

## Нанотехнологии

DOI: 10.34828/UdSU.2023.85.48.009

УДК 630.3

*В.П. Иванников, А.В. Кабакова*

### КЛЮЧЕВАЯ РОЛЬ «МЕХАНОСИНТЕЗА» И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В «МОЛЕКУЛЯРНОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ»

**Аннотация.** В предыдущей статье показано, что вывод Дрекслера и его последователей «о принципиальной возможности создания «молекулярных ассемблеров»», с помощью «молекулярной нанотехнологии», которые представляют собой ««молекулярные машины», способные «роботизированно собирать молекулярные материалы и устройства, манипулируя отдельными атомами или молекулами», является, мягко сказать, недостаточно обоснованным, несмотря на то, что эти идеи излагаются в контексте идей, якобы совпадающих с высказываниями на эту тему великих физиков от Ньютона до Фейнмана, которые предполагали природные возможности создания «эвтактичных наносистем» (от греческого *eu taktikos* – «упорядоченный, правильно сложенный»). По Дрекслеру именно «механосинтез» в «молекулярной нанотехнологии» играет ключевую роль, как инструмент конкуренции с природными технологиями формирования материалов и химических соединений, путём их «механической сборки из отдельных атомов». В данной работе покажем, что результатов фундаментальных исследований глубокого научного содержания в области «механосинтеза» не существует. А отсутствие таких работ свидетельствует о необоснованности и недоказанности вышеуказанных идей Дрекслера. По нашему мнению, возможности «механосинтеза» в «молекулярной нанотехнологии» может считаться доказанной только тогда, когда будут продемонстрированы первые реальные «нанороботы», полученные методом «молекулярной сборки», а не синтезированные с помощью компьютера «картинки».

**Ключевые слова:** молекулярная нанотехнология, механосинтез, наноробот, «молекулярные роторы».

*Для цитирования:* Иванников В.П., Кабакова А.В. Ключевая роль «механосинтеза» и проблемы обеспечения физического эксперимента в «молекулярной нанотехнологии» // Управление техносферой: электрон. журнал, 2023. Т.6. Вып.4. URL: <https://technosphere-ing.ru> С. 586 –601. DOI: 10.34828/UdSU.2023.85.48.009.

## Содержание

По определению из Википедии [1], *«механосинтез» – это «химический синтез, выполняемый механическими системами, позволяющий позиционировать реагирующие вещества с высокой степенью точности. При этом возможно формирование как ковалентной, так и других химических связей».* Формирование *«как ковалентной, так и других химических связей»* в результате манипулирования атомами и молекулами – это что-то невероятное и неизвестное ни в физике, ни в химии, но (по Дрекслеру) очевидное и не требующее доказательств [2].

Одновременно с этим, в работах [3, 4] утверждается также, что, поскольку *«многофункциональный инструмент, необходимый для выполнения подобных операций, пока не создан»*, предлагается *«в качестве инструмента «механосинтеза» использовать атомно-силовой микроскоп»* с непонятной оговоркой, что это *«накладывает ряд ограничений на синтезируемый продукт».* Более того, в ряде работ [5, 6] утверждается, что в настоящее время уже созданы электромеханические *«нанороботы»* – ограниченно способные к перемещению атомов, которые можно считать прототипами *«нанороботов»*; *«молекулярные роторы»* – синтетические *«наноразмерные»* двигатели, способные генерировать крутящий момент при приложении к ним достаточного количества энергии.

Якобы созданы некоторые примитивные прототипы молекулярных машин [7]. Университет Райса продемонстрировал *«нанороботы»* для использования их в регулировании химических процессов. Датчик, имеющий переключатель около 1,5 нм, способный вести подсчет отдельных молекул в химических образцах. В конце 2008 года международной группой под руководством Йоргена Кьемса создан один из самых сложных прототипов *«наноробота»* – *«DNA box»* [8]. Устройство имеет подвижную часть,

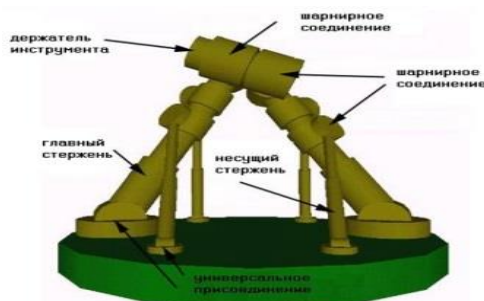
управляемую с помощью добавления в среду специфических фрагментов ДНК. По мнению Къемса, устройство может работать как «ДНК-компьютер», т.к. на его базе возможна реализация логических вентилей. Важной особенностью устройства является метод его сборки, так называемый «*DNA origami*», благодаря которому устройство собирается в автоматическом режиме.

Разработке компонентов «нанороботов» и непосредственно «нанороботам» посвящен ряд международных научных конференций. Например, в одной из работ говорится о том, что с 2009 года «нанороботы» находятся в научно-исследовательской стадии создания [9]. Некоторыми учёными утверждается, что уже созданы некоторые компоненты «нанороботов». В качестве доказательства приводятся примеры, подобные тем, что на рис. 1.

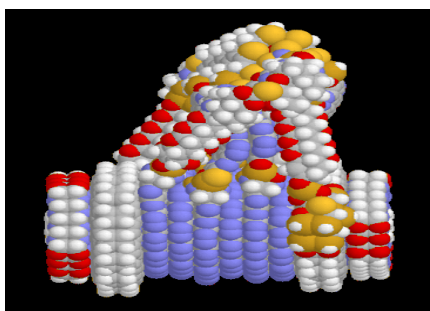


**Рис. 1. Наноманипуляторы**

Серьёзно обсуждается сценарий «механосинтеза» алмазодной поверхности инструментами «механосинтеза». На рис. 2 и 3 представлены модели двойного трипода).



**Рис. 2. Наноманипулятор – «двойной трипод»**



**Рис. 3. Молекулярная модель «двойного трипода» на основе измененной платформы Стюарта**

Судя по этим «картинкам», дело за малым, осталось только синтезировать их, построить грубые «наноманипуляторы» для производства первых этактичных структур, которые, впоследствии, помогут при создании автоматизированных «наноманипуляторов», «фабрикаторов» и «ассемблеров» [10]. Кстати, некоторые «эксперты» в области «нанотехнологий» сами признаются в том (практически проговариваются), что «... идеи о способах создания и применения наноманипуляторов совпадают практически текстуально с фантастическим рассказом известного советского писателя Бориса Житкова «Микроруки», опубликованным в 1931 году.

Удивительно, но складывается впечатление, что они совершенно не отдают себе отчёта в том, что идеи о «способах создания и применения наноманипуляторов», всего лишь плод фантазии писателя, а не доказательство возможностей создания «наноманипуляторов». Типа того, что ведь «Беляев предсказал в своём романе «Гиперболоид инженера Гарина» открытие учёными «лазера». Может и в идеях Бориса Житкова есть предвидение «чего-то». Вопрос: чего – «наноманипуляторов»? Может быть. Но это пока всего лишь фантазии писателя, а не доказательства.

Подобные рассуждения о «механосинтезе» приведены и в работах [11-13], на которые ссылается аналитик *Nanotechnology News Network* Юрий

Свидиненко в своей работе «*Инструмент отделения водорода – Фрайтаса и Меркле*», опубликованной им на сайте №1 *Nanotechnology News Network* 29 марта 2007 г. В этой статье описываются устройства, которые будут использоваться в автоматизированном «*механосинтезе*», «*молекулярных конвейерах*» и «*нанофабриках*», и указано, что чтение этих работ необходимо для ясного понимания того, что могут делать «*наномашинны*», как они будут работать и как их построить.

Обратимся вновь к полемике Дрекслера и Смоли [12]. В частности, к оценкам ожидаемых параметров «*наномеханических устройств*».

В своих работах Э. Дрекслер и его последователи оценивали параметры механических устройств, созданных с помощью технологии «*механосинтеза*», которые они могли бы иметь при приближении размера компонент к молекулярному масштабу. При этом Дрекслер вновь делает сомнительные выводы, что «*полученные оценки параметров устройств обусловлены не тем, что недооценивается важность электрических, оптических и т. д. эффектов, а тем, что механические конструкции гораздо проще и достовернее масштабируются. Осознаётся также и то, что электрические и прочие эффекты могут дать значительные дополнительные возможности*».

Произведя соответствующее масштабирование, Дрекслер получил следующие численные оценки:

- Позиционирование реагирующих молекул с точностью  $\sim 0,1$  нм.
- Механосинтез с производительностью  $\sim 10^6$  опер/сек на устройство.
- Молекулярная сборка объекта массой 1 кг за  $\sim 10^4$  сек.
- Работа наномеханического устройства с частотой  $\sim 10^9$  Гц.
- Логический затвор объёмом  $\sim 10^{-26}$  м<sup>3</sup>, с частотой переключения  $\sim 0,1$  нсек и рассеиваемым теплом  $\sim 10^{-21}$  Дж.

- Компьютеры с производительностью  $\sim 10^{16}$  опер/сек/Вт; компактные вычислительные системы на  $10^{15}$  MIPS.

Смолли подверг сомнению данные Дрекслера с соавторами о времени репликации «наномашин». Суть высказывания Смолли в том, «что одному сборщику, работающему с производительностью  $10^6$  опер/сек, потребуются миллионы лет, чтобы произвести один «моль» материала».

При всём уважении к господину Дрекслеру позволим себе также сделать несколько критических замечаний по каждому пункту его численных оценок порядков масштабирования, будучи специалистами в области метрологии (Иванников В.П. – выпускник физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.ф.м.н., д.т.н., профессор; Кабакова А.В., к.т.н., доцент, ИжГТУ им. М.Т. Калашникова).

### **1. Оценка по точности позиционирования реагирующих молекул $\sim 0,1$ нм:**

Каким же это образом может и должно осуществляться позиционирование реагирующих молекул, если  $\sim 0,1$  нм, на основании доказанных фактов в области физики кристаллов и атомной физики, представляет собой размер области пространства, занимаемой отдельно взятым атомом в кристаллической решётке (один ангстрем). Если речь о «механосинтезе», то необходимо как-то контролировать процесс позиционирования. Вопрос: с помощью чего и как можно контролировать «позиционирование молекул»? А что следует понимать под словами «реагирующих молекул» – реагирующих на что и как? Ответа нет.

### **2. Оценка производительности механосинтеза $\sim 10^6$ опер/сек**

Иными словами, механосборка «молекулярных наноустройств» должна осуществляться со скоростью  $10^6$  опер/сек. По Танигучи [12; 13] область «нанотехнологий» охватывает размеры «наночастиц» от 100 до 1 нанометра. Тогда получается, что одну «наночастицу» в поперечнике 0,1 микрона

( $1000 \times 1000 \times 1000 = 10^9$  атомов) можно будет собрать приблизительно за тысячу секунд. В оптическом микроскопе  $0,1$  микрометр является пределом разрешающей способности в области ультрафиолета. Других приборов для визуального, наиболее убедительного и очевидного непосредственного визуального контроля процесса сборки в природе, пока что, не существует.

Допустим однако, что у нас есть возможность собрать «наноробот» размером  $1 \text{ мкм}$  из отдельных атомов или молекул (размер биологической клетки в поперечнике  $\sim 1,7 \text{ мкм}$ ). Легко показать, что количество атомов в таком трёхмерном нанообъекте (размером  $1 \text{ мкм}^3$ ) представляет собой величину порядка  $10^{12}$  атомов (или молекул). Тогда время сборки из отдельных атомов или молекул такого «наноробота» со скоростью  $10^6$  опер/сек составит  $10^6$  секунд ( $\sim 2,8 \cdot 10^2 = 280$  часов). Ну не глупость ли это, с механосборкой-то, даже если бы это и было возможно и позволяло собирать живые клетки и живую ткань?

### **3. Оценка времени, затрачиваемого на молекулярную сборку объекта массой $1 \text{ кг}$ за $\sim 10^4$ сек:**

С учётом вышеизложенного, по нашим оценкам, молекулярная сборка объекта массой  $1 \text{ кг}$  может быть реализована на скорости сборки  $10^6$  опер/сек, за время  $\sim 2,8 \cdot 10^2 \times 10^{18} = 2,8 \cdot 10^{20}$  часов  $\sim 3,2 \cdot 10^{16}$  лет. И это при условии, что мы будем с такой скоростью «насыпать» молекулы в «мешок», не задаваясь вопросами «реагирования» молекул друг на друга. Немыслимо. Откуда же у Декслера взялась оценка  $\sim 10^4$  сек.

### **4. Оценка производительности «механосинтеза» устройства на частоте $\sim 10^9$ Гц:**

В своих работах Дрекслер, как указано выше, утверждает, что «механические конструкции гораздо проще и достовернее масштабируются», непонятно пока, для каких целей «масштабируются», но само утверждение

бесспорно. В частности утверждается, что *«параметры ... механических устройств, которые они могли бы иметь при приближении размера компонент к молекулярному масштабу»*, обусловлены не тем, что *«... недооценивается важность электрических, оптических и т.д. эффектов»*, а именно тем, что, *«... механические конструкции гораздо проще и достовернее масштабируются»*. И при этом также отмечается, что *«... электрические и прочие эффекты могут дать значительные дополнительные возможности»*.

И какие же это возможности? Например, указано на перспективу создания *«наноробота»* (*«наномеханического»* устройства), работающего на частотах, вплоть до  $\sim 10^9$  Гц.

В предыдущей своей статье по *«нанозлектронике»* [14] мы уже отмечали, ссылаясь на авторитетные источники, что это максимально достижимая частота побитной передачи информации в микропроцессорах и компьютерах с входа на выход устройства. У Дрекслера же речь идёт о параметрах работы *«наномеханического»* устройства, поэтому справедливо предположить, что он говорит о максимальной частоте, реализуемой в процессе сборки, и в оценке *«производительности механосинтеза»* почему-то указана скорость сборки  $10^6$  опер/сек. Но тогда, по Смолли, и это главное в его высказывании, чтобы произвести один *«моль»* материала на частотах 1 МГц, потребуются миллионы лет.

С нашей же точки зрения, здесь вновь возникает вопрос. Если Смолли – лауреат Нобелевской премии по химии 1996 года прав, то получается, что идеи Дрекслера о механическом синтезе *«молекулярных ассемблеров»*, являются ложными и серьёзное общественное восприятие идей в этой новой научной области является глубоким заблуждением, а продолжающаяся общественная поддержка исследований в области *«нанотехнологий»* является не более чем информационным шумом.



Но, тем не менее, как у нас, так и за рубежом, издаётся огромное количество результатов научных исследований (*так и хочется сказать – псевдонаучных*) о «наносинтезе», «нанороботах», «молекулярных нанотехнологиях» по направлениям, предначертанным Дрекслером и его последователями.

Результаты исследований по «нанотехнологиям» публикуются в специализированных научных журналах, среди которых самые авторитетные – «Nature Nanotechnology» (с 2006), «Nano Letters» (с 2001), «Nano Today» (с 2003).

Ведущий российский журнал по «нанотехнологиям» – «Российские нанотехнологии» (с 2006). В частности, в Википедии (так называемой свободной энциклопедии) издаются серии статей по разделам:

- история, популяризация, культура;
- организация и приложения «нанотехнологий»: наномедицина, нанотоксикология, зелёные нанотехнологии, опасности, регулирование;
- «наноматериалы»: фуллерены, углеродные нанотрубки, наночастицы;
- молекулярная самосборка: самособирающийся монослой, супрамолекулярная сборка, ДНК-нанотехнологии;
- «нанoeлектроника»: электроника на молекулярном уровне, нанолитография, закон Мура, изготовление полупроводниковых приборов, примеры полупроводниковой шкалы;
- «нанометрология»: атомно-силовая микроскопия, сканирующий туннельный микроскоп, электронный микроскоп, микроскопия сверхвысокого разрешения, нанотрибология;
- «молекулярная нанотехнология»: молекулярный ассемблер, наноробототехника, механосинтез, молекулярная инженерия.

Обратимся вновь к работам Э. Дрекслера. В письме от июля 2003 г, Дрекслер упоминает о, якобы, несоответствии фактов в предыдущих публичных заявлениях Смолли о невозможности построения наноструктур атом за атомом и заканчивает письмо заявлением: *«Я бы не поднимал вопрос так настойчиво, но вопрос о том, чего в конечном итоге могут достичь «нанотехнологии», является, пожалуй, самой фундаментальной проблемой в этой области сегодня. Именно этот вопрос формирует основные цели и ожидания, а ваши слова (имеются в виду аргументы Смолли) оказались чрезвычайно эффективными в изменении восприятия этой проблемы».*

Необходимо отметить, что вслед за Дрекслером, авторы вышеуказанных изданий утверждают: *«... класс молекулярных структур, известный как белки, можно синтезировать с использованием позиционных методов ...».*

Позволим себе здесь коротко заметить следующее. Это очень поверхностное, с научной точки зрения, суждение, на которое достаточно ответить так: *«Принципиально невозможно ни описывать проблемы «биологического синтеза», ни решать их на языке «механосинтеза», именно потому, что и науки разные и законы разные, из не пересекающихся и не поддающихся какой-либо общей систематизации научных областей».*

## **Резюме**

Говоря о «наномашинах», способных манипулировать атомами и молекулами, и «механосинтезе», почему-то молчанием обходят фундаментальные законы важнейшего раздела физики, называемого *термодинамикой* [14], несмотря на то, что именно термодинамика объясняет свойства тел и явления, происходящие в веществе, исходя из рассмотрения характера движения и взаимодействия молекул или атомов.

Термодинамический подход основывается на понятии *термодинамической системы*, которая представляет собой любое макроскопическое тело или совокупность таких тел. Состояние термодинамической системы определяется ее внутренними параметрами, например, состоянием движения микрочастиц, из которых состоит тело.

Основной величиной, определяющей состояние термодинамической системы, является внутренняя энергия, как *сумма кинетических энергий различных частиц системы и потенциальных энергий взаимодействия этих частиц*. Например, давление идеального газа объясняется бомбардировкой огромного числа молекул стенок сосуда, а зависимость его от температуры описывается, исходя из представлений о связи давления и температуры идеального газа со средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа.

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических систем, не обращаясь к микроскопическому строению тел, составляющих систему. Тепловое состояние тела, которое характеризуется температурой, тесно связано со скоростью движения атомов и молекул – *чем больше скорость их движения, тем выше температура тела*.

В случае идеального газа – газа невзаимодействующих молекул – температура будет мерой средней кинетической энергии хаотического движения частиц газа. При нагревании газа увеличивается скорость движения молекул и атомов, что приводит к увеличению внутренней энергии, а при охлаждении к уменьшению. То есть, внутренняя энергия зависит от температуры, а началом отсчета внутренней энергии считается такое состояние системы, при котором внутренняя энергия равна нулю, а она равна нулю при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273\text{K}$ ).

Физический принцип, называемый *третьим началом термодинамики*, определяет поведение энтропии при приближении температуры к абсолютному нулю. Является одним из постулатов термодинамики, принимаемым на основе обобщения значительного количества экспериментальных данных по термодинамике гальванических элементов. Теорема была сформулирована Вальтером Нернстом в 1906 году.

Современная формулировка теоремы принадлежит Макс Планку [15] и приводит к выводу о недостижимости абсолютного нуля температуры, что можно объяснить как с точки зрения термодинамики и статистической физики, так и с точки зрения квантовой механики. С учетом этого, определение абсолютного нуля выглядит следующим образом: температура, при которой энергия колебаний системы соответствует энергии нулевых колебаний.

Отсюда очевидный вывод, что атомы и молекулы неподвижны только при температуре абсолютного нуля, что окончательно ставит под сомнение возможность *«механосинтеза»* и реализации идей Дрекслера в принципе, тем более, что на практике нет никаких бесспорных достижений *«нанотехнологий»*.

Сама же идея манипулирования атомами – *«механосинтез»*, абсурдна и бессмысленна, поскольку атомы и молекулы это *«квантово-механические энергетические образования»*, а не *«шарики»*, которые рисуют энтузиасты и последователи Дрекслера в своих публикациях как доказательство возможностей реализации объектов с помощью *«нанотехнологий»*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. (дата обращения: 12.03.2023).
2. Eric K. Drexler. «Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation». John Wiley and Sons, NY, 1992.

3. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.  $7 \times 7$  Reconstruction on Si (111) Resolved in Real Space. *Phys. Rev. Lett.* 1983, vol. 50, no. 2, pp. 120–123.
4. Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy From Birth to Adolescence. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, vol. 59, pp. 615–625.
5. Mann S. Life as a nanoscale phenomenon. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008. 47, 5306–5320.
6. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V. New dimensionality classifications of nanostructures. *Physica E*, 2008, vol. 40, pp. 2521–2525. Available at: <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?Id=9adcb47a-a5ec-40e8-8d21-13f932965350>. (дата обращения: 12.03.2023).
7. Примеры компонентов нанороботов по материалам конференций: URL: <http://www.membrana.ru/lenta/?5286>. (дата обращения: 12.03.2023).
8. Материалы международных научных конференций посвященных непосредственной разработке нанороботов: URL: <http://tnn2008.conf.sfu-kras.ru/>. URL: <http://www.rtc.ru/conference/confrob20-inf.shtml>. (дата обращения: 12.10.2023).
9. Ralph C Merkle «Molecular building blocks and development strategies for molecular nanotechnology». *Nanotechnology* 11, 2000. pp. 89–99.
10. Chris Phoenix «Design of a Primitive Nanofactory», *Journal of Evolution and Technology*. 2003, vol. 13, pp. 1 – 84.
11. CRN study: «Is mechanically guided chemistry a viable basis for a manufacturing technology?». Available at: <http://www.crnano.org/study1.htm>.
12. Drexler-Smolley debate on molecular nanotechnology-Wikipedia Available at: [wikipedia.org/wiki/Drexler/Smolley\\_debate\\_on\\_molecular\\_nanotechnology](http://wikipedia.org/wiki/Drexler/Smolley_debate_on_molecular_nanotechnology).
13. Taniguchi N. On the Basic Concept of 'Nano-Technology'. *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II*, 1974, Japan Society of Precision Engineering.
14. Иванников В.П., Кабакова А.В. «Нанотехнологии» в сфере микроэлектроники и наноэлектроники. возможности и ограничения // *Управление техносферой: электрон. журнал*, 2023. Т.6. Вып.1. URL: <https://technosphere-ing.ru/> С. 66–92. (дата обращения: 12.03.2023).
15. Базаров И.П. Термодинамика: учебное пособие. М.: гос. изд. физико-математической литературы, 1961. 292 с.

Поступила в редакцию 27.06.2023

**Сведения об авторах***Иванников Валерий Павлович*

профессор каф. «Теплоэнергетика» ИНИГ УдГУ. ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», Университетская ул., 1/1. г.Ижевск, 426034.

E-mail: [ivannikov-vp@yandex.ru](mailto:ivannikov-vp@yandex.ru)

*Кабакова Анна Валерьевна*

к.т.н., доцент кафедры «Проектирования и технологической подготовки машиностроительного производства» Института современных технологий в машиностроении, автомобилестроении и металлургии «Ижевского государственного технического университета им.Калашникова». Студенческая ул. 7. г.Ижевск, 426054.

E-mail: [sunanniv@mail.ru](mailto:sunanniv@mail.ru)

**V.P. Ivannikov, A.V. Kabakova****THE KEY ROLE OF "MECHANOSYNTHESIS" AND THE PROBLEMS OF PHYSICAL EXPERIMENTATION IN "MOLECULAR NANOTECHNOLOGY"**

**Annotation.** In the previous article it was shown that the conclusion of Drexler and his followers "about the principal possibility of creating "molecular assemblers"" by means of "molecular nanotechnology", which are "molecular machines" capable of "robotically assembling molecular materials and devices by manipulating individual atoms or molecules", is, to put it mildly, insufficiently substantiated, despite the fact that these ideas are presented in the context of ideas that supposedly coincide with statements on the subject by great physicists from Newton to Feynman, who envisioned the natural possibilities of creating "eutactic nanosystems" (from the Greek eu taktikos - "orderly, properly put together"). According to Drexler, it is "mechanosynthesis" in "molecular nanotechnology" that plays a key role as a tool to compete with natural technologies of forming materials and chemical compounds by their "mechanical assembly from individual atoms". In this paper, we will show that the results of fundamental research of deep scientific content in the field of "mechanosynthesis" do not exist. The absence of such works indicates the unreasonableness and unprovenness of the above ideas of Drexler. In our opinion, the possibility of "mechanosynthesis" in "molecular nanotechnology" can be considered proven only when the first real "nanodevices" obtained by the method of "molecular assembly", rather than computer synthesized "pictures", will be demonstrated.

**Keywords:** molecular nanotechnology, mechanosynthesis, nanorobot; "molecular rotors."

*For citation:* Ivannikov V.P., Kabakova A.V. [The key role of "mechanosynthesis" and the problems of physical experimentation in "molecular nanotechnology"] // Upravlenie tekhnosferoi, 2023, vol. 6, issue 4. (In Russ.) Available at: <https://technosphere-ing.ru/> pp.586–601. DOI: 10.34828/UdSU.2023.85.48.009.

## REFERENCES

1. Vikipedija. Svobodnaja jenciklopedija [Wikipedia. Free encyclopedia]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
2. Drexler K. Eric. «Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation». John Wiley and Sons, NY, 1992.
3. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.  $7\times 7$  Reconstruction on Si (111) Resolved in Real Space. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, vol. 50, no. 2, pp. 120–123.
4. Binnig G., Rohrer H. Scanning Tunneling Microscopy Ð From Birth to Adolescence. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, vol. 59. pp. 615–625.
5. Mann S. Life as a nanoscale phenomenon. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, 47, 5306–5320.
6. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V. New dimensionality classifications of nanostructures. *Physica E*, 2008, vol. 40, pp. 2521–2525. Available at: <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?Id=9adcb47a-a5ec-40e8-8d21-13f932965350>. (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
7. *Primery komponentov nanorobotov po materialam konferencij* [Examples of nanorobot components based on conference materials]. Available at: <http://www.membrana.ru/lenta/?5286>. (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
8. *Materialy mezhdunarodnyh nauchnyh konferencij posvjashhennyh neposredstvennoj razrabotke nanorobotov* [Materials of international scientific conferences dedicated to the direct development of nanorobots]: Available at: <http://tnn2008.conf.sfu-kras.ru/>. (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
9. Ralph C. Merkle. «Molecular building blocks and development strategies for molecular nanotechnology». *Nanotechnology* 11, 2000. pp. 89–99.
10. Chris Phoenix. «Design of a Primitive Nanofactory». *Journal of Evolution and Technology*, Vol. 13. October 2003.
11. CRN study: «Is mechanically guided chemistry a viable basis for a manufacturing technology?». Available at: <http://www.crnano.org/study1.htm>. (accessed: 12.03.2023).
12. Drexler-Smolley debate on molecular nanotechnology-Wikipedia Available at: [wikipedia.org/wiki/Drexler/Smolley\\_debate\\_on\\_molecular\\_nanotechnology](http://wikipedia.org/wiki/Drexler/Smolley_debate_on_molecular_nanotechnology). (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).

13. Taniguchi N. «On the Basic Concept of 'Nano-Technology»». Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, 1974, Japan Society of Precision Engineering.
14. Ivannikov V.P., Kabakova A.V. [«Nanotechnologies» in the field of microelectronics and nanoelectronics. possibilities and limitations]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2023, vol. 6, issue 1. Available at: <https://technosphere-ing.ru> pp. 66–92. (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
15. Bazarov I.P. *Termodinamika (uchebnoe posobie)* [Thermodynamics (textbook)]. State ed. physical and mathematical literature. Moscow, 1961, 292 p. (In Russ.).

Received 27.06.2023

### ***About the Authors***

#### *Ivannikov Valery Pavlovich*

Doctor of Science, Professor department «Heat power engineering» IOaG Federal state budget higher professional educational institution «Udmurt State University». Universitetskaya str., 1/1. Izhevsk, Republic of Udmurtia, 426034.  
E-mail: Ivannikov-vp@yandex.ru

#### *Kabakova Anna Valerievna*

Ph.D., Associate Professor of the department of «Designing and Technological Preparation of Machine-Building Production» of the Institute of Modern Technologies in Mechanical and Automotive Engineering and Metallurgy, Kalashnikov State Technical University. 7 Studencheskaya str., Izhevsk, Republic of Udmurtia, 426054.  
E-mail: sunanniv@mail.ru