание истории позволяет предположить, что для замедления темпов экономических изменений и роста издержек людей, вызванных экономической перестройкой, государства будут предпринимать различные масштабные действия. Для того чтобы вмешательство государства было эффективным, необходима будет координация действий в рамках отдельных стран и в рамках глобальной экономики.

Я оставляю на рассмотрение читателей возможные исходы в духе «победитель получает все», а также ответ на вопрос о том, насколько привлекательна жизнь в мире, в котором им едва ли суждено оказаться на вершине. Что касается возможных требований непропорциональных победителей, по правилам той или иной игры каждое из них должно рассматриваться в перспективе. Каждое новое достижение в сфере технологий — это еще один небольшой кирпичик в башне достижений, складывавшейся в течение тысячи лет руками и разумом миллионов людей. В соответствии со сложившейся практикой и освященным веками принципом эта башня является общим наследием человечества. Вклад в ее строительство вносит каждое поколение. Поэтому каждый из живущих ныне имеет право только на время объявить своей собственностью лишь крошечную часть башни.

Экономическая переоценка

В экономике, в которой происходят преобразования, вызванные внедрением производства, основывающегося на АТП, должна будет произойти полная переоцен-

ка (или, вернее сказать, уценка) множества различных материальных активов, включая месторождения железа, нефтяные поля и основные производственные фонды (например, оборудование тепловых электростанций). Эти активы отличаются от потребительских товаров, так как их чистая приведенная стоимость зависит от разработок, выходящих далеко за пределы обычных краткосрочных горизонтов. Следовательно, оценки их стоимости весьма чувствительны к долгосрочным ожиданиям. Что касается приводившихся выше примеров, то ожидаемое падение спроса на металлы и нефть означает снижение ожидаемой будущей стоимости месторождений железа и нефтеносных полей, обуславливающее тенденцию к уменьшению цен на ресурсы и росту потребления. Схожим образом ожидание полного устаревания тепловых угольных электростанций означает прогнозируемое снижение их чистых приведенных стоимостей, что ведет к отказу от инвестиций в расширение мощностей.

Таким образом, изменение ожиданий относительно темпов внедрения и последствий развития технологий АТП-уровня способно привести к переоценке рисков и чистой приведенной стоимости широкого спектра различных активов. Кроме того, прогнозы краткосрочных цен на активы являются предметом рассмотрения второго порядка. Они зависят от ожидаемых изменений в прогнозах третьих лиц и их последствий для оценок активов.

Экологические перспективы

Перспективы огромного увеличения объемов производства вызывают опасения потому, что массовое внедрение даже самых чистых технологий с низкими вредными выбросами все же может привести к увеличению отрицательного воздействия на природу. Результат будет зависеть от культурных ценностей и совместных действий, основанных на стимулах и регулировании.

Как и в случае с переоценкой ресурсов и капитала, непосредственные воздействия могут оказывать долгосрочные ожидания. Имеются в виду не просто рыночные оценки, но и баланс опасений, влияющий на политические действия. Например, перспектива обращения вспять в некоем неопределенном будущем тенденции к увеличению уровня углекислого газа может воздействовать на мнения относительно предпринимаемых сегодня мер по сокращению выбросов. В свете неопределенности временного расписания технологического развития, а также сохранения необратимых экологических воздействий, риски нанесения ущерба климатической системе Земли остаются слишком высокими. Нет и не может быть никаких гарантий ни быстрого, ни медленного развития, и у нас нет оснований допускать ни первое, ни второе.

Что касается последствий прогнозирования экологических решений, то ожидания быстрого эффекта сокращаются в обоих направлениях. Сценарии, основывающиеся на предположениях о быстром восстановлении природной среды, предусматривают снижение ценности инвестиций в крупные, длительные деструктивные проекты. Случаи постепенного сокращения ущерба могут склонить баланс в пользу попыток изначально избежать отрицательных воздействий.

Согласованные ожидания, интересы и ответные действия

Повторюсь, здравое рассуждение об ожидающих нас перспективах требует попытки рассмотрения всего комплекса взаимосвязанных проблем. Поскольку внедрение технологий производства, основывающегося на АТП, влечет за собой множество последствий, непротиворечивый подход к оценке потенциала будущего не допускает сосредоточения внимания на некоторых из них и игнорирования всех остальных, и не стоит представ-

лять себе этот процесс как накладывать локальных изменений на фон традиционных ожиданий.

Например, новые достижения в медицине сулят увеличение продолжительности здоровой жизни людей. Следовательно, современные демографические прогнозы утрачивают всю свою ценность. Что это означает для будущих расходов на выплату пенсий? Изменение всего одного числа в электронной таблице, построенной на основе стандартных прогнозов, означало бы, что предполагаемые исходы бессмысленны в будущем, в котором более низкие издержки производства существенно облегчают бремя поддержки неработающего населения. В свою очередь, перспективы увеличения продолжительности *здоровой* жизни людей обесценивают традиционные ожидания хронических болезней и высоких затрат на здравоохранение. Таким образом, последствия применения технологий АТП-уровня для медицины, продолжительности жизни людей, их здоровья и для экономики должны рассматриваться комплексно, что позволит увидеть целостную картину будущего.

Согласованность имеет существенное значение и для сферы экономики. Рассматривая традиционную картину будущего, мы можем попытаться дать прогноз влияния на занятость, исходя из опыта отдельных секторов промышленности (например, металлургии). В то же время условием реалистичности экономического анализа является его осуществление в более широких рамках системной трансформации. В мире, в котором применяются технологии АТП-уровня, круг проблем и вариантов выбора не будет иметь почти ничего общего с прошлым опытом. Чрезмерная опора на аналогии с прошлыми событиями будет предлагать знакомые, но нереалистичные последствия, отказывая в рассмотрении нового незнакомых круга потенциальных реакций.

Мы вновь можем воспользоваться аналогиями, которые предлагает нам продолжающаяся революция в информационных технологиях. И информационная революция, и АТП-революция приносят с собой неви-

данное ранее расширение диапазона возможностей, основывающееся на технологии общего назначения. При этом в каждой из сфер наступает специфическое полное изобилие. Мы были свидетелями рождения условно-бесплатной экономики в сфере цифровых продуктов, таких как программное обеспечение, тексты, изображения и видеозаписи. Вероятно, естественный ход событий приведет к расширению этого подхода на файлы, в которых будут содержаться описания АТП-продуктов, и возникновению (если мы отставим в стороны затраты на приобретение исходных материалов) экономики дарения в сфере материальных объектов (но в пределах каких установленных ограничений?). Рассмотрение общих и отличающихся черт двух революций могло бы способствовать созданию более надежной концептуальной основы.

Что касается отдельных проблем (например, падения спроса на сталь), то волнение относительно того, что ими могут пренебречь просто в силу отсутствия должного внимания и инерции, представляется естественным. Но в мире, стремящемся к согласованным сценариям, специфические трудности во многих случаях будут рассматриваться как примеры частных случаев более общих проблем — например падение спроса на сталь не будет уникальным случаем.

Схожим образом обеспокоенность отдельными угрозами неограниченного применения АТП — того или иного материала или устройства — будет возникать отнюдь не обособленно. В мире, стремящемся к реализации последовательных непротиворечивых сценариев, специфические тревоги относительно злоупотреблений технологиями АТП-уровня будут рассматриваться как различные аспекты более общей проблемы ограничения применения АТП. При условии, что основное внимание будет сосредоточено на согласованных сценариях и последовательных ответных действиях, наиболее целесообразно, чтобы важнейшие опасения рассматривались как часть более широкой повестки дня. Если же

в обсуждении будут доминировать несогласованные сценарии, вероятность того, что отдельные тревожные аспекты утонут в общем хаосе, существенно повышается. Соответственно уменьшается и вероятность нахождения правильных решений. Цивилизационные преобразования заслуживают большего, чем разрозненные действия в ответ на новые и новые вызовы.

Рассмотрение несогласованных сценариев будет способствовать непоследовательным ответным действиям, что приведет к возникновению или усилению совсем не обязательных рисков. В частности, правильно понимаемая перспектива полного изобилия способна ограничить воздействия некоторых источников конфликта. Участники соперничества за сохранение рынков, ресурсов и власти, в борьбе за которые промышленное производство противопоставляется необходимости защиты природной среды, обнаруживают себя в ситуации близкой к игре с нулевой суммой, когда выгоды получаемой одной стороной означают нанесение ущерба другой стороне и где каждая из сторон ожидает выигрыша от ошибок соперников. Перспектива полного изобилия в каждой из этих областей предлагает выигрыш всем сторонам. Но в том случае, если стороны движимы неконтролируемыми импульсами, привычки к борьбе, к противостоянию чреваты возникновением далеко не обязательных конфликтов и издержками упущенных возможностей. Так, опаснейшая ситуация может сложиться в военной сфере. Если стороны принимают на первый взгляд рациональные решения, но они основываются на несогласованных сценариях, в погоне за иллюзорными выгодами возрастает риск катастрофических последствий.

* * *

Достижение общего реалистичного понимания требует учета и знаний, и неопределенности. Физика предлагает нам исходный пункт, фактическую основу для знаний о некоторых аспектах технологического потенциала, ко-

торый, в свою очередь, представляет комплекс отчасти предсказуемых возможностей и трудностей.

Поднимаясь над этим порогом (и инженерными расчетами), мы можем рассматривать перспективы хотя и на рациональной основе, но без уверенности в отдельных исходах. Что касается времени создания и внедрения будущих технологий, победителей и проигравших, политики, событий, ответных действий политических и экономических воздействий, а также социальных результатов — во всех этих областях нет и не может быть сколько-нибудь надежных предсказаний. Однако глубокое понимание всех этих проблем будет способствовать принятию более правильных решений.

Одна из форм знаний, ориентированных на будущее, может быть верной: знания о диапазоне самой неопределенности, о спектре вопросов, на которые невозможно получить достоверные ответы. Признание и изучение неопределенности может иметь важное значение, поскольку она воздействует на принятие решений о рациональных вариантах выбора, направленных на предотвращение риска. Так что в углублении знаний о неопределенности нет ничего парадоксального.

В общем случае принятие здравых, не приемлющих риска решений предполагает опору на консервативные предположения. Однако неопределенность относительно сроков разработки АТП привносит в «консервативность» два противоположных значения. Когда мы обдумываем потенциальные решения проблем (экономических, медицинских, экологических и так далее), консерватизм заключается в допущении, согласно которому на всем пути к полному изобилию мы будем сталкиваться с длительными задержками. В то же время в размышлениях о возможных новых проблемах консерватизм состоит в предположении, что, по крайней мере, один из путей окажется удивительно коротким.

Безопасность в условиях необычного будущего

ОТ КОВАНОВОГО железа до цифровых микросхем — перспективные базовые технологии всегда находили военное применение. Не будут исключением и технологии АТП-уровня. Но в отличие от предыдущих прорывов, они сулят нам изменение и основных правил, и контекста самой игры. Нас ожидает будущее особого рода, так как АТ-технологии способны в изобилии обеспечить все страны мира и их жителей как традиционными товарами, так и системами безопасности. Поэтому любая стратегия управления возможностями АТП должна принимать во внимание обе стороны возможного взаимодействия материального богатства и технологий осуществления контроля.

Появление прорывных технологий контроля отнюдь не обязательно повлечет за собой дестабилизацию военного и общественного порядка. В тех случаях, когда эти технологии будут применяться достаточно разумно, они способны предоставить новые средства сдерживания конфликтов, равно как и средства защиты мягких форм социального порядка, основывающихся на ответственности властей, способствующих как расширению свобод, так и повышению степени безопасности.

Однако эти же самые технологии способны подстегнуть гонку вооружений, целью которой является подготовка к войне, или расширить возможности секретного наблюдения, угрожающие даже тем, кто считает себя на-

деленными властью. Действия, ведущие к возрастанию такого рода рисков, чреваты ненужными и не поддающимися оценке угрозами для государств и отдельных граждан, поскольку попытки установления бесконтрольной власти, как показывает история, всегда заканчивались плачевно. И наоборот, стабильное и ответственное государственное руководство основывается на вдумчивом консенсусе, координации и создании институтов.

Для того чтобы начать аргументированную дискуссию о рисках и возможностях, мы должны изучить возможности, предлагаемые технологиями безопасности АТП-уровня, в контексте более широкой АТП-трансформации. Несмотря на ограниченность современных знаний, сегодня можно увидеть некоторые из движущих сил, которые следует принять во внимание при формулировке согласованных вопросов о будущем, выходящем за рамки обычных ожиданий.

Прорывной потенциал: военные асимметрии

Усилия, направленные на разработку конкурентных технологий, очень редко осуществляются синхронно. История технологической конкуренции, будь то ядерное оружие, спутники, компьютерные микросхемы или самолеты-невидимки, показывает, что в большинстве случаев различия во времени достижения соперниками технологических уровней измеряется годами. В случае с АТП высокая скорость их доведения до поздних этапов производства и масштабирования приведет к усилению диспропорций в военных потенциалах. Поэтому легко представить себе ситуацию, когда измеряемая месяцами или днями асинхронность в разработках приводит к значительной асимметрии, даже в ситуации неполного использования потенциала технологий АТП-уровня.

Рассмотрим относительно традиционные воздушно-космические системы. Внедрение в этой области атомарно точного производства способно привести к более чем тысячекратному сокращению единичных издержек и одновременному повышению эксплуатационных характеристик продукции (увеличение тяговооруженности и дальности действия, улучшение датчиков и увеличение вычислительной мощности и т. д.). Имея АТП, \$10 миллиардов было бы достаточно для создания производственной инфраструктуры, способной обеспечить выпуск высокоэффективных летательных аппаратов общим весом в 10 миллионов тонн — в течение всего нескольких дней. Для сравнения заметим, что летательные аппараты общим весом 10 миллионов тонн сопоставимы с 10 миллионами обычных крылатых ракет, что в 1000 раз больше, чем их количество, находящееся сегодня в арсенале США.

Потенциальные количественные и качественные асимметрии подобных масштабов открывают возможность завоевания подавляющего превосходства в сфере вооружений. Конкуренция без ограничений обязательно приведет к новой гонке вооружений. Это сформирует контекст разработок технологий АТП-уровня в целом — восприятие технологий и их значения, соотношение применения АТП в производстве вооружений и в интересах экономического развития, борьбы с климатическими изменениями, медицинских исследований и так далее. Более того, введение режима секретности приведет к повышению степени неопределенности для всех участников процесса, поскольку сам характер технологий затрудняет отслеживание относительных позиций сторон в гонке вооружений и прогноз прорывных технических решений.

Перечисленные выше обстоятельства требуют проведения тщательной переоценки национальных интересов и политических курсов на международной арене. Информированное суждение может быть вынесено только на основе внимательного отношения к технологическому потенциалу и историческим примерам.

Прорывной потенциал: нелетальное оружие

Производственные мощности АТП-уровня могли бы применяться для создания более крупных арсеналов такого смертоносного оружия, как ракеты и бомбы. Но усовершенствования в технологиях и значительно более низкие издержки откроют возможность обращения к принципиально иным вариантам действий. В частности, сдвиг в относительных преимуществах не смертельных вооружений создаст основу для глубоких изменений в практике применения вооруженных сил.

Создание в 1950-х гг. термоядерного оружия стало триумфом смертоносности над точностью. Обладавшие им государства получили возможность вести войну с наименьшей за всю историю человечества стоимостью в расчете на одну жертву. В то же время термоядерное оружие не могло использоваться для поражения небольших отдельных целей, так как взрыв водородной бомбы или боеголовки межконтинентальной ракеты привел бы к массовой гибели гражданского населения, оказавшегося в зоне поражения взрыва и последующего радиоактивного загрязнения местности. Показательно, что на протяжении более пятидесяти лет ядерное оружие поддерживалось в режиме непрерывной готовности к применению, но использовалось только в качестве угрозы в периоды обострения международной напряженности. Современные системы вооружений развиваются в сторону нанесения гораздо более точных ударов, характеризуются меньшим поражающим воздействием и легкостью применения.

В наши дни источниками новостей являются миниатюрные летательные аппараты, ракеты и снаряды с лазерным наведением, беспилотные летательные аппараты и системы наблюдения, что указывает на интерес к дистанционному применению смертоносного оружия со снайперской точностью.

Однако мы должны помнить, что обычно целью войны является принуждение, а не убийство. Как писал

Сунь Цзы: «Вершина военного искусства заключается в том, чтобы преодолеть сопротивление противника, не вступая в сражение». Наибольшей известностью пользуются слова К. фон Клаузевица о том, что война есть «продолжение политики другими средствами». Следовательно, важнейшая цель применения оружия — принуждение. Пока убийство военных и населения является более экономичным способом ведения боевых действий, но совсем скоро экономика передовых технологий и производства с низкими издержками приведет к тому, что вне конкуренции окажется несмертельное оружие.

Представьте себе, что обычным военно-воздушным силам противника противостоит «рой» недорогих беспилотных летательных аппаратов. Наличие достаточного количества беспилотников позволяет организовать действенную противовоздушную оборону. Например, они могли бы просто принимать на себя вражеский огонь до тех пор, пока у авиации противника не иссякнут боеприпасы. Достаточное количество находящихся на боевом дежурстве беспилотников, оснащенных необходимыми датчиками и высокоточным оружием, могли бы поражать вражеские самолеты прямо на аэродромах, баллистические ракеты — на разгонных участках траекторий, крылатые ракеты — сразу после их запуска, и так далее. При этом показатели смертности будут минимальными. Аналогичные стратегии могут использоваться для подавления корабельного оружия, а плотная сеть недорогих датчиков не оставит ни малейшего шанса вражеским подводным лодкам. Войну можно было бы проиграть или выиграть еще до начала активных боевых действий. Аналогичным образом, точное поражение гражданских объектов могло бы использоваться для оказания давления или парализации общества в целом. В результате всех этих изменений война стала бы менее дорогой как в денежном измерении, так и с точки зрения человеческих жертв (полное их отсутствие с одной стороны и небольшие потери — с другой).

В результате начать войну и одержать в ней победу будет проще.

В данном случае мы видим логичный результат непрерывно растущей зависимости от беспилотных летательных аппаратов. Виды вооружений, позволяющие сократить боевые потери, способны подтолкнуть государство к более воинственной политике. Иллюстрацией данного принципа является широкое боевое применение беспилотников армией США, в том числе для поражения живой силы противника. Разработки различного доступного, несмертельного, дистанционно управляемого оружия будут продолжаться, все более разрывая связь между ведением боевых действий и убийством людей. Чем слабее будут угрызения совести, тем ниже порог, препятствующий действию. Поскольку у противника, столкнувшегося с подобной перспективой, будет меньше оснований ожидать сдержанности, рассматриваемая нами сторона уравнивает логику упреждающего удара.

*Прорывной потенциал:
измерение гражданского общества*

Потенциал воздействия производственных возможностей АТП-уровня не ограничивается военной сферой. Передовые достижения в наноразмерной электронике уже принесли нам недорогие запись и воспроизведение изображений, а также хранение и передачу данных в карманные устройства. Благодаря устремившимся вниз ценам, все большее распространение получает использование свойств, которыми обладают компактные датчики, компьютеры и телекоммуникационные системы. Граждане различных стран используют эти технологии в своих собственных интересах. Например, в Тунисе и Египте они применялись для усиления давления на центральные власти посредством публикации сведений об их реакции на массовые протесты. Эти действия оппозиции привели к повышению политической цены

силового подавления народных выступлений. Движущей силой новых технических тенденций были передовые достижения в технологиях производства полупроводников, не относящихся к атомарно точным. Вероятно, прогресс в этой сфере еще более ускорится.

Конечно же, выгоды получают не только рядовые граждане. Чем более компактными и дешевыми становятся эти технологии, тем ниже расходы государства на повышение плотности сетей наблюдения. Параллельно улучшается используемое властями оборудование и программное обеспечение, применяемое для распознавания изображений. Современные технические возможности позволяют с поразительной точностью определять объекты, людей и их лица. Здесь, в Великобритании, я живу в стране с самой высокой в мире плотностью частных и государственных камер наблюдения. Все более широкими и плотными становятся сети наблюдения в США и Китае.

Даже на современном уровне развития возникают все более острые вопросы, связанные с распространением технологий наблюдения и беспилотных летательных аппаратов. С точки зрения технического развития сегодня есть все возможности для разработки и размещения автономных систем, способных наблюдать, распознавать и передавать информацию о людях и событиях, а также выводить из строя, помечать, убивать или домогаться людей, посредством вмешательства программы или человека. Одновременно имеется возможность непрерывного сбора доказательств, которые могли бы использоваться в судебных процессах. Данное соображение имеет решающее значение для общества, требующего законного, ответственного государственного управления.

Выработка согласованных ожиданий относительно будущего, движимого АТП, требует принятия во внимание всех этих тенденций до начала и в период перехода к новым технологиям. Рассматриваемые тенденции вызывают обеспокоенность и создают возможности, которые заслуживают самого глубокого анализа. Я убежден,

что деятельность, направленная на защиту и создание новых институциональных структур для управления новыми возможностями, является гораздо более продуктивной, чем защита или противостояние базовым возможностям самим по себе.

Парадокс полной внутренней безопасности

Технологические достижения, определяющие развитие в одном направлении, могут привести к прямо противоположным результатам. Я полагаю, что это положение справедливо в отношении систем безопасности и их последствий для свободы и государственного управления. История предлагает нам немало тому примеров.

Выше мы отмечали, что достижения в военных технологиях сначала привели к повышению показателей смертности в результате вооруженных конфликтов, а затем к их снижению. Единичные убийства с помощью топоров и мушкетов уступили дорогу массовым смертям под пулеметным огнем и взрывами атомных бомб. В наши дни массовые убийства все чаще замещаются единичными в исполнении скрытных частных лиц и беспилотников, используемых правительствами различных стран.

Оглядываясь в прошлое, мы видим, что новые достижения в социальных технологиях государственного управления приводили сначала к ограничению свободы личности, а потом к ее росту. Появление первых институтов власти в аграрных обществах означало введение еще одного уровня контроля для представителей их высших слоев, когда жизни подданных передавались на усмотрение правителя. Эволюция государственных институтов означала расширение их власти и возрастание потенциала смертности. Но в некоторых странах и в определенное время увеличение власти привело к созданию обществ, где главенствует закон и есть опре-

деленная свобода — личная безопасность, свобода выбора и ограничение на применение насилия в невиданной никогда в прошлом степени.

Вероятно, той же самой парадоксальной парадигме могли бы следовать и технологии безопасности. Новые возможности наблюдения уже продемонстрировали свой потенциал постепенного ограничения свободы. Однако их применение может привести и к противоположному эффекту — к повышению степени безопасности и расширению свободы людей. В наши дни в центре внимания проходящих в США дискуссий о внутренней безопасности находятся террористические атаки. Американцы обсуждают вопросы о приемлемых рисках, а также о эффективности и допустимости секретных мер безопасности, которые применяются в условиях скрытности и ограниченного общественного контроля. Исход дебатов зависит от ответов на вопросы о том, в достаточной ли степени ограничения личных свобод компенсируются более высоким уровнем безопасности и насколько обоснованным является режим секретности, установленный в отношении наблюдателей и направленный на укрепление слабых мест в системах безопасности.

Может ли баланс мнений измениться с большей интенсивностью и эффективностью наблюдения? Обратимся к одной из крайностей потенциальных возможностей. Представьте себе мир, в котором органы государственной безопасности действительно способны выявлять и расстраивать планы террористов. Террористический акт почти невозможно будет ни спланировать в обстановке должной секретности, ни (в случае удачной планировки) организовать, ни (в случае удачной организации) осуществить. Возможно, мир и будет более безопасным. Но, как мне кажется, защитники гражданских свобод боятся наступления такого мира более всего на свете.

Нужен ли нам такой мир?

В случае решения проблемы национальной обороны, дополнительный вес неизбежно приобрели бы другие

тревоги. Например, наличие достаточно эффективных средств сбора доказательств означало бы, что справедливые судебные решения могли бы выноситься по результатам открытых процессов. В процессе движения к миру, базирующемуся на подобных основаниях, ценность сохранения в тайне доказательств и их источников должна была бы неизбежно снижаться. Одновременно возрастала бы ценность открытых судебных слушаний, позволяющих проверять случаи злоупотреблений со стороны властей, тем самым обеспечивая защиту свободы в рамках закона.

Способны ли мы одержать победу в «длительной войне» с терроризмом? Тенденции развития технологий позволяют предположить, что на этот вопрос будет получен ответ «да». В этом случае долгосрочная проблема, вероятно, состоит не в том, чтобы защитить население различных стран от нападений внешних врагов, но в защите от разрушения изнутри структуры гражданских обществ, избегая чрезмерного укрепления непрозрачных и неподотчетных обществу аппаратов безопасности. Последние, как свидетельствует история, угрожают всем и каждому, не только обществу в целом, но и тем, кто воображает, будто способен контролировать органы безопасности.

Если свобода, ответственность и эффективная безопасность не обязательно должны противоречить друг другу, то было бы важно изучить возможности их согласования. Я вижу настоятельную потребность в дискуссиях, которые отражали бы возможно более общее согласие о том, что было бы хорошо в принципе при условии относительно низких затрат. Например, большинство из нас высоко ценят личную безопасность, национальную безопасность и традиционные свободы, несмотря на непрерывно ведущиеся жаркие споры о том, чем из них и в какой степени мы должны были бы пожертвовать для того, чтобы выиграть в чем-то одном или другом. Как правило, ни одна из сторон дискуссии не отвергает наиболее значимые для других ценности, несмотря

на то, что участники могут придавать различный вес общим ценностям. Однако политика, за которую выступает одна из сторон, может противоречить устремлениям других групп. Перспектива полного изобилия позволяет существенным образом улучшить сложившееся положение, предлагая варианты выбора, открывающие возможность улучшения исходов по нескольким критериям одновременно. В случае признания перспективы возможных в будущем лучших вариантов выбора, все стороны могли бы (и имели бы все основания) ожидать более полного удовлетворения своих интересов и начать поиски более полного общего согласия¹.

Гражданское общество располагает на удивление широким спектром различных вариантов управления информационно насыщенной безопасностью. В то же время технологии сбора информации, предоставления доступа к ней, реагирования и ответственности очень редко оказываются в центре общественных дискуссий, даже в самых общих чертах. Изучая потенциальные решения проблем, институтов, законодательства, цифровых технологий и процедурных правил, мы должны рассматривать их комплексно и творчески в приемлемых с точки зрения культуры сочетаниях. В противном случае мы рискуем многое упустить из виду. Я убежден, что все эти средства в совокупности могут быть применены для упорядочения прозрачности и правоприменения допустимым и удивительно эффективным способом. Это приведет к увеличению персональной и национальной безопасности в открытом и динамичном гражданском обществе.

1. Аналогично, как отмечалось выше, промышленные технологии вынудили человечество пойти на компромиссы, впоследствии «столкнувшие лбами» защитников природы и экономического развития, хотя ни та, ни другая сторона не выступала ни за сохранение бедности, ни за разрушение окружающей среды. И вновь, заглядывая вперед, мы видим, что новые возможности способны принести с собой выгоды для обеих групп.

Более тесное соответствие национальным интересам

Мы рассмотрели несколько направлений изменения технологий безопасности в случае развития технических возможностей АТП-уровня и пришли к выводу о необходимости изучения новых компромиссов и вариантов выбора во внутренней сфере. На международном уровне точно так же необходимо изучение новых компромиссов и вариантов выбора, связанных с изменениями жизненно важных национальных интересов, что будет иметь глубокие последствия для безопасности. В частности, значение доступа к рынкам и ресурсам будет снижаться, а решающее значение приобретет ограничение доступа к технологиям АТП-уровня.

Ослабление конкуренции за рынки и природные ресурсы

Широкое международное распространение соответствующих технических возможностей производства АТП-уровня привело бы, прежде всего, к ослаблению конкурентного давления на доступ к рынкам и природным ресурсам. Рынки экспорта утратят былое значение, так как с точки зрения материального благосостояния импорт и торговый баланс будут играть существенно менее важные роли. Природные ресурсы более не будут ни ограниченными, ни важными.

В наши дни страна, не имеющая доступа к поставкам нефти, является энергозависимой. Доступ к необходимым техническим возможностям производства АТП-уровня позволил бы ей быстро и экономично достичь энергетической независимости. Импорт нефти уже не имел бы решающего значения.

Все то же самое может быть сказано в отношении промышленных сырьевых материалов, компонентов и продуктов. Широкий доступ к ключевым технологи-

ям АТП-уровня означал бы практическую возможность автаркической экономической политики государства. Сельское хозяйство в «закрытых помещениях» с его высочайшей продуктивностью позволило бы полностью удовлетворить потребности в продовольствии даже таких стран, как Сингапур, с его высочайшей плотностью населения. Действительно, нам было бы трудно найти любой из внешних ресурсов, который имел бы жизненно важное значение для той или иной страны. Тем самым исчезло бы имеющееся основание международных конфликтов, уходящее корнями в многовековую историю.

*Сильная общая заинтересованность в ограничении
негосударственных акторов*

Как нам известно, основывающиеся на атомарно точных технологиях производственные системы могут проектироваться так, чтобы производить только отдельную категорию товаров. Это могут быть некоторые или разнообразные потребительские товары, энергетические системы, медицинские продукты и тому подобное, точно так же как и компоненты, необходимые для расширения производственных мощностей. В общем, все, что угодно, за исключением продуктов, представляющих угрозу безопасности. Машины, построенные с использованием специализированных возможностей, имеют внутренние ограничения. Поэтому основания для тревог относительно доступа к невоенным возможностям носят не стратегический по своей природе, а преимущественно экономический, экологический и (в широком смысле) регулятивный характер.

В то же время неограниченный доступ к неограниченному диапазону технологий АТП-уровня означал бы, что их непредсказуемыми возможностями могут воспользоваться враждебно настроенные частные лица. Тем самым возникли бы неприемлемые и непредсказуемые риски. Недопущение подобного развития событий

является жизненно важным национальным интересом самого высокого порядка, общим для всех государств мира. Он способен стать движущей силой для расширения всемирного сотрудничества в вопросах безопасности, связанных с применением технологий АТП-уровня.

Каждое государство жизненно заинтересовано в обеспечении внутренней безопасности во всех остальных странах мира и в установлении эффективных глобальных рамок, ограничивающих распространение технологий АТП-уровня на своей территории.

*Уменьшение количества фундаментальных причин
для международных конфликтов*

В истории отсутствуют сколько-нибудь близкие параллели со сложившейся в наши дни ситуацией. В историческом и доисторическом прошлом конкуренция за природные ресурсы определяла процессы формирования обществ, усиление противостояния с соперниками и готовность к войне. От охотничьих угодий до нефтяных полей, контроль над территорией и доступ к ограниченным ресурсам всегда имел решающее значение с точки зрения силы и выживания. В наши дни открывается перспектива наступления эры резкого ослабления конкуренции за ресурсы.

Пока же соперничество за ресурсы остается одной из важнейших причин международной напряженности. Например, в основе конфликта, вызванного стремлением к установлению контроля над Восточно- и Южно-Китайскими морями, лежит допущение, согласно которому в середине XXI столетия государства будут по-прежнему заинтересованы во владении морскими месторождениями нефти. Поскольку развитие технологий АТП-уровня приведет к исчезновению тревог, связанных с обеспеченностью ресурсами, в планах, ориентированных на столь необычное будущее, возможности доступа к природным ресурсам не должны относиться к категориям ни первоочередных, ни существенно важ-

ных национальных интересов. Ожидать и появления технологий АТП-уровня, и продолжения борьбы за ресурсы, было бы непоследовательным и противоречивым по своей сути, побуждая к разработке необоснованно рискованных планов иллюзорного будущего.

Помимо материальных проблем XX век был отмечен идеологическим, по крайней мере, номинально, противостоянием. В наши дни на уровне великих держав идеологическая борьба отошла на второй план и более не обсуждается как один из вероятных поводов к войне.

Остающиеся внешние угрозы жизненно важным национальным интересам носят циркулярный характер, когда предпринимаемые ответные действия порождают ответные угрозы. В тех случаях, когда динамика определяется не фундаментальными интересами, а прошлыми событиями, этот цикл способен приобрести автономный характер. Например, во время гонки вооружений с участием США и СССР уровень военных угроз никак не соответствовал конфликтам материальных интересов — обе страны почти не конкурировали на рынках природных ресурсов, но стремились превзойти друг друга по количеству ядерных боеголовок и обеспечить гарантированное взаимное уничтожение. И наоборот, США и Европа конкурируют друг с другом едва ли не во всех измерениях экономических отношений. Но ни одна из сторон не проявляет сколько-нибудь заметной озабоченности неравновесием в военной мощи: запасы термоядерного оружия США, Англии и Франции значительно различаются (тысячи против сотен), однако в отсутствие недавней истории взаимных угроз отсутствие паритета не воспринимается как важное.

В то же время исторический конфликт и военные столкновения способствовали сохранению военной конфронтации между США и Китаем, несмотря на тесные экономические связи двух стран. Вообразить гонку вооружений между США и Европой довольно трудно, между США и Китаем — легко; более того, она уже идет, хотя и в высшей степени асимметрично.

Несмотря на непреходящее значение военной силы и разработки новых вооружений, неограниченная гонка с использованием технологий АТП-уровня сопровождалась бы серьезными ненужными рисками. В стратегическом контексте свойства, присущие технологиям и возможным направлениям их разработки, означают неизбежность столкновения с неизвестными в прошлом трудностями. Для того чтобы избежать грубых ошибок в трудной ситуации, необходимо будет пересмотреть риски и альтернативные стратегии, начиная с наиболее фундаментальных проблем.

Неопределенности, риски и направления дальнейших шагов

Глубокие изменения в национальных интересах требуют тщательного пересмотра общей стратегии. Средства и цели, риски и возможности, собственное восприятие своих интересов нынешними стратегическими конкурентами — мы не должны недооценивать ни один из этих факторов. Ожидающее нас в высшей степени необычное будущее никак не согласовывается с планами, которые были разработаны для применения в совсем другом мире.

Если мы попытаемся заглянуть вперед, становится очевидным, что некоторые виды знаний мы получим почти наверняка, другие — нет. Для изучения материального потенциала технологий АТП-уровня могут использоваться средства инженерных методологий, благодаря которым мы можем достаточно надежно установить нижние границы потенциальных технологических возможностей, в то время как их верхние рубежи часто остаются умозрительными. С точки зрения оценки временных сроков разработок физические расчеты оказываются не слишком полезными, в то время как статус и перспективы ускоренного развития атомарно точных технологий являются сильными довода-

ми в пользу развития технологий АТП-уровня в таком масштабе времени, который требует планирования действий при различных вариантах обстановки. Необходимо будет ответить и на знания, и на неопределенность.

Учитывая неустранимую неопределенность

В финансовых делах предполагается, что рынки ведут себя неожиданно, что определяет важнейшее значение оценки рыночных рисков. Да, инвесторы принимают свои решения, опираясь на информацию и знания в обычном смысле этого слова. Одновременно они учитывают и неустранимую неопределенность.

В ближайшие годы мы можем ожидать зарождения технологий АТП-уровня и быстрого последующего широкомасштабного их применения. Однако темпы прогресса непредсказуемы. У нас нет и не будет оснований для уверенных заявлений ни об относительно быстром, ни об относительно медленном технологическом развитии. Невозможность точно предсказать некий особый путь поступательного развития обусловлена хотя бы тем, что перед нами открыты самые разные направления движения в будущее и обязательно будут найдены возможности сократить путь к цели. Попытки заглянуть вперед во время зарождения тех или иных специфических технологий неизбежно приведут к открытию никем не ожидавшихся способов их практического применения. Помимо неопределенностей, связанных с технологическим развитием, будущие исходы непосредственно зависят от не поддающихся предсказаниям ожиданий, решений о выборе и следующих каскадом событий.

Таким образом, грядущая революция полного изобилия означает, что мы неизбежно окажемся лицом к лицу с неустранимыми неопределенностями. Как и в финансовых делах, этим неопределенностям вместе с достоверными знаниями должно быть отведено центральное место в процессе принятия решений. Знания и неопре-

деленности взаимодействуют друг с другом. Непредсказуемые перспективы во многих случаях требуют минимизации рисков и подготовки ситуативных планов; неизвестные факторы способны привести к предсказуемым результатам в тех случаях, когда известные переменные воздействуют на выбор других.

Кооперативные стратегии ухода от ненужных рисков

Совместные разработки могут позволить добиться снижения уровня неопределенности, в то время как скрытно ведущаяся конкуренция означает намеренное его повышение. Сужение круга противоречащих друг другу жизненно важных интересов и необходимость преодоления общих трудностей в управлении турбулентными процессами экономических перемен и изменений в сфере безопасности создают условия для того, чтобы началась новая гонка вооружений, которая с неизбежностью приведет к возникновению ненужных и непредсказуемых рисков.

По целому ряду причин осуществление секретных разработок привело бы к тому, что ни одна из сторон не была бы уверена в исходе соперничества и ни одна из них не могла бы с уверенностью ожидать прояснения ситуации на более поздних стадиях игры. Природа технологического пути развития проявляется, в частности, в ускорении развития сразу после преодоления технологического порога. В то же время переход через него не требует ни использования экзотических материалов, ни наличия специализированной инфраструктуры. Знания — ключ к достижению целей, но знания текучи и могут передаваться незаметно. В контексте скрытно осуществляемой гонки вооружений выход на новые рубежи был бы слишком непредсказуемым, его было бы слишком легко утаить и слишком трудно вовремя заметить. К тому же в данном случае велика

вероятность утечек. В этом контексте секретности для всех участвующих в гонке государств, и для мира в целом, неустраняемая неопределенность значительно возрастает.

Как известно, на объективном, материальном уровне переход к технологии АТП способен создать условия для достижения более полного соответствия национальных интересов; было бы нелепо, если бы ожидание такого перехода привело бы к повышению риска войны. Что может быть сделано в свете подобных перспектив?

Побуждения к секретным военным разработкам очевидны и реальны. Несмотря на риски пути, на который они выводят, односторонняя политика ограничений не способна опровергнуть его логику. Альтернативный путь предполагает акцент на открытости как средстве снижения уровней неопределенности и риска, а также сосредоточение внимания на общих проблемах и трудностях управления разрушающими переходами внутри страны и на международной арене. К числу проблем относятся и риски, связанные с обеспечением безопасности. Благо современные АТ-исследования представляют собой хорошую отправную точку.

Сегодня во множестве областей научные исследования носят в значительной степени международный характер. Международное научное сотрудничество превратилось в общепринятую форму исследований. Например, как правило, публикуемые в журналах *Science* и *Nature* статьи написаны несколькими авторами из разных стран. Следовательно, практически во всех областях науки между США, Европой, Китаем, Японией и Кореей происходит взаимный обмен данными. Скрытая конкуренция существует и в науке, но чаще всего соперниками являются исследовательские группы, стремящиеся к достижению результатов, которые они могли бы сделать достоянием всего мира посредством открытых публикаций в научных журналах. Международная культура научных исследований образует контекст для самых передовых работ в сфере АТ-технологий, задавая критерии

относительной открытости и прозрачности. Эта культура и ее институты могут развиваться и расширяться на уровнях, варьирующихся от личного выбора до институциональных решений, государственной политики и многосторонних соглашений.

Цели исследования формируют его культуру. В наши дни исследования в определенных атомарно точных областях — в самом широком их спектре — вносят важный вклад в практическое применение достижений медицины, разработок новых материалов, биотехнологий и технологического проектирования, а также в расширение фундаментальных знаний в таких дисциплинах, как химия, материаловедение, физика и молекулярная биология. Как правило, самые передовые исследования в наибольшей степени удалены от конкурентного применения их результатов, а их движущей силой является человеческое любопытство в самом широком смысле. К их числу относятся и перспективы решения глобальных проблем, естественным образом способствующие проведению совместных исследований. Стремление ученых к сотрудничеству может быть углублено и расширено исходя из политических соображений.

Усилия различных стран, изначально направленные на обеспечение и институционализацию хорошо структурированной прозрачности исследований и разработок, связанных с АТ-технологиями, способны создать внешние условия, благоприятствующие дальнейшим мерам по установлению доверия к разработкам друг друга и управлению технологиями АТП-уровня. Эта структура упорядоченной прозрачности, в свою очередь, могла бы послужить основой для многосторонних скоординированных усилий, цель которых состояла бы в обеспечении должного уровня безопасности, имеющего, как представляется, решающее значение для поддержания международной стабильности.

Для того чтобы встать на этот путь, необходимо четкое видение разработок, сосредоточенных на АТП, результаты которых послужат основой возникновения не-

обычного будущего — будущего, выходящего за пределы современных ожиданий, будущего, принципиально отличного от планируемого в наши дни. В реалистичных сценариях неординарного будущего должны учитываться и предсказуемые разрушительные силы, и неустраняемые неопределенности, равно как и потенциальные выгоды и преимущества (а может быть и необходимость) совместных международных ответных действий. Независимо от того, как отнесутся к этим необычным сценариям субъекты, действующие на других политических аренах, создание важнейших АТ-технологий с учетом заранее предусмотренных вариантов развития событий, представляется разумной стратегией снижения рисков.

Для того чтобы успешно пройти весь этот путь потребуется нечто большее, чем просто привычки, предпочтения и неформальные соглашения об обмене информацией. По мере приближения к важнейшим технологическим порогам, скрытые военные тревоги будут усиливаться, приобретая все более четкие очертания. Придет пора проверки всех аспектов нашей предварительной подготовки к приближающемуся будущему — степени общего понимания неопределенностей, проблем и изменившихся национальных интересов; уровня, степени и природы общего согласия о потенциально возможных направлениях действий; личных и организационных отношений, способных в случаях, когда давление перерастет в требование реальных действий, преобразовать согласованные последовательные видения и планы в эффективные политические решения и пригодные к осуществлению программы.

Открывающиеся перед нами пути будут ограничены политикой, а политика — это искусство возможного. Возможное будет зависеть от состояния мнений, а мнения формируются в разговорах, в диалоге, в обсуждениях.

Таким образом, программа действий начинается с разговоров.

Изменение повестки дня в дискуссиях о будущем

СПОСОБНЫ ли мы изменить ход истории и сделать наше будущее лучше?

В переходные периоды, да и в человеческих делах в целом, те или иные действия влекут за собой предполагавшиеся и непредвиденные последствия, часть из которых ожидалась, а другая — нет. Безусловно, действия осуществляются под влиянием восприятия — не только восприятия фактов, решений о выборе и потенциальных исходов, но и восприятия интересов, а также оценки самих результатов. Если копнуть еще глубже, то восприятие формируется под влиянием общих мнений, рождающихся из разговоров и дискуссий дома, на службе и на конференциях; благодаря чтению журналов, книг, редакционных статей и колонок; из обсуждений в блогах и дебатов в Интернете.

Каждая сфера нашей жизни зависит от того, о чем мы говорим и о чем умалчиваем. Решения о том, что следовало бы обсудить, могут помочь всем нам начать разговоры и дискуссии, формирующие восприятия. Тем самым определяются действия, в конечном итоге и создающие мир таким, каким мы его знаем.

В течение многих лет мне довелось быть свидетелем многократно повторявшихся схем дискуссий. Опираясь на полученный опыт, я хотел бы поделиться с читателями некоторыми мыслями о разговорах, оценках и действиях, а также о том, возможно ли «подтолкнуть» мир к лучшим исходам.

* * *

Перспективы наступления полного изобилия потребуют радикальных изменений ожиданий, воспринимаемых национальных интересов и планов. Но время перемен еще не наступило. В наши дни основная проблема, связанная с полным изобилием, заключается в том, чтобы добиться общего более глубокого понимания его перспектив и начать дискуссию о возможных ответных действиях, которая в большей степени основывалась бы на реальности. Вот почему столь важное значение имеет правильная формулировка вопросов и первоочередное внимание к тем из них, на которые имеются четкие и ясные ответы.

Для того чтобы обсуждение любой темы было продуктивным, необходимо непрерывно следить за тем, чтобы она оставалась в центре внимания. В отсутствие общей концептуальной основы, соответствующей рассматриваемой теме, дискуссия может уйти в сторону обсуждения второстепенных проблем. Этому немало способствуют путанные вопросы и неправильно понятые ответы. Если не устранить путаницу, мягко поправляя заблуждения, разговоры могут легко сойти с пути, приводя понимание проблемы в концептуальную ловушку. Так и произошло в конце 1990-х гг., и мы до сих пор разбираем обломки, образовавшиеся после крушения.

Отчасти из-за этой истории сама по себе концепция АТП до сих пор толком не принята¹. Связи со старыми мифами о нанотехнологиях привели к тому, что у многих людей понятие АТП отдаленно ассоциируется с целым рядом странных идей. Поэтому я считаю необходимым еще раз напомнить о важном положении: в тех случаях, когда речь идет о физической природе АТП-

1. Это справедливо не только в отношении АТП в целом, но и значимых научных деталей, вплоть до динамики молекулярной реакции, когда неправильное понимание научных вопросов способно отвлечь внимание от инженерных ответов.

технологий, уместные вопросы на эту тему относятся к физике и технике компактных производственных линий, обладающих огромными производственными возможностями. Имеется в виду перспективная производственная технология, последствия применения которой способны изменить будущее человечества, а не расплывчатые мечты, экзотические продукты или наножучки.

Разумное действие должно начинаться с обсуждения и определения когнитивной основы. Неправильное определение этой основы может стать фатальным. Определение более или менее правильной основы — лишь половина успеха. Таким образом, первым шагом в создании программы действий является обсуждение, которое помогает навести фокус на основные положения. Ниже мы рассмотрим несколько ключевых тем, но сначала выскажемся по поводу энтузиазма.

Об энтузиазме...

Мне кажется, что здесь я должен обратиться к некоторым из своих читателей. Надеюсь, что вы правильно поймете обращение, на первый взгляд противоречащее здравому смыслу, и примете его всем сердцем. Если вы находите идеи о перспективных технологиях серьезными, убедительными и волнующими, если вы способны представить себе образы будущего, далеко выходящие за пределы, описываемые автором, или видите решения неотложных глобальных проблем и чувствуете настоятельную необходимость поделиться с другими охватившим вас волнением, — очень вас прошу, лягте и полежите до тех пор, пока это ваше побуждение не исчезнет. В реальном мире проявления подобного волнения по понятным причинам становится спусковым механизмом негативной реакции. Почти все грандиозные идеи, на стороне которых выступали множество взволнованных сторонников, на поверку оказывались ошибочными, недостойными научного анализа. Чтобы

отличаться от адептов ложных воззрений, будьте добры, сначала помогите определиться с фундаментальными положениями, исправить ошибочные идеи и присоединяйтесь к обсуждению (только без крика).

К другим моим читателям я обращаюсь с просьбой помочь энтузиастам спуститься на землю, а также неустанно напоминать всем остальным, что повестка дня не должна определяться взволнованными неправильно информированными людьми, провоцирующими мощную отрицательную реакцию или развивающими чувство ассоциативной вины. В противном случае у них в руках окажется контроль над повесткой дня, но со знаком минус. Так уже было в прошлом, и мы обязаны не допустить повторения этой истории.

АТП как один из видов производства

С точки зрения базисной, материальной перспективы АТП как технология особого рода отделена от последствий ее применения самих по себе, точно так же, как производство кремниевых микросхем отделено от дискуссий о беспилотниках или авторском праве в Интернете.

В 1990-х гг. основные факты о производстве, основывающемся на АТП, были скрыты завесой пустых разглагольствований об удивительных космических кораблях, микросубмаринах, предназначенных для чистки артерий, и роботизированных наножучках, обладающих едва ли не магической мощью. В довершение всего эти басни каким-то удивительным образом оказались смешанными с материаловедением.

Мы обязаны не допустить повторения этой истории. В том случае, когда вопросы вращаются вокруг собственно АТП как производственной технологии, тема гипотетических возможностей ее применения, независимо от степени реалистичности, становится отвлекающим фактором. Если в процессе обсуждения это различие

начинает размываться, для того чтобы двигаться вперед, необходимо просто провести разграничительную линию между АТП самим по себе и его возможным использованием.

АТП-системы — это производственные мощности, хотя и отличающиеся от современных заводов и фабрик

В прошлом, когда о материальной природе АТП было на время забыто, образовавшийся пробел начал заполняться ложными идеями и технической мифологией. В центре нашего внимания всегда должна быть реальная картина: АТП-система представляет собой помещенный в специальный корпус завод, компактное устройство, объединяющее в себе моторы, системы передачи, конвейерные ленты и специализированные приспособления различных размеров. В большинстве случаев такое устройство будет подключаться к электрической розетке и, возможно, будет оснащено сенсорным дисплеем. Другими словами, оно будет во многом напоминать принтер.

Внутри «заводского» корпуса мельчайшие простые машины перемещают и соединяют молекулы для того, чтобы строить из них наноразмерные детали. Затем более крупные машины собирают микроскопические детали, чтобы изготовить более крупные компоненты. Процесс завершается тем, что машины обычного размера собирают все детали воедино, в результате чего мы получаем конечные продукты. Наименьшие по размерам машины направляют движение и связывание молекул, в то время как на всех последующих стадиях машины выполняют практически ту же самую работу, что и машинерия современных фабрик. Нет никакого волшебства. Есть достаточно крупные комплексные системы, построенные из огромного количества более простых машин.

Эта предельно конкретная картина способна вернуть дискуссию к той точке, в которой в 1990-х гг. разговор о реальных проблемах перешел на обсуждение фантастических предположений. Для этого достаточно ответить на подразумеваемый вопрос «Что это такое?», заметив, что, в сущности, система АТП представляет собой компактный завод в защитном корпусе.

Уменьшение размеров механизмов позволяет добиться выдающихся результатов

Необычными чертами АТП являются высокая производительность и атомарная точность, обусловленные характеристиками молекул и мельчайших машин. Эту прямую взаимосвязь продемонстрировать достаточно легко.

Малые и мельчайшие машины способны выполнять большое количество операций в секунду просто потому, что мелкомасштабные машины, пропорционально своим размерам, осуществляют движения в более короткое время. Высокочастотные операции, в свою очередь, открывают наноразмерным машинам возможность ежесекундно обрабатывать материалы, масса которых во много раз превышает собственный вес машин. Это и есть источник чрезвычайно высокой производительности, достигаемой в процессе создания атомарно точных строительных блоков.

Что касается атомарной точности самой по себе, то мелкие молекулы сырьевых материалов состоят из точно расположенных атомов. Размещенные в определенном порядке мельчайшие простые машины способны осуществлять точную сборку молекул, изготавливая более крупные атомарно точные компоненты. Последние, при условии точной сборки, будут подгоняться друг к другу, образуя атомарно точные целостные структуры. Данный принцип распространяется и на мелкие молекулы, и на гораздо более крупные объекты.

Между прочим, когда речь заходит о техническом контексте, довольно часто возникает необходимость объяснить, почему операции по атомарно точной обработке и изготовлению могут осуществляться в условиях неизбежных тепловых флуктуаций. Ответ прост: жесткие машины, то есть сопротивляющиеся изгибу и растяжению, упруго ограничивают траектории перемещения. Эти упругие ограничения способны удерживать амплитуду тепловых флуктуаций в интервале, не допускающем нежелательных столкновений между реакционно-способными молекулами. (В приложении I описываются механические, кинетические и термодинамические ограничения надежности, связанные с уравнением Аррениуса. Частота ошибок в АТП может быть доведена до более низких уровней, чем те, которые имеют место в цифровых устройствах).

Атомарная точность была достигнута более ста лет назад, и все же практика ее использования может быть расширена в огромной степени. Атомарно точное соединение реакционно-способных молекулярных компонентов открывает возможность производства необычайно прочных материалов, высокоэффективных солнечных батарей, ультраминиатюрных компьютеров и многого другого.

Параллели между АТП и цифровыми технологиями

Цифровая информационная революция предлагает нам удивительно подходящую модель грядущих радикальных преобразований. Изучение существующих параллелей способно помочь в формулировке более точных вопросов. АТП-системы, подобно цифровым информационным системам, содержат миллиарды мельчайших простых устройств, с высокой частотой производящие структуры, состоящие из неделимых единиц, битов или атомов, в соответствии с заложенной в компьютер про-

граммой. Точно так же, как биты сложены в байты, сочетания которых используются для создания файлов данных (аудиоданные для звуков, пиксельные данные для изображений и так далее), АТП откроет возможность создания различных сочетаний сложенных в молекулы атомов для производства структур, способных выполнять полезные функции. Подобно другим системам, основывающимся на цифровой информации (звуковым системам, принтерам), производственная технология АТП-уровня позволяет создавать устройства размером с настольный компьютер, предназначенные для производства практически бесконечного набора продуктов. Компьютерные файлы, необходимые для их изготовления, можно будет получать из глобальной цифровой библиотеки.

* * *

Все вышесказанное четко и ясно характеризует природу АТП. Если некая технология не предполагает использования компактных заводов, содержащих производственное оборудование, или она не позволяет создавать продукты с атомарной точностью, значит, об АТП не может быть и речи. С АТП могут быть связаны другие полезные технологии, но они по определению не являются тождественными. В тех случаях, когда в процессе обсуждения важнейшие его пункты начинают утрачивать четкие контуры, должны быть предприняты усилия, направленные на то, чтобы развеять сгустившийся туман. Я считаю, что в данном случае весьма полезной может оказаться цифровая аналогия.

Удивительный прогресс на пути к АТП

Глубокое понимание способностей современных технологий соответствовать и дополнять друг друга открывает перед нами удивительную картину прогресса, достигнутого на пути к технологиям АТП-уровня. Без этого

понимания мы рискуем прийти к выводу о том, что наука и техника топчутся на месте.

Не так давно довольно широкое распространение получила ошибочная идея, согласно которой атомарная точность является чем-то экзотическим и для ее достижения необходимо дожидаться неких прорывов в неизвестных областях. В действительности, поступательное развитие происходит удивительно быстро. Мы достаточно далеко продвинулись к главной цели и не видим сколько-нибудь трудных препятствий на оставшемся пути. Исследователи уже умеют проектировать и создавать миллиарды образцов структур, состоящих из миллионов атомов, то есть структур, определяемых на атомарном уровне. Сегодня основная проблема заключается не в достижении атомарной точности, но в увеличении типов таких структур и расширении масштабов выпуска.

«Нанотехнологии» превратились в бренд,
используемый для обозначения
совсем других направлений
исследований

Важнейшей целью нанотехнологий является создание атомарно точного производства. Вдохновленный громкими обещаниями, американский конгресс принял специальную программу, направленную на достижение этой цели. Но результаты осуществления нанотехнологической программы оказались в высшей степени отличными от ожидавшихся. Ее руководители дали новое определение «нанотехнологиям», сосредоточившись на разработке исключительно наноразмерных материалов и устройств, то есть на технологиях, столь же далеких от АТП, насколько одежда, цемент и провода отличаются от программируемого цифрового компьютера. Таким образом, большинство исследований, которые ре-

кламировались как «нанотехнологические», никоим образом не соответствовали широко распространившимся ожиданиям. Одновременно атомарно точная сборка бурно развивалась в молекулярных науках. В результате те, кто интересовался достижениями в области технологий АТП-уровня, были вынуждены искать их не в области так называемых нанотехнологий, а совсем в других сферах.

Ближайшие достижения будут иметь мало общего с передовым АТП

Несмотря на огромный прогресс, нам все еще предстоит долгий путь к АТП. Оценивая дистанцию, важно хорошо ориентироваться на местности, отделяющей нас от главной цели. Безусловно, одна из важнейших причин неправильного восприятия степени прогресса в развитии технологий АТП-уровня, заключается в том, что результаты отдельных шагов по избранному пути совсем не похожи на конечную цель.

Технологиям АТП-уровня потребуются технологии-предшественницы, у которых, в свою очередь, должны быть свои предтечи. Имеется в виду цепочка технологий атомарно точного производства, в которой каждое из звеньев помогает в создании инструментов, используемых в следующем звене. Самые короткие пути к цели предлагают нам технологии, не имеющие почти ничего общего с классическим представлением об АТП, так как первоначально в них будут использоваться мягкие материалы, маленькие и простые машины, иные операции, иные продукты и иные применения. Чтобы достичь результатов АТП-уровня: макроскопических, недорогих продуктов с высокими эксплуатационными характеристиками, потребуется использовать технические возможности АТП-уровня, которые будут открыты только тогда, когда мы приблизимся к созданию технологий, пригодных для масштабирования.

У нас есть все основания полагать, что первоначально скорость поступательного развития будет относительно небольшой. Постепенно она будет увеличиваться, а ближе к результату станет очень высокой. Очень важно понимать, где именно мы находимся и чего мы ожидаем.

АТП опирается на хорошо известные физические и инженерные принципы

На первый взгляд предположение, в соответствии с которым основные эффекты от применения технологий АТП-уровня должны основываться на неких новых принципах, что по неким, не очень понятным, причинам они должны олицетворять собой научный прорыв, является естественным. Но это ошибочное представление способствует занятию многими пассивной выжидательной позиции относительно того, что могло бы предложить нам АТП.

Чтобы задавать правильные вопросы, важно всегда учитывать текущее состояние знаний. Современное понимание передового атомарно точного производства основывается на данных исследовательской инженерии и на подробно документированном физическом базисе. Методы консервативной поисковой инженерии требуют, чтобы каждый аспект конструкции опирался на известные принципы хорошо известных физических систем, и (что имеет решающее значение) чтобы каждое необходимое инженерное условие соблюдалось с достаточно большим допуском, соответствующим остаточным количественным неопределенностям.

Возникает законный вопрос: позволяет ли подобный подход заполнить все функциональные роли в архитектуре АТП-систем? Я уверен, что если мы будем задавать правильные вопросы — базирующиеся на знании законов физики и относящиеся к тщательно выбранным консервативным вариантам конструкций, — то ответы будут четкими и положительными. При знаком-

стве с любым техническим обзором такого рода идей, мы должны всегда держать в уме следующее предположение: *на ключевые технические вопросы уже имеются ответы, которые, в сущности, могут быть и пересмотрены.*

Само собой разумеется, что в случае, когда нам уже известно достаточно хорошее решение, предложение неработоспособного подхода (и отказ от него без каких-либо новых предложений) не просто бесполезно, но вредно. Вопрос о том, как была решена (или обойдена) очевидная проблема является естественной частью процесса исследований, равно как и поиск пока не проявивших себя проблем, ошибок в предложенных решениях или предложение более лучших решений. Но в настоящее время в рассматриваемой нами области будет неразумно предположить, что мы упустили из внимания какое-либо очевидное опасение.

Передовые технологии приведут к возникновению различных исследовательских проблем

На разных этапах разработок будут возникать различные научные и инженерные вопросы, понимание природы которых играет ключевую роль с точки зрения оценки направлений исследований и суждений относительно вероятных результатов. Атомарно точная сборка приведет к изменениям центров приложения усилий по целому ряду направлений:

- Растущее разнообразие применяемых на практике молекулярных строительных блоков расширит количество направлений проектирования с тем, чтобы использовать более мелкомодульные и тесно связанные структуры.
- Ключевые разработки в конструировании и моделировании в рамках молекулярной инженерии приводят к смещению фокуса внимания от биомолеку-

лярных материалов к новым более управляемым структурам.

- Управляемое молекулярное движение позволит постепенно избавиться от проблемы нежелательных химических реакций, расширяя круг возможных операций в сфере синтеза.
- Эффективный прогресс во все большей степени будет требовать применения инженерного подхода, а также новых институциональных структур и источников финансирования.

Мы не способны достоверно предсказать
сроки создания технологий, пути движения
к ним и способы применения

Вопрос об оценке сроков создания технологий вызывает широкие и обоснованные разногласия. Никто не способен достоверно предсказать сроки достижения целей, если в них участвуют люди, тем более что коллективное усилие (о чем свидетельствует и история самих нанотехнологий) способно развернуться в самых неожиданных направлениях.

Не имеют смысла и детальные предсказания потенциальных путей технологического развития. На дорогах, ведущих в будущее, то и дело возникают разнообразные препятствия. Столь же неожиданно могут открываться новые, более короткие, маршруты (например, никто из специалистов и не мечтал о недавнем огромном скачке вперед в сфере структурных ДНК-нанотехнологий). Кроме того, из истории нам очень хорошо известно, насколько легко можно упустить из виду возможные применения технологий. Вспомним как компьютерные мощности, для обеспечения которых когда-то требовались огромные машинные залы, нашли свой собственный путь развития, уместаясь сегодня в корпусах таких портативных устройств, как мобильные телефоны.

В этих областях было бы нелепо притязать на точные знания. Сроки, пути и истинный потенциал всегда будут оставаться неизвестными величинами.

Там, где «местность» становится труднопроходимой

Перечисленные выше пункты имеют большое значение с точки зрения характера обсуждения рассматриваемых нами проблем. Сами по себе, они довольно просты, но способны на нечто большее, чем помощь в определении сущности АТП и описание природы путей его развития. Но там, где физика и инженерия встречаются с глобальными проблемами, местность становится труднопроходимой. Технологии АТП-уровня обещают широчайший круг технических возможностей, часть из которых, вероятно, останется неиспользованной. Для того чтобы обсуждение оставалось продуктивным, мы должны воспринимать эти возможности как тесно связанные друг с другом, поскольку они происходят из одного и того же источника.

В том случае, когда в центре внимания участников обсуждения находятся глобальные проблемы, краткое описание круга проблем может быть представлено следующим образом:

АТП приведет к резкому расширению спектра возможных продуктов, повышению их эксплуатационных характеристик и огромному снижению издержек производства. К тому же высокая производительность и атомарно точный контроль над продуктами и процессами позволят добиться весьма значительного сокращения отходов производства и потребления ресурсов. Отчасти это будет обусловлено снижением стоимости производства электроэнергии и различных видов топлива посредством преобразования солнечной энергии ниже затрат на добычу нефти и угля. Все

эти факторы послужат основой устойчивого материального изобилия в глобальном масштабе.

Однако даже при кратком перечислении важнейших последствий создания технологий АТП-уровня возникают вопросы, ответы на которые выходят далеко за рамки наших ожиданий или возможностей полного осмысления. Потенциальные перспективы включают в себя падение спроса на традиционные труд и ресурсы, а также капитал, используемый в материальном производстве. В результате резко повысится вероятность каскадных разрушительных воздействий на глобальную экономику. Всего лишь одна грань АТП — перспектива легкого замещения ископаемых видов топлива — сама по себе является огромной силой, достаточной для того, чтобы изменить структуру торговли, геополитики, безопасности и привести к исчезновению конфликтов из-за ресурсов.

Будущие результаты, безусловно, зависят от технологий. Но, возможно, еще в большей степени они будут определяться ожиданиями, восприятием и политикой. Постепенный переход к АТП начнется с уровня идеи, которую было бы полезно рассмотреть, приведет к возникновению потребности в зависимом от развития событий планировании, и далее — к зарождению реальности, которая требует действий на самых высоких уровнях человеческого внимания.

В предыдущих главах читатель узнал о том, как возможные разработки связаны с личной безопасностью, идет ли речь об исследованиях, карьере или ответственности руководителей. Нет никакой необходимости в перечислении всех направлений, по которым перспективы АТП-революции могут быть связаны с исследованиями, образованием, деловыми решениями, предложениями грантов и консультациями студентов, равно как и с решениями о выборе того, что следует читать, что и как комментировать и что говорить. В то же время в каждой из этих областей личные тревоги и сферы действий связаны с общим ходом истории.

Большие и малые реальные дела

Многие уверены в том, что действительно великие цели могут быть достигнуты только благодаря отважным, пусть и непрактичным, поступкам, то есть действиям, совершение которых планируется не на этот вечер или на следующую неделю, а естественным образом откладывается или переносится из повседневной жизни в неопределенное будущее. На самом деле великие цели усиливают важность меньших по значению, но в большей степени практических шагов. Во многих случаях эхо малых дел слышится даже на краю света.

Сегодня мы испытываем наибольшую потребность в шагах, которые подталкивали бы участников дискуссий к разговорам об ожидающем нас будущем, без отрыва от реальности. Во многом схожие потребности в подталкивании возникнут и завтра, независимо от того, будет ли идти речь о дальнейшем развитии тем или об исполнении решений на постоянно возрастающем уровне интеллектуального или институционального вовлечения.

Практические действия отличаются широчайшим разнообразием. Например, одобрение вами замечания одного из участников дискуссии может иметь сильный эффект, так как первый ответ в процессе группового обсуждения нередко задает направление последующего. Язык тела также имеет большое значение. Задумчивый взгляд или одобрительный кивок, когда кто-то из участников группы поднимает новую тему, или скептическая улыбка в ответ на возражения — ваши «высказывания» на языке тела едва ли кто-то запомнит (к тому же профессиональный риск совсем невелик), в то время как вы получите возможность изменить направление разговора. Каждое новое направление начинается с малых дел, позволяющих открыть дверь достаточно широко, чтобы увидеть, что за ней скрывается.

Конечно, гораздо больший эффект может иметь внесение предложения или выступление в поддержку идеи.

В одном контексте ключевой шаг мог бы состоять в высказывании идеи о том, что некто (где-то, когда-то) действительно должен изучить вопрос. В других обстоятельствах он мог бы заключаться в предложении *осознанно* отказаться от упоминания темы в докладе, так как в данный момент она выходит за рамки повестки дня. Наконец, соответствующие шаги могли бы состоять в поддержке предложения об изменении критерия оценки исследовательских предложений, или изменении направления проекта, или выступлении с инициативой относительно государственной политики.

Высший уровень личных обязательств и риска определяют направление жизни, идет ли речь о выборе областей исследований, сфер деятельности (научные исследования, бизнес, адвокатура и так далее), или принятии руководящей роли, когда лидер мобилизует личный вклад нескольких других, тысяч или миллионов людей. Что будет считаться практическим, эффективным действием зависит от времени, места и личной роли. И как всегда, перспективы огромных изменений не умаляют, а увеличивают ценность индивидуальных действий.

Оглядываясь назад и заглядывая вперед

Неизменные законы физики определяют очертания ландшафта, более постоянного, чем земные моря и горы, безграничного во времени ландшафта, задающего потенциал физических технологий, определяющего, в свою очередь, потенциал человеческого будущего. Человечество начало свой путь по этой «местности» много веков назад, что привело к трансформации жизни людей.

Достижения в биомолекулярном производстве (которое мы называем земледелием) привели к появлению оседлых поселений и цивилизации; достижения в производстве, основывавшемся на использовании машин, стали основой развития промышленной цивилизации; достижения в создании наноразмерных цифровых це-

пей инициировали происходящую в наши дни информационную революцию.

Заглядывая в будущее, мы видим в нем молекулярную, механическую, наноразмерную технологию, способную изменить материальный мир так же глубоко, как цифровые технологии преобразовали информационный мир, в масштабах сравнимых с сельскохозяйственной и промышленной революциями. На фоне этих исторических перемен мы можем рассмотреть, по крайней мере, некоторые из последствий грядущей революции: возможные решения мировых проблем, таких как глобальное развитие, изменения климата и ограниченность ресурсов — возможный колоссальный успех, сопровождающийся прорывными изменениями, подвижными вперед очевидными гуманитарными выгодами и (возможно с меньшей силой) очевидными конкурентными преимуществами.

К числу этих конкурентных преимуществ относятся принципиально новые военные потенциалы, угрожающие началом нестабильной и непредсказуемой гонки вооружений в тот самый момент, когда объективные национальные интересы государств мира приходят во все более близкое соответствие. Возникнет уникальная в истории человечества ситуация, которая потребует переоценки национальных интересов и творческого исследования новых стратегий совместного многостороннего управления революцией в экономических, социальных и международных делах. Следование инерционному сценарию сопровождалось бы ненужными, не поддающимися оценке рисками.

Эти возможности и проблемы порождаются различными применениями атомарно точного производства и его продуктами. По крайней мере, так выглядят перспективы, открывающиеся перед нами где-то вдалеке на вневременном ландшафте технологического потенциала. Ландшафт сам по себе гарантирует существование относящихся к делу фактов (некоторые из них могут быть установлены, другие нет), в то время как ис-

следовательская инженерия предоставляет методологию получения ответов, по крайней мере, на некоторые из тщательно выбранных вопросов об этих фактах. Сама конструкция этих вопросов предопределила возможность ответов на них посредством инженерного анализа системного уровня и консервативных расчетов, основывающихся на научных знаниях из учебников.

Между тем в процессе обсуждения концептуальных оснований, культурных различий и институциональных структур инженерии и науки, а также в ходе изучения истории массовой культуры, научной специализации и государственной политики США, мы увидели, что важнейшие и устанавливаемые факты об атомарно точном производстве могли быть и были на протяжении десятилетия скрыты под завесой неправильного понимания и путаницы.

Краткое описание происходивших событий привлекает внимание к решающей роли прогресса в атомарно точном производстве — непрерывного поступательного развития, движимого, прежде всего, исследованиями в молекулярных науках. Оно объясняет, как это важнейшее направление оказалось исключено из нового определения нанотехнологий, в результате чего мы оказались в ситуации, когда огромные, но не получившие должного признания возможности, готовы поддерживать удивительно быстрый прогресс (по направлениям, рассматриваемым в приложении II). Упущенное ранее из виду становится предметом основного внимания.

Начальный обзор производственных технологий задал рамку и заложил основу для картины АТП и его физического базиса. Мы определили место этой технологии среди других используемых в наши дни способов изготовления вещей (изучив и их общие черты, и принципиальные различия), а также представили интуитивный, но количественно корректный взгляд на мир наномашин АТП-уровня — как они могли бы выглядеть и восприниматься тактильно в случае их увеличения во времени и пространстве в 10 миллионов раз.

Перед тем как отправиться на изучение наномира, я глубоко погрузился в историю идей (сформировавшую эту книгу более, чем что-либо еще), описывая пробуждение во мне чувства собственного предназначения, указавшего направление исследований технологического потенциала, чувство предназначения, благодаря которому я сегодня пишу эти слова. Когда я учился в старших классах школы, то узнал об угрозах стабильности нашей промышленной цивилизации. Я принял их близко к сердцу и попытался найти ответ о возможности светлого будущего человечества, отличавшегося бы от ожидавшихся всеми мрачных картин. Промышленность сама по себе, независимо от того, насколько устойчивой она является, существует для обработки веществ, используемых для изготовления полезных людям вещей, а сами вещества состоят из соединений, образованных атомами.

* * *

Что если бы мы умели действительно хорошо производить материальные вещи? В этом случае наши отношения с материальным миром изменились бы так сильно, что трудно представить, и все же в некоторых случаях предсказуемо. Мы видели, что на протяжении жизни одного поколения во многом аналогичным образом изменился мир информации. То, что в прошлом поставлялось в ограниченном количестве, сегодня предлагается в изобилии.

В наши дни мы наслаждаемся полным изобилием симфонической и популярной музыки, а также слов, изображений и многого другого. В прошлом для обладания ими необходимо было королевское богатство. Сегодня они доступны глазам и ушам обычных людей в миллиардах домашних хозяйств. Похоже, что наше будущее зависит от преобразований, движущей силой которых будут сравнимые технологии, основывающиеся на использовании наноразмерных устройств, где на место битов придут атомы. Грядущая революция способ-

на принести изобилие, не снившееся ни царям, ни королям, ни султанам, постиндустриальное материальное изобилие, доступное в самых отдаленных уголках Земли и способное облегчить бремя нашей планеты.

* * *

Действительно ли АТП-революция позволит достичь результатов, подобных тем, которые описывались выше? Пониманию, путанице, выбору, времени и шансу — все-му этому найдется место в будущем, и в том случае, если мы проявим мудрость, грядущее в определенной степени станет отражением наших намерений. Образ будущего — не каменный истукан, отчасти из-за непредсказуемости человеческого видения и выбора, который делают люди. Изменение восприятий влечет за собой перемены в возможностях и политике, в то время как новые СМИ трансформируют дискурс, формирующий сами восприятия. Неожиданные новые образы будущего вновь и вновь ведут общество в неожиданных направлениях к удивительным возможностям, проблемам, а иногда и к решениям. Мы несемся вперед в бурном историческом потоке. Удастся ли нам найти безопасный курс к миру, достойному надежд прошлых поколений? У нас нет гарантий ни успеха, ни неудачи. Но я уверен, что значение будет иметь выбор каждого из нас.

Первый такой выбор — решение о том, что мы скажем сегодня и кому. У вас есть план?

Приложения



Физические принципы молекулярного уровня в атомарно точном производстве

В ЭТОМ приложении рассматриваются идеи и принципы, знание которых играет важнейшую роль для понимания механически направляемой, атомарно точной сборки в техническом контексте. Его предназначение в том, чтобы помочь склонным к технике читателям совместить потенциально незнакомые идеи с имеющимися у них знаниями, относящимися к различным научным дисциплинам, а также с физическими принципами.

Читателям, знакомым с основами молекулярных наук, было бы полезно вспомнить или еще раз просмотреть базирующееся на молекулярной динамике описание наномеханических систем, содержащееся в главе 5. В ней представлены основы применения законов масштабирования классической механики в целом ряде наноразмерных механических устройств, а также проводятся сравнения и противопоставления поведения класса систем, базирующихся на жестких устройствах с системами, знакомыми нам по жидкофазной химии и биомолекулярным механизмам. Несмотря на идентичную физику, мы наблюдали глубокие различия между системами. Хотелось бы отметить следующее. Профессиональные знания в сфере молекулярных наук, безусловно, имеют существенное значение для понимания АТП, особенно в части химических взаимодействий и химической реакционной способности. Тем не ме-

нее, как показывает опыт, легкомысленное, интуитивное применение этих профессиональных знаний нередко приводит к глубоким заблуждениям. Как и во многих других случаях, данная тема предъявляет ряд предварительных условий и в ней имеется комплекс интеллектуальных ловушек, рассчитанных на плохо ориентирующихся в этой области людей. Впрочем, избежать этих капканов не слишком трудно.

В следующих разделах описываются основные требования к надежным механически направляемым процессам химического синтеза. В приложении II рассматриваются потенциальные физические условия технологий механически направляемой, атомарно точной фабрикации, а также градиент промежуточных технологий, заполняющих пробел между современными лабораторными техническими приемами и передовым АТП.

Стереотактический синтез как инструмент достижения атомарной точности

Возможность обычных жидкофазных химических реакций определяется локальными структурными свойствами молекул (от которых зависит их реакционная способность) и направлена на получение более или менее определенных результатов, обусловленных теми же самыми структурными свойствами, но варьирующимися в зависимости от различных реакционных способностей, зависящих от места протекания реакции. По мере усложнения целей синтеза становится все труднее направлять реакции для получения строго определенных результатов. Оставляя в стороне интрамолекулярные (и аналогичные супрамолекулярные) реакции, жидкофазная химия не позволяет осуществлять контроль над процессом, основывающийся на относительной позиции *per se*.

Стереотактические химические реакции могут рассматриваться как интрамолекулярные или супрамоле-

кулярные реакции в том смысле, что они связывают структуры прямых реакций, ограничивая столкновения потенциально способных к реакциям групп, посредством разделения некоторых пар и увеличения частоты столкновений других. Отличие стереотактических методов заключается в том, что геометрии связываемых структур являются объектами более общего, динамического дискреционного контроля, в то время как с точки зрения реакционной зоны самой по себе процессы остаются, в сущности, теми же самими. Различия являются нелокальными. Тем самым на место специфической структуры, обусловленной общей ковалентной или супрамолекулярной структурой, приходит мобильная, механически артикулированная основа.

Например, стереотактический синтез был продемонстрирован на плоских кристаллических поверхностях, посредством использования наконечников сканирующих туннельных микроскопов для соединения специфических реакционно-способных молекул, для перемещения специфических атомов водорода и создания реакционных зон на водородно-пассивируемых кремниевых (111) поверхностях. Если взглянуть на рассматриваемую проблему шире, то, вероятно, у нас есть основания датировать появление стереотактического синтеза временем возникновения первых рибосом.

Физические требования к стереотактическому синтезу

Как и стереотактическая хирургия, стереотактический синтез позволяет осуществлять воздействия на структурные изменения в зонах, выбранных с использованием средств позиционного контроля над активным компонентом в рамках общей системы координат. Условием надежного стереотактического синтеза (его разновидностей, которые в наибольшей степени соответствуют АТП и предшествующим технологиям) является наличие

структур и операций, удовлетворяющих нескольким достаточно строгим проектным ограничениям:

1. *Структурная стабильность.* Необходимы структуры, не поддающиеся разрушению под воздействиями тепловых флуктуаций (отсюда требование о существенно высоких барьерах мономолекулярной реакции).
2. *Контроль перемещений.* Перемещения должны осуществляться так, чтобы избегать непредусмотренных реакционно-способных столкновений (отсюда требования о (а) соответствующих кинематических характеристиках машин и (б) существенно высокой механической жесткости, то есть упругой восстанавливающей силе).
3. *Скорость реакции.* Реакции должны осуществляться достаточно надежно (отсюда требования о (а) существенно низких реакционных барьерах и (б) значительных по продолжительности реакционно-способных к столкновениям периодах времени выдержки).
4. *Необратимая прямая реакция.* Получение продуктов из реагентов должно быть необратимым (отсюда требование о существенно высокой отрицательной свободной энергии реакции).
5. *Единственный путь реакции.* Реакционно-способные столкновения должны приводить к получению единственного продукта (отсюда требование о существенно высоких барьерах для переходов между состояниями на реакционных путях, способных привести к получению ненужных продуктов).

Другими словами, для успешного надежного прохождения всех этапов реакции необходимо, чтобы реакционно-способные структуры (1) оставались неизменными, (2) следовали соответствующими путями перемещений, (3) вступали в реакции в отведенное время, (4) реакции носили необратимый характер и (5) обеспечивали получение единственного результата. Формально все эти ограничения, за исключением (2), эквивалентны огра-

ничениям (или целям) обычного химического синтеза. Однако выполнение ограничения (2) приводит к огромным изменениям значений других ограничений.

Если каждое из проектных ограничений выполняется с достаточно значительным запасом относительно уместных параметров, реакции могут осуществляться с более высокой степенью надежности, так как по мере увеличения запаса происходит экспоненциальное снижение частоты неудачных реакций. Ограничения (1), (2б), (3а) и (5) относятся к скорости протекания реакций, который определяются уравнениями Аррениуса (в соответствии с которыми частота неудачных реакций варьируется экспоненциально в зависимости от отношения высоты реакционного барьера к характеристической тепловой энергии kT); высота барьера в (2б) определяется энергией упругости, увеличивающейся пропорционально механической жесткости и (что принципиально для машин с низкой степенью жесткости) квадрату допуска смещения. Ограничение (4) относится к термодинамически контролируемым соотношениям количеств вещества, экспонентой в выражении свободной энергии и с учетом условия (4), время выдержки (3б) определяет кинетически контролируемый переход (в котором частота неудачных реакций уменьшается экспоненциально одновременно с временем и высотой барьера)¹.

Остающееся ограничение (2а) заключается в требовании, чтобы равновесные позиции вдоль номинального пути перемещения соответствовали желаемому состоянию перехода; избежать других нежелательных воздей-

1. Для того чтобы наполнить смыслом используемые величины, заметим, что наиболее благоприятным является дифференциал свободной энергии $G = 100$ кДж/моль (около четверти энергии типичной углерод-углеродной связи), а фактор Больцмана, определяемый как $\exp(-E/kT)$ равен $\sim 10^{-18}$ при комнатной температуре; заметьте также, что использование n условных повторных попыток может привести к сокращению требуемых дифференциалов свободной энергии на $1/n$.

ствий позволяет установление допусков (по тепловым флуктуациям, силам упругости и возможному смещению), соответствующих ограничению 2 (б).

Степень трудности выполнения этих довольно общих условий зависит от характеристик предполагаемых операций и зависящих от контекста требований надежности системного уровня. В некоторых контекстах (см. обсуждение в приложении II) эти ограничения являются строгими в количественном выражении, в других — ослабленными.

Широкий спектр потенциальных систем и методов

Важно помнить, что стереотактический контроль над химическими реакциями является общей идеей, распространяющейся на различные классы продуктов, реакций, реакционно-способных внешних сред и типы механизмов. Решение наиболее трудных задач по получению продукции с высокими эксплуатационными характеристиками предполагает использование продуктов, состоящих из тесно связанных ковалентных твердых тел, полученных благодаря использованию обладающих высокой энергией реакционно-способных частиц, когда соответствующие операции осуществляются в инертных внешних средах (например, в вакууме) и направляются комплексом машин, состоящих из тесно связанных ковалентных твердых компонент. Для систем подобных классов желаемое и вполне достижимое значение среднеквадратичного теплового смещения составляет менее 0,02 нанометра. Наиболее достижимыми являются самые близкие к нам цели, такие как, например, создание структур, состоящих из полимерных блоков; при этом сами структуры сшиваются посредством обычных химических реакций, когда все стереотактические операции осуществляются в водных средах и направляются относительно простыми устройствами, состоящими

в основном из самособранных фолдамеров. Системы этого класса включают в себя стереотактические устройства, допускающие среднеквадратичные тепловые смещения, превышающие 2 нанометра (что означает ослабление жесткости ограничений в 10000 раз, по сравнению с рассмотренным выше более трудным случаем).

Чистая самосборка олицетворяет собой конечную точку спектра стереотактических методов в пределе, когда механические ограничения стремятся к нулю. Она требует кодирования структуры каждого продукта в строение всех его частей, полностью перекладывая бремя специфичности на проектирование компонентов строительных блоков; первый шаг в направлении спектра стереотактических методов приподнимает это бремя посредством применения менее жестких механических ограничений прямой самосборки (или самосовмещения) компонентов в отношении отдельных участков структуры. Осуществление этого шага означает, что сложные продукты более не требуют сложных компонентов.

Крупные, самосовмещающиеся строительные блоки, мягкие допуски на смещение, менее жесткие материалы, простые машины и ограничения на простые перемещения — все это составляющие последовательной доступной технологической базы, создание которой может открыть возможность осуществления дальнейших шагов в соответствии с технологическим градиентом, основывающемся на последовательной, но пока недоступной технологической базе передового производства АТП-уровня. Ее образуют мельчайшие строительные блоки, узкие допуски на смещение, чрезвычайно жесткие материалы, комплексные машины и комплексные ограничения на перемещения. Этот градиент и направления дальнейшего поступательного развития рассматриваются в приложении II.

Инкрементальный путь к АТП

ПРОЙТИ путь от современных технологий к АТП возможно посредством постепенного внедрения новшеств. Основными вехами на этом пути будут создание атомарно точных механических систем и внедрение систем следующего поколения, используемых для осуществления АТ-производства. Ключевые достижения будут непосредственно связаны со стереотактической сборкой. Последняя представляет собой проверенный временем метод создания различных вещей посредством перемещения деталей на отведенные им позиции, но применяемый для сборки наноразмерных деталей с атомарной точностью. В приложении I мы рассмотрели общие физические ограничения, которые необходимо учитывать на каждом из этапов. В данном разделе мы переходим к описанию согласованных наборов промежуточных технологий, способных, по мере продвижения вперед, соответствовать упомянутым выше ограничениям.

Применявшиеся в прошлом и современные метрики прогресса

На протяжении веков машинные технологии развивались по пути наращивания производительности, для измерения которой использовались несколько видов метрик. Они включают в себя:

- Повышение качества материалов.

- Повышение степени контроля над формой компонентов.
- Повышение степени сложности физически осуществимых систем.

Промышленная революция привела к значительному повышению требований относительно точности, сложности и уровня производительности машинного оборудования, что нашло отражение в следующих метриках:

- Что касается материалов, то показатели качества включали в себя единообразие, прочность и жесткость; соответствовать им могло машинное оборудование, изготавливавшееся из стали.
- Что касается контроля над формой, то требования относительно более высокой точности обусловили прецизионную машинную обработку стальных компонентов, использовавшихся для сборки высокоточного машинного оборудования.
- Что касается сложности, то создание машин, имевших множество точно изготовленных движущихся частей, открыло возможность автоматизации высокопроизводительного оборудования.

Благодаря сталецентричной технологии, развивались и распространялись другие производственные решения, используя которые промышленность выпускала все лучшие автомобильные шины, кремниевые микросхемы и тому подобную продукцию — технологии производства которых так же определялись прогрессом в материалах и средствах их обработки.

Потенциальные достижения в атомарно точных производственных технологиях будут идти по этому же пути. Неудивительно, что примерно такими же будут и ключевые метрики, необходимые для улучшения наноразмерных производственных механизмов:

- Что касается материалов, то их жесткость и единообразие будут играть важнейшие роли с точки зре-

ния создания высокопроизводительного машинного оборудования.

- Что касается контроля над формой, то здесь центр внимания смещается с точности на свободу выбора желательных форм.
- Что касается сложности, то существенно важное значение для автоматизации высокопроизводительного оборудования вновь будут иметь точные сложные машины.

Все эти метрики взаимосвязаны и развитие АТ-технологий будет вести за собой все остальные совокупности методов, процессов и материалов, определяющих возможности изготовления продуктов.

Исследование способов повышения доли АТ-технологий

Технологии каждого определенного уровня опирается на технологическую базу — комплекс базовых высокоэффективных методов, процессов и материалов, применяемых в процессе производства. Технологическая база находит различные применения (например, машинная технология открывает возможность эффективного выпуска автомобилей). Что еще более важно, базовые технологии открывают возможность производства своих собственных технологических компонентов — машин, применяемых для изготовления автомобилей, машин, применяемых для выпуска машин для производства автомобилей и так далее. Движущей силой фундаментального прогресса является использование базовых технологий для внедрения компонентов усовершенствованной технологической базы, что означает шаг вперед и вверх, в направлении, в котором возможны дальнейшие поступательные шаги.

В случае если малые шаги являются достаточно важными, но при этом возможны более крупные шаги впе-

ред, перед нами открывается перспективный путь; длина реальных шагов будет зависеть от степени соответствия друг другу образа будущего, практических аспектов, изобретений и инвестиций. Что касается физической осуществимости, то в случае непрерывного развития в определенном направлении, малые шаги, безусловно, будут иметь существенно важное значение. При этом сохранит силу обычный критерий надежной исследовательской инженерии со стандартными оговорками относительно консервативных оценок (в частности, на практике будут более вероятны крупные шаги).

Для того чтобы лучше понять вектор развития технологий из наших дней в направлении АТП, полезно было бы рассмотреть несколько измерений технических возможностей и из взаимосвязи.

Развитие качества материалов и компонентов

Наиболее сложные АТ-структуры, которые исследователи уже научились проектировать, состоят из уложенных макромолекул (см. главу 12). В число последних входят изготавливаемые промышленным способом полимеры, такие как полипептиды (белковые молекулы, из которых состоят рога, шелк и множество биомолекулярных машин) и некоторые из их небιологических «родственников» (пептоиды и другие фолдамеры). Эти молекулы используются как компоненты со сложными формами, в свою очередь, способные направлять самосборку и схожих с ними, и значительно отличных от них молекул. Нуклеиновые кислоты и их аналоги используются как материалы для создания другого класса уложенных макромолекулярных структур. Одним из примеров является структурная ДНК-нанотехнология, позволяющая строить доставляемые в строго определенное место АТ-каркасы, состоящие из миллионов атомов.

Полученные полимеры — укладываемые с целью создания АТ-объектов, применяемых в качестве строительных блоков, — могут использоваться для строительства

посредством методов, принадлежащих к одной части спектра, рассматривавшегося в приложении I. Имеется в виду чистая ненаправляемая самосборка, когда каждый из совокупности строительных блоков способен сталкиваться со всеми другими, образуя специфическую структуру тогда и только тогда, когда все блоки являются достаточно крупными и сложными для того, чтобы объединиться единственным способом, подобно составной картинке-загадке.

Применение доступных сегодня самособирающихся структур ограничивает контроль над формой и связанными с ней свойствами поверхности, такими как заряд и полярность. Они собираются из относительно крупных строительных блоков (размерами, например, в десятки кубических нанометров и более), в то время как полимерные материалы строятся из единичных объектов — мономеров — значительно превышающих по своим размерам атомы. К тому же требования дальнейшей укладки затрудняют выбор форм, наилучшим образом соответствующих исполнению тех или иных отдельных функций. И наконец, самосборные структуры рассматриваемого типа не обладают должной жесткостью; они во многом напоминают типичные промышленные полимеры (то есть характеризуются слабыми связями).

В верхней части вектора находятся материалы, включающие в себя оксиды (с локальными группами атомов и связей, как в стекле или керамике) и ковалентные твердые частицы (с локальными группами атомов и связей, похожими на те, что характерны для кремния, алмаза или графена). Высокая жесткость этих материалов обусловлена плотностью сетей, образуемых связями; они относятся к мелкозернистым, так как состоят из мономеров (их часто называют «частицами роста»), содержащих в себе один или несколько атомов или ионов. Мелкозернистость, в свою очередь, означает расширение возможностей дизайна (конечно, в тех случаях, если имеется возможность направлять сборку точных, комплексных, наноразмерных структур, ведь эти

строительные блоки отличаются небольшими размерами, идентичностью и не требуют особого выбора способов связей между ними).

Ключевое наблюдение относительно вектора развития заключается в том, что строительные блоки не должны принадлежать ни к одной из крайностей метрик (слабо связанные, грубые, сложные макромолекулярные объекты), ни к другой (тесно связанные, мелкозернистые, простые, близкие к атомарным размерам мономеров). В пределах названного диапазона они могут достигать любого размера и обладать промежуточными характеристиками в рамках данных метрик.

В частности, в средней части спектра находятся строительные блоки размерами в десятки атомов: среднезернистые (достаточно крупные для избирательного ориентирования и установления связи, но не настолько сложные, чтобы занимать уникальное место в структуре); средней жесткости (в сравнении с типичными фолдамерами, более тесно связанные внутри и с соседями); и открывающие широкую конструкторскую свободу (в силу относительной мелкозернистости и отсутствия строгого ограничения на проектирование для самосборки).

К строительным блокам, принадлежащим к середине спектра относятся полициклические, ковалентные молекулы нанометровых размеров с тремя или более функциональными группами, способные образовывать перекрестные связи с соседями. Перекрестное сшивание включает в себя не только типичные ковалентные связи, но и координацию для общих металлических ионов. В данном случае одним из интересных примеров являются металл-органические каркасные структуры, другим — белки, связывающиеся с металлами.

Наша дискуссия позволяет предположить, что улучшение показателей жесткости, зернистости и свободы проектирования тесно связаны с повышением качества материалов и более строгим контролем над формой. В своей совокупности эти свойства позволяют добиться

улучшения метрик, включающих в себя такие показатели, как эксплуатационные характеристики и простота проектирования, что, в свою очередь, воздействует на физически достижимый уровень системной сложности. Представляется, что в середине каждой системной метрики находятся блоки средних размеров.

*Вектор развития уровней
стереотактического контроля*

Обычная самосборка не требует стереотактического контроля, так как блоки соответствуют друг другу единственным образом. Сборка из простейших мелкозернистых блоков предполагает строгий контроль, так как они могут связываться едва ли не самым случайным образом. Сборка средних по размерам блоков требует лишь слабого стереотактического контроля, когда объекты направляются в предназначенные им зоны, так как выбор специфических целей может осуществляться посредством локализованной самосборки (или самосоответствия). Таким образом, величина расстояния между альтернативными зонами связывания — допустимой погрешностью в положении — может варьироваться от диаметра самого продукта (в направлении предела чистой самосборки) до диаметра строительного блока (там, где маленький размер блока приводит к близкому расположению реакционных зон)¹. И вновь мы установили вектор развития, играющий важную роль с точки зрения определения требований к машинам.

В стереотактических системах позиционирования частота вызываемых теплотой ошибок в местоположении зависит и от приемлемой допустимой погрешности (с изменением квадрата расстояния между альтернатив-

1. И еще меньше: в тесно связанных ковалентных твердых частицах расстояние между альтернативными целями связывания может быть меньшим, чем диаметр атома (тем не менее, оно совместимо с надежным выбором целей).

ными целями происходит экспоненциальное снижение частоты), и от жесткости структуры, сопротивляющейся ошибкам. В данном случае действует закон масштабирования, в соответствии с которым увеличение приемлемой допустимой погрешности в 10 раз приводит к сокращению уровня требуемой жесткости в 100 раз.

Попытавшись заглянуть вперед с нижнего конца вектора, мы увидим, что в соответствии с инженерными проектировками самособираемые устройства, изготовленные из относительно мягких блоков полимерных материалов, могут быть достаточно жесткими, что открывает возможность надежной стереотактической сборки меньших по размерам блоков из более твердых материалов. Изготовленные из них устройства, в свою очередь, способны обеспечить более строгий контроль над перемещениями, необходимый для сборки из более жестких материалов.

И наоборот, если мы оглянемся назад, то увидим, что, согласно инженерным проектировкам, требованиям относительной надежности стереотактической сборки мелкозернистых, в высшей степени жестких ковалентных структур могут соответствовать существенно менее жесткие машины, изготавливаемые при значительно менее строгом стереотактическом контроле.

Таким образом, там, где беспокойство вызывают материалы и стереотактический контроль, развитие возможно в обеих точках вектора: из возвышающейся его части путь ведет назад и вниз к более доступным системам, а из нижней — вперед и вверх. Встречаясь ровно посередине, эти пути подводят нас к блокам промежуточных размеров, жесткости и плотности связей.

Вектор развития внешней среды и средств транспортировки

Виды потенциально возможной внешней среды, в которой осуществлялась бы стереотактическая сборка, варьируются от органических растворов до предельно

низковязкой химически инертной среды — пустого пространства, в котором полностью отсутствуют жидкости.

Жидкости обладают двумя взаимосвязанными, полезными с точки зрения достижения наших целей, свойствами. Находящиеся в них наноразмерные объекты приобретают локальную мобильность, необходимую для самосборки, и долгосрочную мобильность, открывающую возможность перемещения молекул посредством диффузии из источника к месту назначения, в отсутствие конвейеров или труб. В настоящее время наиболее привлекательной средой является вода, так как она представляет собой хорошо изученную среду-посредника для молекулярной укладки и самосборки.

Полный сквозной контроль над перемещениями обладает рядом преимуществ (как в случае передовых АТП-систем, рассматривавшихся в главе 10). Но они относятся либо к вторичным соображениям (таким как скорость или энергоэффективность), либо к тем случаям, когда мы раздвигаем границы физически осуществимых химических процессов (что может потребовать, например, бесконтактного перемещения необычайно реакционно-способных веществ).

Впрочем, стереотактический контроль над сборкой может осуществляться и без того, что воспринимается как его предварительные условия, то есть при полном отсутствии управления строительными блоками. В этом случае основная цель состоит в контроле над тем, где происходит соединение блоков, а не над тем, как они достигнут намеченного места. Жидкости открывают возможности, которые отсутствуют в макроразмерном производстве: достаточно отдать перемещение блоков на волю диффузии и использовать стереотактический контроль для активации и снятия защиты с места сборки. Согласно данному подходу, каталитическая структура может служить инструментом стереотактически направляемых модификаций в направлении определенной цели.

Данный подход должен быть хорошо знаком специалистам-химикам, ведь он положен в основу использова-

ния защитных групп, блокирующих потенциальные реакционно-способные зоны во время серий шагов, после чего эти защитные группы перемещаются для активации одной или нескольких таких зон. Рассматриваемый метод может использоваться в отношении широкого спектра блоков, размеры которых варьируются от крупнозернистых фракций до атомов; наименьшие по размерам блоки могут транспортироваться в форме газов, в то время как защитные группы, блокирующие доступ к зонам, могут быть простыми, как атомы водорода. Химические процессы, основанные на использовании реакционно-способных газов и применении водородной защиты, являются основными элементами разработанного в компании *Zyvox* метода строительства точных модифицированных кристаллов кремния (для подготовки активных зон посредством перемещения атомов водорода используется сканирующий туннельный микроскоп).

Даже в тех случаях, когда конечный отбор и позиционирование блоков осуществляются АТ-механизмами, посредством диффузии жидкости способны обеспечить транспортировку на относительно большие расстояния, в то время как конечные перемещения могут основываться на тепловом движении и самосоответствии (и вновь в жидкой среде). Использование данного метода транспортирования в жидкости позволяет применять машины более простой архитектуры, способные функционировать в условиях термального движения большой амплитуды.

И вновь работа с жесткими, мелкозернистыми, ковалентными материалами может потребовать соответствия более строгим условиям. Не так давно, исследователи пришли к выводу, что необходимые химические операции потребуют инертных внешних сред (например, вакуума) и механической транспортировки в высокой степени реакционно-способных молекулярных веществ.

Другие подходы предлагают более легкий доступ к относительно жестким, мелкозернистым материа-

лам. Например, железный колчедан (FeS_2) и многие другие силикаты превосходят по жесткости материалы, основывающиеся на фолдамерах, в 10 раз; к тому же они могут спонтанно собираться в водных растворах. Преимущества создания структур посредством сборки из материалов, образуемых в мягких водных условиях, включают в себя жидкофазную транспортировку строительных блоков и совместимость (например) с хорошо известными классами фолдамеров.

Развитие сложности

Рассматривавшиеся выше системы относительно низкого технического уровня способны создавать различные компоненты. Но для сборки компонентов и создания сложных систем необходимы средства стереотактического контроля. В то же время улучшенный стереотактический контроль открывает возможность усовершенствований, определяемых с помощью различных метрик, а также тех из них, которые позволяют проектировать и изготавливать дополняющие друг друга поверхности. Расширяя диапазон физически возможных структур, мелкозернистый стереотактический синтез способен предоставить новые преимущества в самосборке на уровне компонентов, тем самым расширяя применимость каждого из конкурирующих методов такой самосборки.

Градиент сложности связывает самосборку с передовой стереотактической сборкой. В результате устройства, которые первоначально были мелкими простыми машинами, начинают обеспечивать движение вверх по градиенту размера и сложности систем.

Усовершенствования в производстве компонентов позволят расширить диапазон и эксплуатационные характеристики функциональных устройств. Имеются в виду преобразователи (химические, оптические, электрические и так далее) с большим количеством отдельных входных каналов, способные контролировать высокочастотные перемещения, устройства для обработки

материалов, способные связывать и высвобождать избранные строительные блоки из растворов, и механизмы позиционирования жестких структурных компонентов, применение которых открывает возможности более точных и надежных перемещений и использования более мелкозернистых и строительных блоков большей валентности.

Увеличение диапазона производимых продуктов будет способствовать расширению спектра их практического применения. В этом и заключается история достижений в сфере атомарно точного производства, начавшейся более ста лет назад, происходящей в наши дни и устремленной в будущее.

Диапазон применения мелких атомарно точных структур необычайно широк. Потенциально самые первые продукты могли бы включать в себя индивидуальные высокопроизводительные катализаторы, специальные молекулярные производственные линии (по образцу модульной поликетидсинтазы) и программируемые механизмы синтеза олигомеров (по образцу рибосом). При создании этих мелких специализированных высокопроизводительных производственных машин в качестве образцов используются устройства, полезность которых хорошо известна в самых разных областях (от фундаментальных наук до тонкого химического и фармацевтического синтеза). Кроме того, мелкие структуры могут служить компонентами и строительными блоками для крупных систем, в которых наноразмерные компоненты организованы посредством самосборки, образуя, помимо других потенциальных примеров, активные структуры для экранов мониторов, освещения, фотоэлектрических элементов и компьютерных устройств памяти.

Поскольку химические и биохимические методы позволяют производить продукцию в значительных количествах, а первые поколения производственного оборудования могут быть похожи друг на друга, и каждый шаг вперед в направлении развития производствен-

ных технологий дает возможность улучшить результат (если измерять в массе). Сегодня объем продукции, производимой с использованием аналогичных процессов, варьируется по шкале от микрограммов до тонн. При этом даже один микрограмм вещества может содержать триллионы наноразмерных объектов.

Наиболее эффективные системы являются специализированными; то же самое справедливо и в отношении масштаба. Естественный подход основывается на использовании меньших по размерам специализированных производственных машин для изготовления отличных друг от друга строительных блоков в количестве, в котором большие по размеру машины (возможно, менее специализированные) изготавливают продукты еще более широкого диапазона, представляющие собой сочетания деталей.

На постепенно проявляющейся картине мы видим сеть производственных систем, не отличающуюся от сети специализированных фабрик, поставляющих детали, которые используются на других заводах для строительства автомобилей различных моделей, или сети химических заводов, поставляющих промежуточные химические продукты, применяемые на других заводах для синтеза разнообразных фармацевтических препаратов. Мономерные строительные блоки применяются для синтеза фолдамерных цепочек; наноразмерные строительные блоки используются для слабо направляемой стереотактической сборки; микроблоки необходимы для высокопроизводительной сборки конечного продукта посредством АТП-систем. Все перечисленное выше следует одному и тому же базовому подходу — специализированному производству компонентов для обеспечения более гибкого производства конечных продуктов. Следование этому подходу обусловлено теми же самыми базовыми причинами.

Заметим, что ни одна из этих систем не требует машин, способных выпускать все детали, необходимые для изготовления аналогичных машин. Соответствующ-

щие мощности может иметь атомарно точная технологическая база в целом (подобно современной глобальной промышленной технологической базе), но не ее более простые системы производства компонентов. В числе других преимуществ организация такого рода обеспечивает последовательную пошаговую модернизацию по мере поступательного развития агрегированной технологической базы в соответствии с градиентом технических возможностей.

Оглядываясь назад

В некоторых случаях для того, чтобы быстрее достичь цели, полезно оглянуться назад и попытаться ответить на вопросы: «Что должно было бы предшествовать тому?» и «Что должно было бы предшествовать этому?» В главе 10 мы познакомились с архитектурными набросками крупноразмерных высокопроизводительных АТП-систем. Однако и сами эти системы, и их компоненты пока находятся в грядущем. Системы каких типов могли бы стать их предшественницами, и что требуется для их создания?

В частности, можно было бы попытаться построить компоненты крупноразмерных АТП-систем с помощью систем в два раза меньших по размерам. Последние, в свою очередь, могли бы быть построены с помощью еще в два раза меньших по размерам систем и так далее вплоть до самого маленького размера. Где находится точка остановки этого обращенного назад концептуального процесса — материальный исходный пункт движения вперед, в направлении масштабируемой технологии АТП-уровня?

Наилучший подход к поискам ответа заключается в следующем. Мы должны задаться вопросом о том, что нам следовало бы исключить из рассмотрения, оставаясь, тем не менее, на АТП-уровне производственных возможностей — измеряемых не масштабом, выработ-

кой или эффективностью, но качеством, видом компонентов и систем, которые мы способны были бы производить. Этот вопрос мог бы звучать так: «Что требуется минимальной ключевой системе, способной изготавливать и собирать различные компоненты, требуемые для создания наименьшей по размерам и простейшей производственной системы АТП-качества?»

Один из очевидных способов уменьшения размеров ключевой системы и снижения уровня ее сложности состоит в передаче на сторону или отказе от осуществления ряда операций с целью сведения к минимуму количества осуществляемых ею функций. Например, функция производства высококачественных строительных блоков молекулярного размера может быть передана в другие звенья производственной сети, тем самым избавляя ключевую систему от необходимости осуществления химической очистки и большинства других стадий химической обработки. Аналогично в случае использования в качестве посредника жидкой среды, способной доставлять строительные блоки молекулярного размера в зоны их использования, мы могли бы отказаться от сложных транспортных систем. Схожим образом обращение к медленным и неспециализированным машинам, способным собирать блоки в структуры, применяемые для изготовления различных компонентов, избавляет от необходимости применения специализированных, эффективных, высокопроизводительных систем (подобных тем, которые рассматривались в главе 10). И наконец, управление неспециализированными машинами, задача которых состоит в строительстве различных компонентов, требует передачи им особых серий сигналов — последовательности инструкций, которые служат программой. Если для их передачи используется внешний источник, то ключевая система может быть избавлена от функций хранения данных и цифровых систем контроля.

Данный комплекс упрощений подводит нас к архитектуре производства АТП-уровня, имеющей значитель-

ные отличия от передовых АТП-систем. Внешняя подготовка входных ресурсов, транспортировка с использованием жидкостей и использование машин, направляемых внешними программами, означают, что любое устройство системы в целом может быть довольно простым. Малые и промежуточные строительные блоки, а также комплексные продукты изготавливались бы на различных стадиях и в разных местах сети производственных систем.

Эти упрощения вынуждают нас пожертвовать размерами, производительностью, стоимостью и эффективностью. В то же время уровни операций синтеза и сборки не слишком отличаются от возможностей полной системы АТП. Аналогичные молекулярные преобразования и сборочные операции позволяют строить структуры аналогичного качества. Таким образом, системы, спроектированные в соответствии с рассматривавшимися выше направлениями, могли бы использоваться для создания компонентов и систем таких видов, которые определяют и позволяют масштабировать технологии АТП-уровня. Создание систем такого уровня могло бы рассматриваться как порог, преодоление которого означало бы возможность описывавшегося выше непрерывного процесса увеличения масштабов².

Выход на данный уровень технологии требует, чтобы размеры ни одной из отдельных машин, объединенных в систему, не превышали кубического микрона; в то же время на агрегированном уровне могли бы создаваться сети производственных систем в промышленном масштабе. Используя наноразмерные устройства в макроскопических количествах, они могли бы поставлять тонны наноразмерных продуктов, которые пользовались бы спросом в производстве материалов, электронике и медицине. Да где угодно.

2. Очевидно, что к данному порогу ведут и другие пути; наше обсуждение представляет собой упражнение в исследовательской инженерии системного уровня, а не в предсказаниях, оптимизации или программном менеджменте.

Встреча посередине маршрута

Для внедрения систем рассматривавшегося выше уровня нам необходимо было бы атомарно точное производство. К сожалению, современные технологии еще не достигли соответствующего уровня. Впрочем, для решения этой задачи не требуются ни экзотические материалы, ни ультранизкая внешняя среда. Необходимые компоненты (движущиеся детали, силовые приводы, зоны связывания и т. д.) не требуют экстраординарных эксплуатационных характеристик и могут быть изготовлены из материалов, совместимых с жидкофазным синтезом различных видов (хотя некоторые из них действительно являются экстраординарными). Например, для производства атомарно точных графеновых наноструктур использовался жидкофазный химический синтез, а целый ряд жестких мелкозернистых материалов может быть синтезирован в мягких водных средах. (Подобные материалы часто характеризуются смешанными ионно/ковалентными связями.) Построенные из этих относительно доступных материалов системы впоследствии могут применяться для изготовления компонентов, требующих более строгих условий с точки зрения химической стабильности и контроля над движением. Оглядываясь назад:

- Компоненты, изготовленные из самых жестких, ковалентных материалов могут производиться машинами, изготовленными из более доступных материалов.
- Компоненты, произведенные из этих более доступных материалов, могут выпускаться машинами, работающими в растворах.
- Машины, способные работать в растворах, способны строить машины, предназначенные для работы в сухой среде.
- Машины, изготовленные из жестких компонентов, могут собираться с использованием мягкого стереотактического контроля, дополненного самосоответствием.

Короче говоря, производственные системы, появление которых означало бы начало разработки технологий АТП-уровня, могут быть построены посредством производственных систем, основывающихся на технологиях, находящихся на несколько ступеней ниже порогового уровня.

Таким образом, мы можем рассматривать и пути, ведущие назад от передового АТП, и пути, ведущие вперед от самосборки. Они встречаются ровно посередине маршрута. На всем его протяжении мы не обнаруживаем ни некоей единственной в своем роде экстраординарной машины, ни некоей технологии, которая имела бы ключевое значение. Вместо них нас ожидают растущая технологическая база атомарно точного производства, расширяющийся диапазон компонентов со все более высокими эксплуатационными характеристиками и удлиняющаяся последовательность систем для сборки из АТ-деталей все более крупных и более сложных продуктов.

Кроме того, в рассматриваемых нами технологиях нет никакого обязательного ограничения масштабов производства на любой стадии развития. Напротив, мы находим технологическую базу, непрерывно расширяющуюся благодаря все новым достижениям в химическом и биохимическом синтезе — процессах, которые во многих случаях могут масштабироваться до выпуска АТ-продуктов, измеряемого в миллиграммах, граммах или тоннах. Поскольку на каждой стадии производства может открыться возможность крупномасштабного выпуска инструментов, используемых на следующем этапе производственной технологии, здесь же, скорее всего, вновь возникнут условия для организации массового выпуска.

В центре нашего обсуждения находились вопросы использования инструментов для создания еще более лучших орудий производства. Проблемам непосредственного применения АТ-продуктов мы уделяли значительно меньшее внимание. Как подсказывает обращение

к истории, масштабируемое производство АТ-продуктов новых классов обязательно найдет применение в сферах, которые мы пока не способны себе вообразить.

Поскольку мы идем по довольно гладким путям, ведущим к достижению важнейших целей, в условиях увеличивающегося вознаграждения в мире, в котором множество центров технологических компетенций заняты решением разнообразных задач, я убежден, что мы станем свидетелями непрерывного поступательного движения вдоль прочерченных нами выше генеральных направлений. Кроме того, у нас есть все основания ожидать повышения темпов прогресса.

Ускорение движения по спирали прогресса

Что задает темпы прогресса? Решающими факторами являются инвестиции и созидательное начало. Однако не менее важное значение имеет характер разрабатываемой технологии. На путях, ведущих к передовым АТП, изменятся не только технологии, но и природа, а также темпы процесса разработок.

Более быстрое производство и испытания

Отчасти темпы разработок зависят от времени, необходимого для изготовления и испытаний нового продукта. В соответствии со стандартами крупных инженерных проектов, затраты денег и времени, необходимых для изготовления новой макромолекулярной структуры, являются относительно небольшими. Это никак не миллионы и не миллиарды долларов, которые расходуются в течение нескольких лет, но тысячи долларов и несколько дней или месяцев. У нас есть все основания ожидать, что новые производственные технологии вкуче со стандартизированными строительными блоками позволят сократить время, которое занимает период от проектирования до создания работоспособно-

го артефакта. Для производственных систем, в которых операции осуществляются в диапазоне от сотен до миллионов циклов в секунду (в диапазоне от биомолекулярных до систем высоких уровней), один час — это весьма продолжительное время.

Те же самые соображения применимы и к испытаниям продуктов, так как скорость молекулярных процессов во многих случаях позволяет быстро осуществлять испытания эксплуатационных свойств продукта. (Для сравнения, вспомните, сколько месяцев может потребоваться для индивидуальных испытаний ракеты в рамках сложного макроразмерного инженерного проекта, а также попробуйте оценить затраты, необходимые для пересмотра ее конструкции и проведения новых испытаний.)

Более быстрое проектирование

С точки зрения темпов прогресса усовершенствования, вносимые в процесс проектирования, играют тройную роль. Сокращение времени конструирования означает уменьшение длительности периода между появлением концепции и ее воплощением. Более высокая предсказуемость проектирования сокращает количество необходимых для достижения успеха циклов конструирования и тестирования. И, наконец, уровень проекторочных возможностей помогает определить, насколько широким может быть каждый предпринимаемый в разработках шаг — возможность надежного конструирования модификаций уже выпускавшихся продуктов означает сокращение количества шагов, необходимых для достижения амбициозной цели.

Решающее значение имеет то обстоятельство, что новые достижения в производстве способствуют повышению предсказуемости результатов, что, в свою очередь, означает более важную роль проектирования. В наши дни, несмотря на достигнутый прогресс, проектирование и производство молекулярных объектов на основе фолдамеров остаются весьма трудным делом. Использо-

зование эффективных стереотактических методов будет способствовать качественным изменениям в конструировании, производстве и предсказуемости. Использование в конструировании мелкозернистых, более регулярных структур стандартизированных строительных блоков упрощает задачу проектировщиков; применение для сборки сложных деталей устройств прямого позиционного контроля в значительной степени разъединяет проектирование и производство; использование в строительстве более жестких устойчивых материалов способствует повышению предсказуемости результатов производства.

Все более действенную поддержку в отношении все более широко доступных материалов будут оказывать инженерии вычислительные инструменты. В частности, применение инженерами-механиками инструментов компьютерного дизайна, созданных по сегодняшним образцам, приведет к тому, что многие аспекты конструирования наноразмерных механических систем будут не более сложными, чем проектирование обычных механических систем в наши дни. Обращаясь к области мелкозернистых структур, построенных из ковалентных жестких материалов, я могу, опираясь на личный опыт, утверждать, что проектирование компонентов и устройств, пригодных для использования в механических системах АТП-уровня, является достаточно простой задачей (даже с использованием стандартного программного обеспечения для компьютерного моделирования). Не более сложным будет и обучение стандартным методам ее решения.

Открытое исследовательское проектирование

Я могу с уверенностью предсказать, что некоторые инструменты проектирования (а также, вероятно, многие отдельные конструкции) будут принадлежать к чис-

лу общедоступных. Часть из них, наверняка, будут использоваться для проектирования систем, которые пока невозможно воплотить в реальность. До начала финансового кризиса 2007 г. мне довелось поработать с компанией *Nanorex*, разрабатывавшей общедоступное приложение для АТ-инженерии *NanoEngineer-1*. Созданная в сотрудничестве с учеными-экспериментаторами альфа-версия этой прикладной программы использовалась в рамках структурной ДНК-инженерии и получила хорошие отзывы. Кроме того, инструменты *NanoEngineer-1* могли применяться для проектирования механических устройств из ковалентных материалов. При этом использовались принципы стандартной молекулярной механики и молекулярной динамики (по причинам, обсуждавшимся в главе 5, они являются в высшей степени эффективными для испытаний такого рода устройств). Не вызывает сомнений, что аналогичные проекты по разработке программного обеспечения будут осуществляться и в будущем, во благо экспериментальных исследований и устремленных в будущее инженерных изысканий.

Наличие общедоступного программного обеспечения для проектирования будет способствовать развитию краудсорсингового (силами привлеченных в Интернете добровольцев) конструирования, организованного как соревнования. Опыт участия в проектировании может оказаться весьма забавным (исходя из моего собственного опыта и наблюдений за действиями других людей), а полученные результаты — весьма привлекательными продуктами (имеются в виду и изображения, и видеозаписи). Кроме того, проекты могут оцениваться в соответствии с количественными инженерными критериями и метриками. Участники соревнования могут использовать эти метрики в качестве оценки проделанной работы³.

3. Группа Бейкера из Вашингтонского университета превратила работу по предсказанию укладки белков в компьютерную игру

Короче говоря, в недалеком будущем мы, вероятно, станем свидетелями появления и общедоступных инструментов проектирования, и общедоступных конструкторских разработок, результаты которых будут способствовать развитию наукоемких технологий. Эти инструменты проектирования и результаты их применения обеспечат ускорения прогресса после того, как новые инструменты производства позволят воплощать в жизнь уже созданные «в чертежах» конструкции.

Никто не способен предсказать степень, в которой общедоступные инструменты и конструкции ускорят передовые разработки; в данном случае мы имеем дело с еще одним фактором неустраимых неопределенностей относительно темпов прогресса.

Об оценке темпов прогресса

Допустим, мы хотели бы предложить консервативную оценку времени, необходимого для разработки технологий АТП-уровня. Единого мнения о том, на чем должна была бы основываться такая осторожная оценка, пока не сложилось. Вероятно, при рассмотрении потенциальных выгод, мы должны были бы уделить особое внимание возможным препятствиям, которые замедлили бы осуществление программ и достижение намеченных результатов. При анализе потенциальных рисков, основной акцент был бы сделан на потенциале быстрого прогресса в неизвестных местах, события в которых трудно отслеживать, или на неотложной международной программе, инициированной, отчасти для

Foldit. Она пользовалась огромным успехом не только с точки зрения количества участников (многие из них не имели необходимой научной подготовки), но и полученных результатов, а также количества публикаций в научных изданиях. Foldit позволила превратить укладку белков в забаву, головоломку особого рода, а предлагавшиеся участниками решения оценивались в рамках международного соревнования.

того, чтобы воспрепятствовать катастрофическим изменениям климата.

Рассматривая возможные последствия неопределенностей, мы обязаны помнить о двух сторонах консервативной идеи. На более рефлексивном уровне, было бы полезно попытаться внести коррективы в хорошо документированные тенденции к излишней самоуверенности в вынесении суждений, нежеланию принять неопределенность и инерции в пересмотре допущений. Было бы полезно пересмотреть некоторые из соображений, не пытаясь привязать обсуждение к определенным годам или датам.

*Отсрочки с принятием решений в планировании
и координации*

В течение многих лет по историческим причинам и в силу особенностей научной культуры (обсуждавшихся в главе 8 и главе 13) достижения в сфере атомарно точного молекулярного производства (см. главу 12) использовались в ограниченной степени. И в наши дни их потенциал с точки зрения инженерии АТ-систем раскрыт далеко не полностью. Причины этого отставания не могут исчезнуть в одно мгновение.

Разработка эффективных исследовательских программ требует времени, а также приложения интеллектуальных и организационных усилий. «Перевод» перспективных возможностей на «язык» конкретных планов требует вдохновения, оценок, дискуссий, а также достижения согласия, предшествующих подписанию закупочных ордеров на оборудование, найму научно-исследовательского персонала, структурированию новых соглашений о сотрудничестве или разработке программ.

Прогресс будет зависеть от состояния мнений в сообществах, которые, возможно, еще не полностью сформировались. Общие видение и энергия способны ускорить прохождение неизбежных этапов; неправильное пони-

мание целей и слабая мотивация могут на неопределенно долгое время задержать поступательное развитие.

В этой связи, размышления, основывающиеся на обращениях к средним или типичным случаям, могут оказаться ошибочными в силу асимметрии между силами, движущими прогрессом, и силами, обуславливающими его торможение. Темпы развития устанавливаются действиями, а не бездействием, не общим состоянием знаний или мнений, но формированием критической массы ресурсов — компетенций, координации и финансирования — независимо от того, где она будет достигнута. В осуществляемые по всему миру нанотехнологические программы притекают миллиарды долларов. Но если они по-прежнему будут направляться на исследования, никак не связанные с однажды декларировавшимся видением АТП,⁴ не будет ничего удивительного, если вскоре обнаружится, что лучшее понимание средств и целей позволит мобилизовать существенные ресурсы в поддержку исследовательских программ, структурированных для достижения результатов.

*Неожиданные трудности (и прорывы)
в лабораторных исследованиях*

Как известно любому практику или внимательному наблюдателю за лабораторными упражнениями, прогресс в сфере исследований может быть болезненно медленным по сравнению с наивными ожиданиями. Во многих случаях исследователи сталкиваются в своей работе с неожиданными трудностями, требующими использования нового подхода или изменения целей.

4. Напомним, что в главе 13 мы документально обосновали значительное расхождение между обещаниями (о создании передовых атомарно точных технологий), данными исследователями американскому конгрессу, и направлением принятой впоследствии национальной нанотехнологической программы.

Поэтому нам необходимо вновь учитывать асимметрию, выражающуюся в том, что индивидуальный лабораторный опыт потенциально может рассматриваться как образец для показателей темпов прогресса в мире в целом или для хорошо финансируемых и хорошо управляемых исследовательских программ. В том случае, когда множество групп придерживаются различных подходов к удовлетворению комплекса требований к инженерии системного уровня, они будут сталкиваться с разными по своему характеру трудностями. Маловероятно, что все они окажутся лицом к лицу с одной и той же труднопреодолимой проблемой. Другими словами, избыточность обуславливает повышение надежности. И наоборот, если множество групп придерживаются различных подходов, вероятность нахождения одной из них более лучшего или более раннего решения, чем этого можно было бы ожидать от единственной исследовательской группы, существенно повышается. Таким образом, в контексте инженерии системного уровня, ожидания, выверенные по исследованию лабораторного уровня, будут демонстрировать тенденцию к ошибочной переоценке вероятности возникновения препятствий и недооценку вероятности открытия различных более коротких путей к достижению цели⁵.

Важно помнить, что каждое функциональное требование к современным технологиям и технологиям АТП-

5. В частности, в этом и заключается основная причина того, что закон Мура продолжает действовать для полупроводниковой отрасли. К каждому новому поколению технологий производства предъявляется новый набор абстрактных требований (более точные установки последовательного шагового мультиплицирования и экспонирования, источники света, характеризующиеся все более короткой длиной волны, совместимая с ними оптика, маски, фоторезисты и все остальное). И на каждой стадии множество групп (сначала исследователи, а затем корпоративные лаборатории, в которых ведутся разработки) придерживаются различных подходов к удовлетворению каждого из них.

уровня имеет множество потенциальных воплощений, которые, если рассматривать их в контексте, не предъявляют строгих физических требований. Наиболее существенные трудности относятся к сфере проектирования, а наиболее сложные актуальные задачи состоят в преодолении сложностей, связанных с макромолекулярной укладкой и самосборкой. В дальнейшем, по мере продвижения по технологическому градиенту, высота этих препятствий снижается.

*Трудности с системами и сложностью,
возникающими при детализации*

Когда нужно детализировать разработки на более низком уровне, важно абстрагироваться от опыта молекулярных наук и сосредоточить внимание на опыте обычных форм инженерии, на практике разработки комплексных систем, основывающихся на систематической сборке хорошо понятных компонентов в соответствии с принципами модульного проектирования.

Продвижение вперед вдоль вектора технологического развития открывает возможность упрощения проектирования, которое будет становится все более предсказуемым, и использования обычных инженерных методологий. Во время движения трудности проектирования систем будут возрастать вместе с повышением их сложности, но ровно в той степени, в которой будут позволять высокоэффективные технологии. С лабораторной точки зрения наших дней, когда для получения небольших выгод нередко приходится затрачивать огромные усилия, все еще трудно представить себе сборку многочисленных деталей с предсказуемым результатом. Здравое суждение требует соотнесения будущих трудностей с соответствующими технологическими контекстами.

Стереотактический контроль над химическим синтезом принципиально изменит основные правила игры, так как он будет означать огромное расширение свободы

проектирования, осуществления самосборки, диапазона доступных материалов, повышение эксплуатационных характеристик устройств и увеличение количества их функций. Кроме того, откроются новые возможности совершенствования самого стереотактического контроля. Дорога от современных лабораторных возможностей ведет нас к простым устройствам, а затем, через несколько промежуточных стадий, и к передовому АТП. На этом прямом пути нет ни одного сколько-нибудь серьезного препятствия.

В заключение

Темпы движения в направлении приобретения возможностей АТП будут зависеть и от неизбежных задержек и проволочек с осуществлением программ исследований, и от ускорения, которое придадут ему большое количество научных групп, параллельно работающих над задачами, которые как нам известно, могут быть успешно решены. На каждом этапе будет устанавливаться своя собственная скорость развития, в зависимости не от средних, типичных или наихудших результатов, но исключительно по кратчайшим из найденных путей (если решения проблем будут общим достоянием).

Существование множества культур, государств и политиков означает наличие в мире большого количества потенциальных центров компетенций, способных к передовым разработками, независимо от действий остальных. Может показаться, что выйти на АТП-уровень технологий неимоверно трудно, хотя в другом смысле еще труднее будет избежать их появления.

Объединение усилий в разработках способно ускорить прогресс, поскольку тем самым мы продвинемся вперед в поиске решений проблем в здравоохранении, защите природной среды и глобальном развитии. Пожалуй, наиболее важной новой возможностью будет восстановление состава атмосферы Земли доиндустри-

альной эпохи и обращение вспять движущих сил изменения климата планеты.

Обсуждая потенциальные прорывы, мы пришли к выводу, что совместные разработки могут оказаться основным способом недопущения ненужных рисков конфликта. Тщательно структурированные совместные разработки способны помочь избежать нарастающих по спирали неопределенностей и создать базу для осуществления скоординированной политики, которая служила бы общим, сочетающимся друг с другом и более полно соответствующим друг другу интересам различных государств.

В зависимости от того, идет ли речь о рисках или о возможностях, в соответствии с консервативным подходом, темпы прогресса могут оцениваться как относительно высокие или относительно низкие; но ни одно из допущений не может приниматься как само собой разумеющееся. Несмотря на то, что законы физики образуют надежную основу перспектив АТП, а также позволяют рассмотреть ведущие к нему пути, многие другие аспекты грядущего зависят от присущих человеку свойств, таких как способность к созиданию, удача и выбор. Альтернативные направления исследований, вероятные темпы прогресса, а также наилучшие способы управления разработками и неизбежным в будущем переходом — нам необходимо будет взвесить и обсудить все эти и многие другие вопросы.

Примечания



Необходимая прелюдия

- С. 16. В 1986 г. я предложил миру понятие «нанотехнологии»: Изначально слово «нанотехнологии» использовалось для обозначения крупномасштабной, атомарно точной сборки, основывавшейся на принципе механически направляемого размещения молекул атомарных размеров. Впоследствии в него вкладывались и другие значения. И само слово «нанотехнологии», и принцип изготовления возникли не на пустом месте, а имели предшественников.

Что касается физического принципа, положенного в основу концепции нанотехнологий, то идея о физической возможности создания очень небольших по размерам машин, способных осуществлять те или иные операции и пригодных для использования в атомарно точной сборке, была высказана лауреатом Нобелевской премии по физике Ричардом Фейнманом. Впервые он упомянул об этой возможности в 1959 г. в одном из выступлений, но в течение последующих почти 20 лет идея мельчайших машин оставалась невостребованной.

Само слово «нанотехнологии» было очевидной, хотя и довольно противоречивой калькой со слова «микротехнологии»; впоследствии я узнал, что однажды очень похожий термин («нано-технологии») использовал Норио Танигучи. Его работа была опубликована в сборнике докладов одной из конференций, посвященных сверхточной механической обработке и тому подобному (то есть слово «нано-технологии» применялось в отношении технологий, принадлежавших к совсем другому спектру).

(Richard Feynman, «There's Plenty of Room at the Bottom», *Engineering and Science* 23, no. 5 [1960]; Norio Taniguchi, «On the Basic Concept of „Nano-Technology“», *Proceedings of the International Conference of Production Engineering*, Vol. 2. [Tokyo: Japan Society of Precision Engineering, 1974].)

- С. 17. *Наноразмерные детали и атомарная точность их изготовления открывают возможность атомарно точного производства*: См. главу 10 и приложение 1. Методический обзор на эту тему был опубликован

ликован в журнале Института физики (K. Eric Drexler, «Productive Nanosystems: The Physics of Molecular Fabrication», *Physics Education* 40 [2005]: 339).

- С. 18. *В отношении значительной части важнейших исследований наименование «нанотехнологии» просто не употребляется:* В главе 12 рассматривается текущее состояние и быстрый прогресс в развитии технологий атомарной точности, а в главе 13 вы можете познакомиться с историей расхождения атомарной точности и нанотехнологий (финансируемых из федерального бюджета США).

Глава 1. Атомы, биты и всеобщее благоденствие

- С. 28. *...устройство для получения страничных изображений документов, хранящихся на микрофильмах:* В то же время предложенная В. Бушем система «мемекс» должна была выполнять и другие функции; в сущности, она представляла собой систему гипертекста, предшествовавшую ее цифровому воплощению.
- С. 31. *В механически направляемых химических процессах:* Соответствующие физические принципы и требования обсуждаются в приложении I.

Глава 2. Путешествие к истокам идей

- С. 33. *...впервые была представлена в моей научной статье, опубликованной в 1981 г.:* Цитируется в основном тексте и доступна по адресу www.pnas.org/content/78/9/5275.full.pdf+html. Несмотря на то, что статья была опубликована в *Proceedings of the National Academy of Sciences* («Трудах Национальной академии наук») она написана с инженерных, а не с научных позиций (о различиях между наукой и инженерией см. главу 8).
- С. 34. *...в техническом анализе (по объему сравнимом с книгой), по результатам моей диссертационной работы в Массачусетском технологическом институте:* Он назывался «Molecular Machinery And Manufacturing With Applications To Computation» (1991) («Молекулярная машинерия и изготовление с применениями для вычислений») и был завершен в рамках межведомственной докторской программы в области молекулярной нанотехнологии. Я начал этот проект (как книгу), работая ведущим семинара в Стэнфордском университете (1988 г.). Еще через год я вновь вернулся к этому проекту. Расширенная и пересмотренная диссертация легла в основу книги *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* («Наносистемы: машинерия, изготовления и вычисления») (Hoboken, NJ: Wiley/Interscience, 1992). Диссертация доступна в Интернете по адресу: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/27999> и на моем сайте

по адресу: e-drexler.com/d/09/00/Drexler_MIT_dissertation.pdf.
 Подробное оглавление и избранные главы «Наносистем» доступны на моем сайте по адресу: e-drexler.com/d/06/00/Nano-systems/toc.html.

- С. 36. ...книги, посвященные наукам о космосе, а также проектированию и использованию космических систем: Прежде всего, труды таких провидцев, как Фримен Дайсон, Джерард О'Нейл, Дандридж Коул, Дж. Бернал и отца теоретической космонавтики Константина Циолковского.
- С. 41. ...полеты на астероиды вошли в планы НАСА: См., например: <http://www.nasa.gov/about/obamaspeechfeature.html>.
- С. 42. ...ведь Т. Мальтус был прав: В своем *Essay on the Principle of Population* («Опыте закона о народонаселении») преподобный Томас Мальтус обосновал тенденцию к экспоненциальному росту численности населения, который неизбежно натолкнется на ограничения, накладываемые производством продовольствия даже в условиях непрерывного его увеличения. Выдвигаемый Мальтусом общий довод относительно экспоненциального роста сохраняет силу в отношении любой мыслимой производственной технологии в границах физической Вселенной.
- С. 46. *Дерзновенность мышления была присуща Артуру с юности*: В наших разговорах о будущем Артур не слишком охотно упоминал о своих успехах в прошлом. Приводимый мною перечень основывается на документе, обнаруженном во время написания этой главы («Oral History Transcript — Dr. Arthur Kantrowitz», Center for History of Physics of the American Institute of Physics, <http://www.aip.org/history/ohilist/31816.html>).
- С. 50. ...знакомство со статьями, публиковавшимися в журналах *Science* и *Nature*: Наилучший способ постижения структуры и содержания современной науки заключается в последовательном, год за годом чтении этих журналов и подобных им изданий, до тех пор, пока все, с чем вы встречаетесь, не начнет укладываться в структуру знаний, полученных подобно тому, как мы естественным образом обучаемся языку, через контекст и использование. Необходимым дополнением в данном случае является формальное, целенаправленное изучение основ науки, начинающееся с математики и физики.

Глава 3. От молекул к наносистемам

- С. 54. ...Р. Фейнман предложил идею механически направляемых перемещений для сборки молекулярных структур с атомарной точностью: «Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты „атом за атомом“... Мне представляется особенно интересным то, что физики, в принципе, действительно могут

научиться синтезировать любое вещество, исходя из записанной химической формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики — просто „укладывать“ атомы в предлагаемом порядке». (Richard Feynman, «There's Plenty of Room at the Bottom», *Engineering and Science* 23, no. 5 [1960], <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>).

Слова о том, что «Химики будут заказывать синтез, а физики — просто „укладывать“ атомы в предлагаемом порядке», представляются не совсем верными, так как химики мыслят с точки зрения взаимодействий между молекулярными структурами, направленными на установления связей; достижение атомарной точности отнюдь не предполагает *строительства* «атом за атомом».

- С. 58. ...широко цитировались в научной литературе, так как в ней описывались основные идеи белковой инженерии и передовых нанотехнологий: Карл Пабо продублировал ключевую идею «инверсной укладки» (C. Pabo, «Molecular Technology: Designing Proteins and Peptides», *Nature* 301 [1983]: 200), а Джей Пондер и Фредерик Ричардс развили ее, предложив ключевую с точки зрения осуществления на практике идею (J. W. Ponder and F. M. Richards, «Tertiary Templates for Proteins: Use of Packing Criteria in the Enumeration of Allowed Sequences for Different Structural Classes», *Journal of Molecular Biology* 193 [1987]: 775–791). Частью истории является и обзор данной области исследований на более поздней стадии развития (O. Alvizo, B. D. Allen, and S. L. Mayo, «Computational Protein Design Promises to Revolutionize Protein Engineering», *BioTechniques* 42, no. 1 [2007]: 31–37).

Проведенные много десятилетий назад научные исследования позволили открыть фундаментальные принципы молекулярной физики: E. Schrodinger, «Quantisierung als Eigenwertproblem», *Annalen der Physik* 385, no. 13 (1926): 437–490.

- С. 63. ...подхлестнувшая исследования, позволившие углубить наше понимание перспектив: На первых этапах наиболее заметный вклад внес Ральф Меркле, с которым мне довелось сотрудничать в Научно-исследовательском центре корпорации Хетох в Пало-Альто, во время работы над книгой «Наносистемы». Впоследствии Р. Меркле помогал мне в руководстве научно-исследовательской программой по молекулярному синтезу, осуществлявшейся в Научно-исследовательском центре Эймса (финансировавшейся НАСА). Программа был прекращена после потрясений, произошедших на федеральном уровне, которые описываются в главе 13.
- С. 63. ...казалось, что энтузиазм сыграт преимущественно положительную роль: В 1986 г. я стал одним из основателей Института форсайта (впоследствии переименованного в Институт нанотех форсайта). Институт стал местом сосредоточения энтузиастов

нанотехнологий. Кроме того, в течение примерно десяти лет он оказывал финансовую поддержку ведущим научным конференциям в сфере нанотехнологий. В начале 2000 г. я оставил пост не участвовавшего в управлении председателя совета директоров института, а через несколько лет полностью разорвал отношения с этой организацией.

- C. 63. ...ученые в Калифорнийском технологическом институте и других университетах применяли вычислительные методы: Исследовательская деятельность, как об этом уже упоминалось, финансировалась НАСА.
- C. 65. ...различных сканирующих инструментов для получения изображений и перемещения отдельных атомов: См., например, Y. Sugimoto et al., «Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy», *Science* 322, no. 5900 (17 October 2008): 413–417.
- C. 65. ...манипуляции отдельными молекулами и установления связей между ними: Этот уровень контроля иллюстрирует принцип механически направляемой атомарно точной сборки (см., например, S. W. Hla and K. H. Rieder, «STM Control of Chemical Reactions: „Single-Molecule Synthesis“», *Annual Review of Physical Chemistry* 54 (2003): 307–330).
- C. 65. Инжиниринг белков процветает благодаря программному обеспечению систем автоматизированного проектирования: Поворотным пунктом стала статья Дж. Пондера и Ф. Ричардса (J. W. Ponder and F. M. Richards, «Tertiary templates for proteins. Use of packing criteria in the enumeration of allowed sequences for different structural classes», *Journal of Molecular Biology* 193, no. 4 (1987): 775–791; [dx.doi.org/10.1016/0022-2836\(87\)90358-5](https://doi.org/10.1016/0022-2836(87)90358-5)).
- C. 66. Рука об руку с развитием квантовых методов... мощных инструментов физического расчета: См., например, обзор Trygve Helgaker, Wim Klopper, and David P. Tew, «Quantitative Quantum Chemistry Preview», *Molecular Physics*, 106, issues 16–8 (2008): 2107–2143.
- C. 66. ...методы молекулярной механики, все более широко применяемые в химии: Они могут использоваться в различных сочетаниях с методами квантовой химии, включая интеграцию в непосредственно применяемые расчеты. Особенно сложный спектр применений (включающий расчеты небольших различий в свободной энергии, которые отчасти зависят от энтропии) описывается в статье «Free Energies of Chemical Reactions in Solution and in Enzymes with Ab Initio Quantum Mechanics/Molecular Mechanics Methods», *Annual Review of Physical Chemistry* 59 (May 2008): 573–601. First published online as a Review in Advance on December 11, 2007 ([dx.doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093618](https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093618)) by Hao Hu and Weitao Yang.

- С. 67. ...*производственная революция, основывающаяся на АТП*: Подробнее о технологическом базисе см. в главе 10, главе 11 и приложении 1.

Глава 4. Три прошедшие революции и грядущая четвертая

- С. 76. *Генетические и почвенные маркеры свидетельствуют о расселении земледельцев*: P. Skoglund, et al. «Origins and Genetic Legacy of Neolithic Farmers and Hunter-Gatherers in Europe», *Science* 336, no. 6080 (2012): 466–469.
- С. 85. ...*идеи, благодаря которым был изобретен первый в мире транзистор*: В современных цифровых логических системах используются полевые транзисторы (J. Bardeen and W. H. Brattain, «Three Electrode Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials», U. S. Patent 2,524,035 [1950]), принцип действия которых был описан, исходя из законов физики, за двадцать лет до изобретения этих устройств (J. E. Lilienfeld, «Method and Apparatus for Controlling Electric Currents», U. S. Patent 1,745,175 [1930]).
- С. 87. ...*законом Мура*: непрерывная миниатюризация обеспечивает в течение каждых двух лет удвоение количества размещаемых на микросхеме транзисторов. С течением времени смысл этого закона несколько изменился и расширился. Аналогичный экспоненциальный рост мы видим в самых разных областях (также растет скорость передачи данных посредством волоконно-оптических линий, плотность записи в магнитных носителях). В молекулярной области эффективность технологий секвенирования генов увеличивается еще более высокими темпами.

Глава 5. Как можно увидеть и почувствовать наноразмерный мир?

- С. 98. ...*твердые устойчивые молекулярные объекты*: В контексте наномеханических компонентов АТП-уровня нас интересуют, в первую очередь, стабильные ковалентные структуры, состоящие из сочлененных колец; в числе углеводов малоразмерные примеры включают адамантины, а также в какой-то степени более гибкие полициклические ароматические молекулы. В отсутствие конформационных степеней свободы эти структуры сохраняют строго определенные формы, поэтому при изгибе их потенциальная энергия в связи с деформацией растет; следовательно, в этих соединениях возникают механические силы упругости.

И наоборот, многие другие молекулы обладают большой гибкостью. Например, довольно часто полимеры моделируются в виде сочлененных вращающихся цепочек. С точки зре-

ния современной наномеханической инженерии наибольший интерес представляют полимерные цепочки, которые, укладываясь, образуют компактные структуры; они имеют определенные формы, в то время как жидкофазный синтез более жестких молекул является более сложной задачей.

- С. 99. *...жесткими молекулярными структурами*: Другими словами, квантовые флуктуации, связанные с атомарными позициями, являются существенно меньшими, по сравнению с тепловыми колебаниями при комнатной температуре. В свою очередь тепловые флуктуации меньше, чем длина связей и атомные диаметры. Доминирование тепловых флуктуаций над квантовыми является одной из причин того, что классическая механика успешно описывает молекулярную динамику.
- С. 99. *...не только визуального, но и кинестетического понимания*: Тактильный интерфейс математической модели позволяет в буквальном смысле получить кинестетическое ощущение.
- С. 108. *...в наноразмерной структуре бензинового двигателя*: Для того чтобы получить представление о точности механической обработки в наноразмерной перспективе, представьте себе шарикоподшипник при нашем стандартном увеличении. В этом случае шарик диаметром в 1 миллиметр увеличивается в размерах до 10 километров, а на его тщательно отшлифованной поверхности мы видим впадины глубиной не менее метра.
- С. 115. *...экспериментаторы наглядно продемонстрировали работу каждого из этих принципов*: Ведущие позиции в этой области занимает лаборатория Алекса Зеттла. Обзор вычислительных и экспериментальных работ в области наномеханических подшипников такого рода см. в работе: A. Kis and A. Zettle, «Nanomechanics of Carbon Nanotubes», *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366, no. 1870 (2008): 1591–1611 (<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/366/1870/1591.full>).
- С. 115. *Это тормозящая сила, подобная сопротивлению*: Тормозящие силы являются результатом рассеивания и излучения фотонов на границе полосы скольжения. Поскольку в большинстве случаев их воздействие пропорционально скорости, энергия, рассеиваемая скользящей поверхностью на данном расстоянии пропорциональна частоте движения и обратно пропорциональна его расстоянию. Для наноразмерных движений потери энергии могут быть достаточно низкими даже в тех случаях, когда частоты варьируются в диапазоне 100 мегагерц.
- С. 122. *...наиболее предпочтительным методом молекулярной сборки*: Самосборка отличается практичностью и эффективностью, а альтернативные методы представляют собой большую редкость.

Глава 6. Способы изготовления вещей

- С. 133. ...*дискретность внутренне присуща атомам в силу природы обычных ковалентных связей*: Это положение справедливо в отношении большинства, но не всех структур; некоторые из них (которых лучше избегать) имеют не столь четко выраженное строение связей и могут быть субъектами быстрых тепловых флуктуаций. Вообще говоря, ключевым критерием является не связанность *per se*, а величины энергетических барьеров между различными конфигурациями.
- С. 134. ...*тщательно выбранные и направляемые хорошо сконструированными механизмами операции АТП*: Некоторые из этих требований описываются в приложении I. Они включают в себя благоприятные кинетику и термодинамику реакции, адекватную механическую жесткость и существенные геометрические расстояния между переходными состояниями, ведущими к альтернативным результатам реакции. Все эти требования вытекают из необходимости ограничения тепловых флуктуаций.
- С. 138. *Методы органической химии не очень хорошо понятны неспециалистам*: В своем выступлении (1959 г.) Ричард Фейнман пошутил, что «Когда химик пытается произвести на свет молекулу, он продельывает удивительные вещи. Он видит перед собой кольцо, затем смешивает то и это, встряхивает полученную смесь и поворачивает сосуд. В большинстве случаев этот процесс заканчивается синтезом того, что планировалось». (Richard Feynman, «There's Plenty of Room at the Bottom», *Engineering and Science* 23, no. 5 [1960].)

Глава 7. Наука и бесконечный технологический ландшафт

- С. 149. ...*вневременной аспект законов физики, латентную структуру*: Со временем научное понимание законов физики может изменяться, но сами они остаются одними и теми же. Несмотря на повышение точности лабораторных измерений и космологических наблюдений «физические константы» действительно остаются постоянными.
- С. 157. *За последние четыреста с лишним лет*: Sean Carroll, «Cosmic Variance» blog at Discover Magazine, 16 June 2010 (<http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2010/06/16/reluctance-to-let-go/>).

Глава 8. Противоречия между наукой и техникой

- С. 173. *Вот что последовало дальше, в пересказе последователей джайнизма*: Fabien Schang, «A Plea for Epistemic Truth: Jaina Logic from a

Many-Valued Perspective», in *Logic in Religious Discourse*, edited by Andrews Schumann (Piscataway, NJ: Transaction Books, 2010), 54–83.

- С. 181. *На самом глубоком эпистемологическом уровне научное исследование:* Проблемам философии науки и (в меньшей степени) инженерного дела посвящен обширный круг научной литературы. Моя точка зрения на эти вопросы не является ни абсолютно новой, ни совсем уж старой. Поиски новизны в ней я оставляю специалистам, лучше знакомым с этой темой.
- С. 182. *...на практике они нередко переплетаются друг с другом:* Структурные различия между наукой и инженерией могут быть представлены следующим образом:

Область:	Научное исследование	Инженерное проектирование
Основное предназначение:	предоставляет знания	предоставляет продукты
Информационный поток:	от мира к модели	от модели к миру
Идеальные модели:	точные описания	надежные границы
Желаемые результаты:	удивительные открытия	предсказуемое поведение
Четко определенные знания:	исключают всех альтернативы	включают множество альтернатив
Эффективная организация:	независимые группы	скоординированные команды

- С. 189. *...репортер ВВС сообщил:* «North Korea „installs long-range rocket at launch site“», 3 December 2012 (<http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-20577340>).

Глава 9. Исследование потенциала технологии

- С. 210. *...мечты о полетах людей в космос. Ими грезил никому в то время не известный Константин Эдуардович Циолковский:* A. deChambeau, «Struggles of the „Father“», *Ad Astra* (September/October 2002): 41–44 (<http://dSPACE.sunyconnect.suny.edu/bitstream/handle/1951/36567/deChambeau-AdAstra.pdf>); Государственный музей истории космонавтики имени К. Э. Циолковского (http://www.gmik.ru/index_en.html).

Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, *Beyond the Planet Earth* (1920), page 13. From the foreword by B. N. Vorobyev. Translated by Kenneth Syers. Pergamon Press, 1960. На надгробном памятни-

ке, установленном на могиле К. Э. Циолковского, выбиты слова великого ученого: «Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство».

- С. 219. *Инженерные разработки с исследовательским уклоном:* Структурные отличия между обычной и исследовательской инженерией могут быть представлены следующим образом:

Виды инженерии	Ориентированная на производство	Исследовательская
Основное предназначение:	предоставление продуктов	получение знаний
Базисное ограничение:	доступная сборка	правильное моделирование
Уровень проектирования:	подробная спецификация	параметрическая модель
Основные источники издержек:	производство, операции	проектирование, анализ
Расчетные допуски:	обеспечивающие надежность продуктов	обеспечивающие достоверный анализ
Увеличенные допуски:	увеличение издержек	сокращение издержек

Глава 10. Механизмы полного изобилия

- С. 235. ...мы можем представить ширину следующих друг за другом слоев как $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$ и так далее: Эта четкая и ясная самоподобная архитектура была предложена Ральфом Меркле; ее улучшенный, функционально схожий вариант был описан в «Наносистемах».
- С. 239. ...В процессе получения и очистки исходного материала нужно довольно глубоко переработать изначальное природное сырье: В процессе преобразования сырья в очищенные исходные материалы путь атомарной точности лежит в направлении сокращения молекулярной сложности, что представляет собой естественную задачу обычных химических процессов, подобных используемым в промышленных процессах растворению минералов и преобразованию веществ, из которых они состоят, в молекулярные и ионные частицы. Затем они могут быть разделены с помощью каскадных процессов сортировки, полностью соответствующих атомарно точным механизмам (см. обсуждение в «Наносистемах»).

С. 240. ...множество контейнеров, присоединяющих молекулы, поступающие по трубе в виде чистого раствора в нужные места в строго определенной ориентации: Используемый «ниже по течению» механизм позволяет зондировать каждое место на предмет нахождения в нем молекул, подталкивая свободные к местам встречи. В соответствии с особенностями этого последовательного процесса требование свободной энергии, необходимой для связывания, снижается до уровня, необходимого для сокращения энтропии, которую мы можем рассматривать как работу, требуемую для сжатия в пространстве данной конфигурации и с позиционных, и с угловых координат.

Специалисты по вычислительной химии замечают, что расчеты необходимые для оценки свободной энергии с участием ориентированных, нерастворенных молекул в жестко связанном соединении являются гораздо более легкими, чем расчеты, которые необходимо осуществить в процессе зондирования мобильных, растворенных и конформационно нежестких молекул. Первые во многих случаях имеют исключительно колебательные степени свободы, что иногда позволяет использовать аналитические приближения в расчете значений энтропии и свободной энергии.

С. 241. ...весь диапазон материалов, применяемых в современных технологиях: Вероятно, любые исключения будут представлять собой только научный интерес. Подобные материалы могли бы по-прежнему изготавливаться традиционными средствами. Добавление АТП в набор инструментов инженера отнюдь не препятствует использованию других, более эффективных средств.

С. 241. Находящиеся на последующих стадиях производственного процесса механизмы направляют молекулы посредством серий столкновений с другими молекулами: В современной промышленной практике машины непрерывного движения широко используются в организации потоков продуктов, собираемых из поступающих потоками деталей; потоки обоих видов не встречают препятствий, поскольку детали самостоятельно сцепляются друг с другом без необходимости вычислений или использования моторов, способных двигать взад и вперед манипуляторы. Взяв хотя бы ручной бытовой распылитель. Сборка пластмассовых деталей и пружин не нуждается ни в человеческих, ни в механических руках. Детали просто передаются от машины к машине, с вращающимися, скользящими и кулачковыми компонентами, ориентирующими части распылителя относительно друг друга со скоростью до 10 единиц в секунду. (В Интернете вы можете найти видеозаписи, иллюстрирующие принципы машинной сборки в процессе непрерывного движения деталей.)

Аналогичные механизмы являются естественным выбором при сборке мономер и мельчайших частиц в процессе изготовления микроблоков. При масштабировании с коэффициентом десяти миллионов к одному (глава 5), производительность макроразмерных механизмов равная 10 операциям в секунду соответствует производительности 1 миллион операций в секунду для наноразмерных механизмов. Даже при значительном снижении скорости, по сравнению с базой (для уменьшения, например, фононного торможения в подшипниках), показатели выработки продукта остаются огромными.

- С. 241. *...химическими шагами по подготовке реактивных частей молекулярной структуры*: Условием надежной работы с малыми реактивными группами и мелкозернистыми структурами является достаточно жесткое размещение механизмов, что позволяет ограничить тепловые флуктуации. (В приложении I и приложении II это требование рассматривается в перспективе).
- С. 241. *...весь диапазон материалов, применяемых в современных технологиях*: Вероятно, любые исключения будут представлять собой только научный интерес. Подобные материалы могли бы по-прежнему изготавливаться традиционными средствами. Добавление в инженерный инструментальный набор АТП отнюдь не препятствует использованию других, более эффективных средств.
- С. 244. *...в большинстве случаев условием необратимости изменений становятся существенные затраты химической энергии*: Как и в случае со связыванием, в некоторых случаях избежать этого ограничения позволяет итеративный процесс с условным повторением.
- С. 245. *...с применением квантово-химического метода функционала плотности, использованного с осторожностью*: В процессе выбора методов и оценки степени доверия к ним необходимо учитывать, что методы квантовой химии характеризуются ограниченной точностью и диапазоном применимости. Методы функционала плотности, например, в большинстве случаев недооценивают энергии реакций переходных состояний, что, в зависимости от целей их применения, может быть как приемлемым, так и недопустимым.

Глава 11. Продукты полного изобилия

- С. 253. *...продукты из более прочных и легких материалов обладают меньшей массой*: Несмотря на то, что наиболее прочные материалы отличаются хрупкостью (вследствие сильных направленных связей), они могут быть включены в твердые материалы, которые находятся в волокнистой форме, подобно стеклу в стекловолоконистых композиционных материалах. Оптимизация

атомарно точных материалов, образованных из волокон, позволяет добиться предельного сопротивления на излом. Для решения этой задачи используется свойственный композиционным материалам механизм сопротивления волокон выдергиванию, а также упрочнение, обеспечивающее увеличение зоны деформации, а не развитие трещин.

- C. 253. *Легкий материал, более жесткий, чем авиационный алюминий*: Высокомодульные углеродные материалы значительно превосходят обычные металлы по такому показателю, как модуль Юнга (нормальной упругости) (например, алюминий — в 15 раз), но уступают им по коэффициенту прочности. Во многих случаях в конструкциях, которые подвергаются нагрузкам на изгиб и сжатие, модули упругости имеют более важное значение, чем прочность, но передовые атомарно точные материалы и структуры предлагают два компенсационных преимущества: высокие пределы упругой деформации (например, 10%) означают возможность более значительных отклонений без ущерба для прочности конструкции, в то время как простота производства структурных компонентов с максимально плотными покрытиями и относительно рыхлым ядром позволяет использовать более легкие утолщенные (следовательно, более устойчивые к изгибанию) конструкции. Конструкции, используемые в различных транспортных средствах, специально проектируются с учетом этих свойств, так как значительное преимущество углеродных материалов с точки зрения коэффициента прочности позволяет добиться аналогичного выигрыша с точки зрения массы.
- C. 255. *...усовершенствованные фотоэлектронные элементы, позволяющие преобразовывать солнечную энергию*: Требования к фотоэлектронным элементам, создаваемым на основе использования широко распространенных материалов, хорошо известны; проблема заключается в снижении издержек и показателя уровня дефектов при их изготовлении. (C. Wadia, A. P. Alivisatos, and D. M. Kammen, «Materials Availability Expands the Opportunity for Large-Scale Photovoltaics Deployment», *Environmental Science and Technology* 43, no. 6 [2009]: 2072–2077. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es8019534>).
- C. 256. *...электромагниты не подчиняются механическим правилам масштабирования*: Принимая плотность электрического тока за константу, плотность энергии магнитостатического поля в соседнем электрическом проводнике (следовательно, сила на единицу площади) изменяется прямо пропорционально его диаметру, в то время как при механическом масштабировании значение силы в расчете на единицу площади является постоянным. Таким образом, при уменьшении размеров в 10 мил-

лионов раз, отношение магнитной и механической сил также уменьшится в 10 миллионов раз.

Напротив, при постоянном напряжении напряженность электрического поля в расчете на единицу площади возрастет пропорционально квадрату этого соотношения (при разделении площади поля пополам, плотность энергии возрастает в четыре раза). Принимая напряженность электрического поля за константу (требование, предъявляемое к полям, приближающимся к электрической прочности на пробой), электрические силы масштабируются пропорционально механическим силам. Низковольтные устройства, функционирующие в сильных электрических полях, оказываются не менее привлекательными, чем наноразмерные моторы (более подробное обсуждение содержится в «Наносистемах»). Их эффективность может быть очень высокой, а законы масштабирования открывают возможность достижения очень высокой удельной мощности.

- С. 257. *По показателю удельной мощности это дает огромное преимущество перед лучшими современными электромагнитными двигателями:* В наноразмерных системах длина тепловых путей становится короче, и малые температурные различия приводят к более высоким характеристикам потока тепловой энергии (соотношение совпадает с коэффициентом масштабирования, например, в 10 миллионов раз выше). В то же время в макромасштабных составляющих наноразмерных устройств длины тепловых путей остаются обычными, что ограничивает возможности охлаждения.
- С. 257. *...законы механического масштабирования позволяют создавать системы:* Источниками высокой продуктивности обработки материалов, основывающейся на АТФ, и высокой эффективности АТ-систем преобразования энергии, являются свойства крупных совокупностей малых высокочастотных устройств. Высокая эффективность зависит (отчасти) от использования низкоэнтропийных, нетепловых процессов и механизмов с низким внутренним трением.
- С. 257. *...серии последовательных шагов... тесно связанных с механическими перемещениями:* Условием близости такого рода процессов к термодинамической обратимости является сочетание механических систем высокой жесткости (в особенности, относительно координат их движения) и низкой отрицательной кривизне функции потенциальной энергии (в механических категориях — в низкой отрицательной жесткости) вдоль координат переходного состояния реакции. Эти условия являются строгими, но они, как представляется, могут быть выполнены в случае использования катализа переходных металлов и жестких

ковалентных компонентов, поддерживаемых жесткими воспринимаемыми интерфейсами.

- С. 258. *...наномеханические компьютеры могли конкурировать с электронными устройствами:* Подробный анализ содержится в «Наносистемах». Обратите внимание, что скорость распространения механического сигнала в жестких углеродных материалах составляет порядка 10 км/с, в то время как диаметр в разумной степени работоспособного ядра компьютерного процессора может достигать порядка одного микрона, что означает задержку распространения сигнала примерно на 0,1 наносекунды.
- С. 260. *...приближения эффективности устройств к термодинамическим пределам:* И вновь подробный анализ содержится в «Наносистемах».
- С. 260. *...в диапазоне миллиард гигабайт в расчете на кубический сантиметр:* Осторожная оценка плотности размещения информации в устройствах, построенных по принципу статической памяти. По сравнению с ними, устройства с более высокими показателями времени ожидания информации, занимающие более низкие позиции в иерархии памяти (построенные на основе полимеров, занимающих меньше места, чем ДНК), способны хранить в тысячу раз больший объем информации.
- С. 264. *Что касается более редких элементов, таких как цинк, олово и свинец:* Что касается замены материалов, то к основным областям, в которых редкие вещества могут непрерывно удерживать свое преимущество, относятся их электронные, магнитные и химические свойства. Например, занимающие сегодня лидирующие позиции высокотемпературные сверхпроводники изготавливаются не только из меди, но и из иттрия, бария, висмута и стронция. В то же время в наши дни их коммерческое использование ограничено.

Рассмотрим другой пример. Запасы неодима и других редкоземельных металлов, применяемых сегодня для изготовления магнитов, устанавливаемых в высокопроизводительных электрических двигателях, используемых в электромобилях и ветротурбинах, весьма невелики. В силу фундаментальных причин, обусловленных электронной структурой (количество неспаренных спинов в расчете на атом), редкоземельные элементы, вероятнее всего, будут оставаться наилучшим выбором из твердых магнитных материалов. Но, по упомянутым выше причинам, на смену магнитным электромоторам, скорее всего, придут другие двигатели.

Еще один пример. Платина и другие редкие переходные металлы обладают уникальными свойствами, которые делают их незаменимыми компонентами катализаторов. В то же время механически направляемые химические процессы будут все

более востребованными. Катализаторы, включенные в высокочастотные атомарно точные механизмы, будут иметь продолжительные сроки службы, в то время как частота их использования будет достигать, по меньшей мере, одного миллиона раз в секунду (при этом сохраняется возможность переработки). В этом случае потребность в редких переходных металлах будет относительно небольшой.

Итак, возможности сокращения издержек состоят в следующем:

Источники составляющих издержек	Типичный коэффициент	Основания для сокращения издержек
Сырьевые материалы	< 1 : 10	Продукты с меньшей массой, недорогие сырьевые материалы
Входящие энергетические ресурсы	~ 1	Меньшая масса продуктов компенсирует незначительное увеличение затрат энергии в расчете на единицу массы
Потребность в площадях	< 1 : 100	Компактное высокопроизводительное производственное оборудование
Потребность в трудовых ресурсах	< 1 : 100	Отсутствие потребности в непосредственном участии в производстве
Удаление отходов производства	< 1 : 100	Уменьшение массы обрабатываемого сырья, жесткий контроль над процессом, нулевой «углеродный след»
Несчастные случаи на производстве и аварии	< 1 : 100	Отсутствие опасных материалов или непосредственного воздействия на людей
Основной капитал	< 1 : 1	Высокая продуктивность, недорогое производственное оборудование

Учитывая огромные возможности повышения результатов производства и снижения текущих производственных затрат в расчете на килограмм продукции, у нас есть все основания ожидать снижения издержек в 10–1000 раз.

Глава 12. Современные технологии атомарной точности

- С. 276. Химики создают соединения/молекулы, превращающиеся для нас в объекты созерцания: R. Hoffmann, «What Might Philosophy of Science Look Like If Chemists Built It?» *Synthese* 155, no. 3 (2007): 321–336 (<http://www.springerlink.com/content/px87858157672k37/>).
- С. 278. В опубликованной в 2001 г. своей знаменитой статье: H. C. Kolb, M. G. Finn, and K. B. Sharpless, «Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions», *Angewandte Chemie International Edition* 40, no. 11 (2001): 2004–2021.
- С. 279. Химической реферативной службы Американского химического общества: Сентябрь 2012 г.
- С. 280. ...пептоиды, получаемые присоединением к боковой цепочке из атомов азота (а не углерода): R. N. Zuckermann et al., «Efficient Method for the Preparation of Peptoids [oligo (N-substituted glycines)] by Sub-monomer Solid-Phase Synthesis», *Journal of the American Chemical Society* 114, no. 26 (1992): 10646–10647; а также заказной обзор недавней конференции по пептоидам: K. E. Drexler, «Peptoids at the 7th Summit: Toward Macromolecular Systems Engineering», *Peptide Science* 96, no. 5 (2011): 537–544.
- С. 282. В некоторых случаях белки конструируются с нуля: См. обзор: Robert J. Pantazes, Matthew J. Grisewood, and Costas D. Marnas, «Recent Advances in Computational Protein Design», *Current Opinion in Structural Biology* 21, no. 4 (2011): 467–472 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbi.2011.04.005>).
- С. 283. ...«обучили» рибосомы считыванию четырех, а не трех оснований в расчете на кодон: K. Wang, W. H. Schmied, and J. W. Chin, «Reprogramming the Genetic Code: From Triplet to Quadruplet Codes», *Angewandte Chemie International Edition* 51, no. 10 (2012): 2288–2297.
- С. 284. В 1980-х гг. Надриан Симен начал разработку: Одной из его важнейших работ является J. Chen and N. C. Seeman, «Synthesis from DNA of a Molecule with the Connectivity of a Cube», *Nature* 350 (1991): 631–633.
- С. 284. ...получившего название «ДНК-оригами»: Или, если быть более точным, поддерживающего ДНК-оригами: P. W. K. Rothemund, «Folding DNA to Create Nanoscale Shapes and Patterns», *Nature* 440 (2006): 297–302.
- С. 286. ...перемещая 35 атомов ксенона: Donald M. Eigler and Erhard K. Schweizer, «Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope», *Nature* 344, no. 6266 (1990): 524–526.

- С. 289. *Совмещение отдельных фрагментов — составные молекулярные системы*: К ним относятся продукты, производимые на ранних стадиях, в соответствии с направлениями, рассматриваемыми в приложении II.
- С. 290. ... у ДНК есть недостатки: Аптамеры — это молекулы, укладываемые и связываемые со структурами, не принадлежащими к ДНК. ДНК-машины включают в себя, например, механизмы, оснащенные комплексами поворотных рук: (Baoquan Ding and Nadrian C. Seeman, «Operation of a DNA Robot Arm Inserted into a 2D DNA Crystalline Substrate», *Science* 314, no. 5805 [2006]: 1583–1585.), а также «движителями» и другими устройствами (Jonathan Bath and Andrew J. Turberfield, «DNA Nanomachines», *Nature Nanotechnology* 2, no. 5 [2007]: 275–284).
- С. 293. ...будет создано соответствующее программное обеспечение для пептидов: Об этом мне рассказал Кент Киршенбаум.
- С. 293. ...технологии сборки уже доступны... в то время как дизайн остается главной проблемой: Что касается инженерии и ограниченных прогнозных возможностей современных компьютерных моделей, необходимо учитывать два момента. Во-первых, (приблизительная) аддитивность энергий взаимодействия способна привести к снижению чувствительности более крупных структур к ошибкам в количественных оценках; во-вторых, пробы и ошибки всегда были частью инженерного проектирования.

Глава 13. На пути в будущее произошло нечто странное...

- С. 300. ...доктор Абдул Калам... выступил с серией посланий к нации: Например, выступление на встрече с учеными и технологами в Дели в апреле 2004 г. (адаптировано для Hindustan Times, 25/11/2004: GUEST COLUMN, President A. P. J. Abdul Kalam, <http://www.hindustantimes.com/News-Feed/NM3/President-Kalam-s-Take/Article1-21101.aspx>), а также его недавнее (30 ноября 2012 г.) выступление на праздновании 100-летия со дня рождения доктора Брахма Пракаша в Хайдарабаде.

Более десяти лет назад, президент США Билл Клинтон объявил о намерении принять первую в мире национальную нанотехнологическую программу. В выступлении в Калифорнийском технологическом институте 21 января 2000 г., посвященном научной политике США, президент заявил: «Мой бюджет предусматривает выделение \$500 миллионов на финансирование важнейшей новой программы — Национальной нанотехнологической инициативы. Для сотрудников института в идее нанотехнологий — способности манипулировать материей на атомарном и молекулярном уровнях — нет ничего стран-

ного. Еще сорок лет назад здесь же в Калтехе Ричард Фейнман задался вопросом: «Предположим, мы научимся выстраивать атом за атомом в удобном нам порядке. Какие последствия это будет иметь?».

- С. 300. ...аналогичная общегосударственная программа Китая имеет более крупный бюджет: «Public Funding of Nanotechnologies 2012», Report into Global Public Funding of Nanotechnologies, ObservatoryNANO project (7th Framework programme), www.observatorynano.eu/project/filesystem/files/PublicFundingofNanotechnologies_March2012.pdf. «China Triples Spending on Nanotechnology over Past Five Years», Xinhua Global Edition (English), January 2010 (http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2011-01/11/c_13686054.htm).
- С. 300. ...государственные расходы на исследования в области нанотехнологий в США, Европе и Китае измеряются миллиардами долларов: «Global Funding of Nanotechnologies and Its Impact, July 2011» Cientifica (<http://cientifica.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Global-Nanotechnology-Funding-Report-2011.pdf>).
- С. 304. ...«нанотехнологии» были просто названием, словом, которое я предложил: В прелюдии к книге упоминалось о том, что впоследствии я узнал об использовании термина «нано-технология» в 1974 г. в публикации материалов одной из проводившихся в Японии конференций, посвященной технологиям иного рода.
- С. 304. ... публикации в популярной прессе донесли изложенные в ней идеи до миллионов читателей: Как отмечалось в главе 3, они начались со статьи в журнале OMNI в конце 1986 г.
- С. 306. В названии статьи содержались слова «наночастицы оксида железа»: *Science* 4 (May 2012): Ajay Kumar Gupta, and Mona Gupta. «Synthesis and Surface Engineering of Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications», *Biomaterials* 26, no. 18 (2005): 3995–4021.
- С. 308. «...будут использоваться для очистки человеческих артерий?»: Впервые популярное изображение микроскопических подводных лодок, лавирующих между красными кровяными тельцами и уничтожающих жировые отложения, использовалось в разделе «Компьютерные места отдыха» журнала *Scientific American* в качестве иллюстрации одного из развлекательных материалов (А. К. Dewdney, «Nanotechnology: Wherein Molecular Computers Control Tiny Circulatory Submarines», *Scientific American* 258 [January 1988]: 100–103 [101]).
- С. 313. ...восприняло риторику «строительства атом за атомом»: Сама по себе идея буквального строительства «атом за атомом» представляет собой технически неточный «перевод» на общедоступный язык идеи атомарно точной сборки — химических процессов, которые позволяют регулярно получать атомарно

точные результаты. При этом не происходит никакого «жонглирования» отдельными атомами. Как ни странно, в научных кругах популярная идея о том, что АТП потребовало бы невозможного жонглирования атомами, превратилась в широко используемый критический довод. Возникает впечатление, что использующие его ученые не знакомы с литературой на эту тему и не имеют представления о возможности практического осуществления АТП.

- C. 315. ...глянцевую «брошюру для населения», под названием: *Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom*, Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (December 1999) (<http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/>).
- C. 315. ...и НСНТ выпустили более официальный документ: *National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan*, National Science and Technology Council Committee on Technology Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology (July 2000) (http://nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nni_implementation_plan_2000.pdf).
- C. 316. В разделе закона, озаглавленного «*Определения*»: Sec. 8., Definitions, 21st Century Nanotechnology Research and Development Act, 107th Congress, 2001–2002 (аналогичное определение использовалось и в ряде последующих законодательных актов).
- C. 317. ...был внесен законопроект, в котором понятия «атомарный, молекулярный и надмолекулярный уровни» были заменены «наноразмерными»: Sec. 13., Amendments to Definitions, National Nanotechnology Initiative Amendments Act of 2008, 110th Congress, 2007–2009.
- C. 318. ...принят в 2004 г. «Стратегическом плане Национальной нанотехнологической инициативы»: National Science and Technology Council Committee on Technology Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology (December 2004) (www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/sp_report_nset_final.pdf).
- C. 319. ...опубликовал в журнале *Wired* статью о технологиях будущего: Bill Joy, «Why the Future Doesn't Need Us», Issue 8.04 (April 2000): 238–262.
- C. 321. Основные страхи связаны с возможностью создания: R. E. Smalley, «Nanotechnology, Education, and the Fear of Nanobots», in *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, a report from a National Science Foundation workshop on September 28–29, 2000 (www.wtec.org/nanoreports/nanosi.pdf). Здесь, как и в журнале *Scientific American*, Р. Смолли повторил, развил и придал новый импульс заблуждениям, почерпнутым из популярной фантастики.
- C. 321. ...приравнял АТП в самом общем смысле к полчищам опасных нанороботов: R. E. Smalley, «Of Chemistry, Love and Nanobots», *Scientific*

American 285, no. 3 (September 2001): 76–77 (cohesion.rice.edu/naturalsciences/smallley/emplibary/sa285-76.pdf). Особое внимание к заявлениям Р. Смолли (и приводившимся выше, и те которые будут упоминаться ниже), обусловлено тем, что его воззрения, как лауреата Нобелевской премии и наиболее известного научного представителя, отстаивавшего интересы ННИ, имели огромный вес в проходивших в то время дискуссиях. Кроме того, по общему мнению, он был ведущим критиком ошибочно приписывавшихся мне воззрений.

В своей статье, опубликованной в том же номере *Scientific American*, я писал: «...хорошо известный химик опровергает утверждение о том, что для осуществления операций ассемблеру [устройству для стереотактического синтеза] могут потребоваться десять роботизированных „пальцев“; более того, для них не остается пространства». Далее, я отмечал, что подобное требование «никогда не выдвигалось и никогда не обсуждалось всерьез» (К. Е. Drexler, «Machine-Phase Nanotechnology», *Scientific American* 285, no. 3 [September 2001]: 74–75). Тем не менее уже через несколько страниц журнала Смолли снова провозглашает, что атомарно точное изготовление потребовало бы крошечных, но невозможных, пальчиков. Впоследствии эти его замечания широко цитировались как при объяснении принципов АТП, так и в целях его критики.

- С. 321. ...выступая на слушаниях в конгрессе и в других своих заявлениях: Предлагаю познакомиться с периодически изменявшимися позициями Р. Смолли относительно атомарной точности: «Мы близки к тому, чтобы создавать вещи, способные к работе в наименьших по своей величине масштабах, атом за атомом» (из выступления на заседании комитета по науке палаты представителей конгресса США 22 июня 1999 г.), «Для того чтобы поместить каждый атом на отведенное ему место — в соответствии с видением некоторых специалистов в нанотехнологиях — потребовались бы волшебные пальцы» (из цитировавшегося выше номера *Scientific American* за сентябрь 2001 г.); «Окончательная нанотехнология открывает возможность строительства с искусным использованием одного атома за один раз, когда операции осуществляются с молекулярным совершенством» (из выступления на президентском совете советников по науке и технологиям 3 марта 2003 г.). В течение нескольких лет второе, отрицательное мнение Смолли широко цитировалось как выражение позиции авторитетного ученого, но только в связи (с тем, что, как полагали, должно было быть) с предлагавшимися технологиями АТП.
- С. 321. ...познакомившим его с нанотехнологиями и заразившим его своим энтузиазмом: «Чтение [«Машин создания»] стало событием,

под влиянием которого я отправился в самостоятельное путешествие по нанотехнологиям» («Nanotechnology: Drexler and Smalley make the case for and against molecular assemblers», Part Two: «Smalley Responds», *Chemical and Engineering News*, 81 (2003): 39–40).

- С. 321. *Впоследствии Смолли выступил с критикой и учения Ч. Дарвина: «Смолли упомянул об идейном противостоянии теории эволюции и креационизма, Дарвина и библейской Книги Бытия. По его словам, бремя доказательств лежит на тех, кто не верит в правоту Книги Бытия, в сотворение мира и в присутствие Творца в нашей жизни»* («Scholarship Convocation Speaker Challenges Scholars to Serve the Greater Good», Tuskegee University, October 3, 2004, News Release).
- С. 324. *...законопроект, в соответствии с которым на Национальную академию наук была возложена ответственность за руководство: H.R. 766 (108th) Nanotechnology Research and Development Act of 2003, 108th Congress, 2003–2004. Text as of May 8, 2003 (Referred to Senate Committee).*
- С. 325. *...удалось убедить сенатора... в необходимости исключения соответствующего пункта из закона: «На самом же деле другой официальный представитель NanoBusiness Alliance признался репортеру, что альянс обратился к сотрудникам сенатора Джона Маккейна (республиканца из Аризоны) с предложением исключить положение об исследованиях из проекта закона [на заседании согласительного комитета палаты представителей и сената]»* (The editors of The New Atlantis, «The Nanotech Schism», *The New Atlantis*, Number 4 [Winter 2004]: 101–103 [<http://www.thenewatlantis.com/publications/the-nanotech-schism>]).
- С. 325. *...была организована разработка «дорожной карты»: Productive Nanosystems: A Technology Roadmap, K. E. Drexler, J. Randall, and A. Kawczak, editors, Battelle Memorial Institute, 2007 (http://productivenanosystems.com/pgs/Nanotech_Roadmap_2007_TOC.html).*

Глава 14. Как ускорить прогресс

- С. 329. *«Дорожная карта» для закона Мура: The International Technology Roadmap for Semiconductors (<http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>).*
- С. 330. *Дорожная карта для квантовых информационных систем: The Quantum Information Science and Technology Roadmap (http://qist.lanl.gov/qcomp_map.shtml).*
- С. 331. *Разработка дорожной карты для АТП: Productive Nanosystems: A Technology Roadmap, K. E. Drexler, J. Randall, and A. Kawczak,*

editors, Battelle Memorial Institute, 2007 (http://productivenano-systems.com/pgs/Nanotech_Roadmap_2007_TOC.html).

Глава 15. Преобразование материальной основы цивилизации

- С. 345. ...и предел современных технологий производства полупроводниковых микросхем уже виден: Явным признаком нарушения закона Мура, основывавшегося на уменьшении размеров устройств, является флеш-память. Для повышения ее объема изготовители попытались увеличить количество слоев, но это привело к постепенному возрастанию издержек обработки для каждого из них. В отличие от сжатия самих устройств, увеличение количества слоев не сопровождается экспоненциальными улучшениями.
- С. 346. ...с милливатт до ватт: Посредством технологий, позволяющих осуществлять операции на уровне, значительно (но все еще недостижимом) более близком к конечным термодинамическим пределам цифровых вычислений (С. Н. Bennett, «Notes on the History of Reversible Computation», *IBM Journal of Research and Development* 32 [1988]: 16–23).
- С. 350. ...десятикратное уменьшение массы транспортных средств: В результате повышения прочности конструкционных материалов (см. обсуждение в главе 11).
- С. 350. ...удвоение средней эффективности двигателя: См. обсуждение процесса преобразования химической энергии в главе 11 и в примечаниях к ней; коэффициент полезного действия двигателей современных легковых и грузовых автомобилей находится на уровне, значительно меньшем, чем 50%.
- С. 350. ...тепловые электростанции, работающие на угле (в США их количество достигает 2300): International Energy Agency Clean Coal Centre, <http://www.ica-coal.org.uk/site/2010/database-section/coal-power> (retrieved December 2012).
- С. 352. Создавая возможность применения широко распространенных элементов... для замены редких материалов: Некоторые из основных аспектов возможности замены редких материалов рассматривались в главе 11 (и примечаниях к ней).
- С. 353. Атомарно точная сборка позволяет производить специальные мембраны: К примерам разделения потоков посредством мембран с низким сопротивлением относятся короткие углеродные нанотрубки и нанопористый графен (например, D. Cohen-Tanugi and J. C. Grossman, «Water Desalination across Nanoporous Graphene», *Nano Letters* 12, no. 7 [2012]: 3602–3608).
- С. 353. ...цены на продукты питания начали расти, и в последнее время — стремительно: Тенденция к повышению цен, в соответствии

с индексом продовольственных цен ФАО, отмечается, начиная с 2000 г. В настоящее время уровень цен на продовольствие примерно в 2 раза превышает соответствующий показатель 1990-х гг. Как обычно, относительно развития событий в будущем высказываются самые разные мнения.

- С. 363. ...преобразования клеток рубцовой ткани в сердечную мышцу: L. Qian et al., «In vivo Reprogramming of Murine Cardiac Fibroblasts into Induced Cardiomyocytes», *Nature* 485 (2012): 593–600.

Глава 16. Управление прорывным успехом

- С. 374. ...стоимость большинства промышленных сырьевых материалов начала возрастать: Например, за последние 10 лет на Лондонской бирже металлов цены на различные промышленные металлы (включая медь, никель, цинк и сталь) увеличились в 2–4 раза.
- С. 375. ...в последние годы добыча нефти стабилизировалась: Как обычно, появление и распространение новых технологий приводит к тому, что тенденции становятся не слишком надежным «руководством» относительно будущего. Соответственно различаются и взгляды относительно перспектив. Например, согласно недавнему докладу Международного энергетического агентства (2012 г.), посвященному новым технологиям, предполагается, что еще до 2020 г. США выйдет на ведущие в мире позиции по добыче нефти, а к 2030 г. превратится в ее экспортера. Данная точка зрения полностью противоречит широко распространенным воззрениям. В этом же докладе МЭА предупреждает о таком ограничении на добычу углеводородов, как выбросы углекислого газа («World Energy Outlook 2012 Fact-sheet», International Energy Agency).
- С. 384. ...температура и уровень содержания углекислого газа в атмосфере могут оставаться высокими на протяжении столетий: S. Solomon et al., «Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, no. 6 (2009): 1704–1709 (<http://www.pnas.org/content/106/6/1704.long>).
- С. 384. ...быстро обеспечить существенное снижение уровней CO₂: Но даже этого, самого по себе, может быть недостаточно: «Даже после прекращения выбросов изменение климата, вызванное увеличением концентрации углекислого газа, на протяжении примерно 1000 лет будет оставаться необратимым. Вслед за остановкой эмиссии удаление углекислого газа из атмосферы приведет к снижению радиационного воздействия, что в значительной степени компенсируется более медленной потерей тепла Мировым океаном. Поэтому на протяжении 1000 лет уменьшение атмосферных температур будет оставаться незначительным (из S. Solomon et al.).»

- С. 384. ...улавливания и сжатия трех триллионов тонн углекислого газа: Основной проблемой является улавливание и сжатие углекислого газа до плотности жидкости. Но не менее трудной задачей является его хранение *per se*. Количество сжатого CO_2 составил бы примерно треть объема воды в озере Байкал, или одну десятитысячную объема антарктических льдов. Это крупные в абсолютных значениях величины, однако в глобальном масштабе они не столь уж велики. Возможность хранения сжатого углекислого газа в столь значительном объеме в геологических образованиях представляется сомнительной. Более целесообразным представляется его хранение в гранулированной твердой форме, при условии приемлемой стоимости с учетом потребности в дополнительных материалах, энергии и переработке.

Глава 17. Безопасность в условиях необычного будущего

- С. 397. ...воздушно-космические системы... атомарно точного производства: Более подробно этот сценарий рассматривается в «The Stealth Threat: An Interview with K. Eric Drexler», *Bulletin of the Atomic Scientists* 63, no. 1 (2007): 55–58.
- С. 404. ...не только обществу в целом, но и тем, кто воображает, будто способен контролировать органы безопасности: Во многих случаях наибольшему риску в борьбе за власть подвергаются те, кто находится вблизи вершины ее пирамиды.
- С. 406. ...конкурентного давления на доступ к рынкам и природным ресурсам: Например, в документах федерального правительства США конкуренция за природные ресурсы описывается как ключевая проблема стратегии национальной безопасности.

Из «Национальной стратегии безопасности», подготовленной исполнительным управлением президента США и опубликованной в 2010 г.: «Америка, как и другие государства, зависит от зарубежных рынков как с точки зрения продажи экспортируемых товаров, так и с точки зрения доступа к ограниченным сырьевым продуктам и ресурсам. ...До тех пор, пока мы зависим от ископаемых видов топлива, мы нуждаемся в обеспечении безопасности и свободных потоках глобальных энергетических ресурсов».

Из «Национальной военной стратегии», подготовленной в аппарате председателя Объединенного комитета начальников штабов США (2011 г.): «Хроническая проблема ограниченности ресурсов может накладываться на территориальные споры».

Из доклада «Вооруженные силы Китайской Народной Республики», подготовленного секретариатом министра оборо-

ны США (Annual Report to Congress, 2008): «По мере роста китайской экономики, ее зависимость от безопасного доступа к рынкам и природным ресурсам, прежде всего металлам и ископаемым топливам, оказывает все более сильное влияние на стратегическое поведение Китая».

Из доклада «Общее оперативное пространство» Объединенного командования единых сил США (2010 г.): «В отсутствие крупного расширения производства и перерабатывающих мощностей глубокий энергетический кризис неизбежен... замедление темпов экономического роста приведет к обострению других пока не нашедших решения проблем, подталкивая неокрепшие и несостоятельные государства к краху и оказывая, вероятно, значительное экономическое воздействие на Китай и Индию... Не следует забывать, что Великая депрессия привела к установлению в ряде стран тоталитарных режимов, попытавшихся обеспечить экономическое процветание своим народам посредством бесчеловечной войны».

С. 410. *...непреодолимое значение военной силы и разработки новых вооружений*: Оно обусловлено несколькими причинами. Заглядывая в будущее, мы понимаем, что перспективы создания АТП не способны быстро изменить потребность в сильных военных позициях. В еще более отдаленном будущем, рассуждая о проблемах управления в переходном периоде, изменения в национальных интересах потребуют таких стратегий и сил, которые соответствовали бы проблемам, обсуждавшимся в основном тексте. И наконец, приход технологий АТП-уровня повлечет за собой новую революцию в военном деле. В данном контексте требования к вооруженным силам будут формироваться под влиянием кооперативной структуры коллективной безопасности. Но эти требования, вне всяких сомнений, будут включать в себя сильные системы безопасности, основывающиеся на передовых технологиях.

С. 412. *Кооперативные стратегии ухода от ненужных рисков*: В общих чертах, совместные стратегии недопущения ненужных рисков в отношении безопасности уже включены в повестку дня. Например, в соответствии с «Национальной стратегией безопасности», подготовленной исполнительным управлением президента США (2010 г.): «Разногласия не должны препятствовать сотрудничеству в вопросах, представляющих взаимный интерес, так как прагматичные и эффективные отношения между США и Китаем имеют существенно важное значение с точки зрения решения важнейших проблем XXI столетия». Из «Национальной военной стратегии», разработанной в аппарате председателя Объединенного комитета начальников штабов США (2011 г.): «Недопущение войн имеет столь же важное значение, как и победы в них, тем более что для этого требуются».

ся гораздо меньшие по объему средства». Данная точка зрения полностью совпадает с мнениями, высказывавшимися на протяжении большей части всемирной истории.

*Глава 18. Изменение повестки дня
в дискуссиях о будущем*

- С. 431. ...первый ответ в процессе группового обсуждения нередко задает направление и последующего: Это пример «социального каскада», который (наряду с другими сильными сторонами и патологиями группового принятия решений) обсуждается в короткой и хорошо написанной книге Касса Санстейна (Cass Sunstein, *Infotopia: How Many Minds Produce Knowledge*, Oxford, UK: Oxford University Press, 2006).

Научное издание

ЭРИК ДРЕКСЛЕР
ВСЕОБЩЕЕ БЛАГОДЕНСТВИЕ
Как нанотехнологическая революция
изменит цивилизацию

Главный редактор издательства Валерий Анашвили
Научный редактор издательства Артем Смирнов
Выпускающий редактор Елена Попова
Корректор Наталия Селина
Художник серии Валерий Коршунов
Верстка Сергея Зиновьева

Издательство Института Гайдара
125993, Москва, Газетный пер., д. 3-5, стр. 1



Подписано в печать 01.10.2014.
Тираж 2000 экз. Формат 60×90/16.
Отпечатано способом ролевой струйной печати
в ОАО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1
Сайт: www.chpd.ru, E-mail: sales@chpd.ru, т/ф. 8(496)726-54-10