

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ НАНОРОБОТОВ

Abstract. The paper is devoted to investigating the basic principles of designing and constructing medical nanorobots. The approaches for realization of designing medical nanorobots on base the automated systems are discussed. Technical requirements for medical nanorobots hardware are listed.

Key words: nanoelectronic structure, medical nanorobot, nanosensor, biorobot, molecular machine, nanotechnologies, bionanotechnologies, technical requests.

Аноація. Стаття присвячена дослідженню основних принципів проектування та виготовлення медичних нанороботів. Розглянуті підходи до реалізації проектування медичних нанороботів за допомогою автоматизованих систем. Приведені технічні вимоги до елементної бази медичних нанороботів.

Ключові слова: наноелектронна структура, медичний наноробот, наносенсор, біоробот, молекулярна машина, нанотехнології, біотехнології, технічні вимоги.

Аннотація. Статья посвящена исследованию основных принципов проектирования и изготовления медицинских нанороботов. Рассмотрены подходы к реализации проектирования медицинских нанороботов с помощью автоматизированных систем. Приведены технические требования к элементной базе медицинских нанороботов.

Ключевые слова: наноэлектронная структура, медицинский наноробот, наносенсор, биоробот, молекулярная машина, нанотехнологии, биотехнологии, технические требования.

1. Введение

В связи с развитием научных исследований по нанороботам являются актуальными исследования и эксперименты по их поведению в живом организме. Инструментарием и эффективными методами для таких целей служат автоматизированные системы проектирования. С их помощью решаются такие вопросы конкретного проектирования нанообъектов, как зондирование, силовые связи между молекулами, навигация, инструментарий для манипуляций, двигательный аппарат, молекулярные моторы. Дальнейшее развитие рассматриваемых методов проектирования позволит во многом решить задачу создания бортового компьютера, предназначенного для реализации основного назначения медицинских нанороботов – диагностики и лечения различных систем организма человека.

Данная статья является логическим продолжением работы [1], в которой были описаны принципы моделирования медицинских нанороботов. В настоящей статье рассмотрены подходы к реализации проектирования медицинских нанороботов с помощью автоматизированных систем.

Постановка задачи. На основе анализа исследований по моделированию работы медицинских нанороботов и экспериментов в области построения наноустройств необходимо определить этапы получения прототипов нанороботов с помощью систем проектирования на базе автоматизированных систем. Также важной задачей является определение возможности использования сенсорных систем для работы в составе нанороботов.

2. Моделирование технологических процессов построения и функционирования нанороботов

2.1. Возможности применения платформы NCD (Nanorobot Control Design)

В настоящее время, когда разработка и производство медицинских нанороботов находятся в начале пути, актуальными являются разработка средств и инструментов, способных реализовать

принципы и технологии их построения. Так, в работе [2] была представлена разработка программы, получившая название NCD (Nanorobot Control Design), которая может применяться для изучения поведения виртуальных нанороботов, их взаимодействия с виртуальными биомолекулами в виртуальных же артериях. На практике подобные системы 3D моделирования весьма успешно применялись при разработке полупроводниковых наноструктур. Хотя в наше время приставка "нано-" в отношении полупроводников становится явным излишеством, поскольку наиболее ходовыми есть процессы с технологическими нормами: 65 нм и 45 нм.

Предложенный программный пакет NCD представляет собой систему тестирования трёхмерных прототипов медицинских нанороботов – механотронический симулятор наноуровня (nanomechatronics), благодаря которому обрабатывается численная информация о физике процесса моделирования нанороботов. Механотроника (mechatronics) как отрасль возникла на стыке механики и электроники, т.е. это своеобразное объединение механического устройства с миникомпьютером.

На практике платформа NCD позволяет визуально представить те процессы, которые происходят с нанороботом внутри человеческого тела. Правильная постановка задачи, как известно, половина дела. Благодаря использованию платформы NCD представляется возможность значительно ускорить процесс разработки и практического внедрения медицинских нанороботов. И на этом этапе как раз обнаруживаются все вышеперечисленные сложности. Например, упомянутая выше работа наноробота в кровеносном сосуде. Здесь ему приходится перемещаться в достаточно вязкой артериальной среде, где нанороботы постоянно "натываются" на белки и самые непредсказуемые частицы, перемещаемые общим током крови в "трубках" диаметром порядка 40 мкм. Словом, моделирование поведения наноробота в такой среде – задача довольно сложная.

Практическая демонстрация программного пакета NCD в режиме реального времени позволяет, к примеру, моделировать поведение наноробота, перед которым поставлена задача поиска белков в динамичной виртуальной среде с последующей идентификацией и переносом этих белков к специфическому "пункту выдачи лекарства". Интересно отметить, что даже на этом этапе разработки имеется возможность задать несколько стратегий "поведения" наноробота и изучить каждую из них на предмет лучшей эффективности. Так, для выполнения задачи нанороботы могут использовать совершенно разные комплекты химических и температурных датчиков, а также разные траектории движения.

Для демонстрации возможностей системы можно смоделировать несколько различных начальных условий тестирования, где нанороботы задействованы в нескольких различных способах идентификации белков в кровеносных сосудах с изменяющимся по ходу эксперимента диаметром. Виртуальные эксперименты уже подтвердили такие прогнозы, как, например, лучшие результаты работы нанороботов при поиске цели в более узких сосудах; высокую степень эффективности поисков при использовании химических и термических биосенсоров в сочетании с хаотической (блуждающей) моделью передвижения.

Наряду с процессами поиска и идентификации, система виртуального моделирования позволяет успешно использовать ряд интерактивных инструментов для разработки нанороботов, таких, как методики контроля и управления нанороботом, общая концепция производства, дизайн

силового привода (двигателя) и многое другое. Поскольку для разных элементов человеческого организма требуется разработка соответствующих специфических нанороботов, учёным приходится эмулировать самые разные процессы. В настоящее время с помощью системы NCD проведены виртуальные исследования нанороботов для лапароскопической хирургии (предоперационные исследования брюшной полости оптическими приборами), диабета, раковых заболеваний, аневризмы мозга, кардиологии, биозащиты от боевых отравляющих веществ и систем доставки лекарственных форм непосредственно к участку их активного действия. На данном этапе исследований также изучаются побочные эффекты, возникающие при применении химиотерапии для лечения болезни Альцгеймера.

В разработке столь сложной виртуальной системы для моделирования поведения биологических нанороботов удалось добиться реальных результатов лишь благодаря взаимодействию специалистов в самых разных областях наук и технологий. Наряду с химиками, электронщиками, программистами, физиками, механиками, специалистами по фотонике и разработке новых материалов, к работе были привлечены лучшие фармацевты и медики. На следующих этапах также предполагается привлечение к работам специалистов по геномике – отрасли молекулярной генетики, изучающей геномы.

С точки зрения коммерциализации и последующего извлечения прибыли из системы трёхмерного моделирования поведения медицинских био- и нанороботов, на этот счёт разработчики системы 3D проектирования нанороботов совершенно спокойны и уверены в успехе. Такая уверенность основывается на том, что необходимость получения указанных моделей для медицинских и фармацевтических предприятий весьма актуальна.

Необходимо отметить, что действительно применение такой платформы NCD позволяет сегодня разрабатывать виртуальные нанороботы, а завтра это уже реальные нанообъекты, поскольку значительный ряд компонентов для нанороботов будущего реализован на практике уже сейчас. Это биосенсоры, варианты нанодвигателей, антенн, и всё это уже применяется в ряде специфических наноустройств.

Следующим шагом как раз должна стать интеграция всех этих разрозненных компонентов в единое целое с названием "медицинский наноробот". Начало массового производства "интегрированных наноэлектронных молекулярных машин", то есть медицинских нанороботов, по мнению разработчиков системы NCD, наступит до 2015 года. Столь длительный период понадобится не столько на собственно разработку технологии производства, сколько на тестирование совместимости и безопасности таких устройств. Ведь запускать их придётся не куда-нибудь, а непосредственно в тело человека.

2.2. Реализация этапов создания визуальных трехмерных образов движения и работы медицинских нанороботов

В [3] представлены возможности моделирования перемещения нанороботов внутри человеческого тела путем создания их трехмерных образов. При этом нанороботы учатся избегать препятствий в виде органических макромолекул и находить цель – больную клетку. В ходе работы программы, являющейся развитием программного пакета NCD из [2], исследователи строят оптимальные

алгоритмы навигации наноустройств в таком сложном окружении, как кровеносный сосуд человека или ткань. Программа может создавать визуальные трехмерные образы при движении и работе наноустройств.

Разработчики ставят своей целью существенно оптимизировать программное обеспечение для увеличения ресурса симулятора программы, чтобы получить большее быстродействие при выполнении расчетов, применяя такие вычислительные технологии, как параллельные вычисления, объектно-ориентированное программирование. Также в процессе построения модели можно выбирать ее сложность, что позволяет просчитывать более простые модели в общем и рассматривать частные случаи на более сложных симуляциях. Такие оптимизирующие подходы позволяют быстро создавать новый расчетный проект для моделирования, исходя из требований к наноустройствам, которые варьируются в зависимости от их применения в биомедицинской инженерии.

Но уже сейчас можно сказать, что программа оптимально подходит для проектирования систем управления наноробототехникой в медицине и биотехнологии [4]. Известный ученый в области наномедицины Роберт Фрайтас был первым, кто оценил возможности будущего программного обеспечения и помог на первых этапах его разработки.

2.3. Особенности алгоритма проникновения нанороботов в клетку для ее «ремонта»

Наноробототехника может использоваться для манипулирования отдельными клетками и их «починки». В общем, мы можем разделить медицинскую наноробототехнику на два класса: первый класс проводит микрохирургические операции с клетками, второй – обеспечивает мониторинг тела пациента.

Для нанотехники, относящейся к первому классу, самым лучшим подходом для проведения операций с клетками было бы проникновение внутрь клетки. Управление наноустройствами на расстоянии позволит свести нежелательное хирургическое вмешательство к минимуму.

В хирургии считается, что все операции должны проводиться с минимальным медицинским вмешательством. Поэтому для операций на головном мозге человека дистанционно управляемые медицинские нанороботы были бы наилучшим решением. Для случаев, когда необходимо получить полную информацию о состоянии больного, наноробототехника второго класса будет оснащена рядом триггеров, которые меняют свое состояние в зависимости от окружающей среды. В этом случае диагностические нанороботы должны тесно взаимодействовать со средой внутри человеческого тела.

Наноробототехника будет оснащена рядом приводов, управляющих элементов, сенсоров, наноманипуляторов, разработанных и изготовленных в соответствии с теми функциями, которые они будут выполнять в процессе медицинского вмешательства. Многие элементы наномашин уже создаются в научно-исследовательских лабораториях по всему миру. Поэтому остро встает вопрос о моделировании управления наноробототехники, работающей в таком сложном окружении, как человеческое тело.

2.4. Выбор метода передвижения нанороботов

В настоящее время исследуются новые конструкции актюаторов для наноробототехники. Недавно были проведены исследования характеристик жгутикового мотора [4]. Когда идет речь о

наноробототехнике, работающей и передвигающейся внутри человеческого тела, то для обеспечения ее передвижения необходимо решить ряд проблем. Это и обратная связь в реальном времени, и обработка данных, необходимых для управления актюаторами, и навигация. Поэтому то, чем наноробот будет передвигаться, пропеллером или жгутиком, составляет второстепенную проблему. Основные проблемы передвижения – управление и навигация.

Для этого в симуляторе присутствуют основные физические характеристики окружения. Система также моделирует динамику нанотехники, исходя из основных физических законов. Более того, программа имеет модульную объектно-ориентированную архитектуру. Так, если необходимо учесть дополнительные факторы окружающей среды (вязкость, например), то можно добавить отсутствующие физические законы и константы только в этой модели. Полная версия симулятора должна будет учитывать физику микро- и наномира, поэтому моделирование будет максимально точным. Такие особенности микро- и наномира, как вязкость, броуновское движение молекул и частиц, механика жидкостей, уже включены в стандартную физику симулятора.

2.5. Выбор траектории для передвижения нанороботов при наличии модельных препятствий

В тестовых версиях программы [4] препятствия генерируются случайным образом и занимают случайные позиции в окружающем пространстве. Для того, чтобы как можно более глубоко исследовать наноробототехнику в динамике, препятствия передвигаются внутри окружающей среды. Время для расчета такой системы возрастает по мере того, как увеличивается количество передвигающихся препятствий. Необходимы исследования, направленные на увеличение быстродействия расчета системы с «плавающей органикой».

Очень важным направлением в исследовании проблем навигации нанороботов является создание алгоритмов коллективной работы нескольких нанороботов в присутствии препятствий. Программа будет полезна не только специалистам в области наномедицины, но и другим ученым, которые работают над алгоритмами управления передвижениями средств микроробототехники.

2.6. Значение объединения достижений биотехнологий и нанотехнологий для более эффективного продвижения разработок био- и нанороботов

Благодаря достижениям в нанотехнологиях и генетике, а также биомолекулярному моделированию, можно ожидать появления «биологических нанороботов», которые найдут применение в биотехнологии и медицине в ближайшее время.

Электронные цифровые цепи *in vivo*, например, уже были продемонстрированы [5]. Более того, можно будет использовать бионанороботов для клеточной хирургии (как это описано в [6]). Более сложные нанороботы, изготовленные из алмазоида, не могут быть построены без автоматизированного механосинтеза [7]. В связи с указанными выше ограничениями первыми наномедицинскими устройствами будут бионанороботы, может даже, и на основе амёб или других микроорганизмов. Скорее всего, первыми бионанороботами будут бактерии [8].

Основные условия для развития нанотехнологий и биотехнологий: соответствующее финансирование и подготовка соответствующего персонала. Разработчики платформы NCD считают, что более опережающими темпами идет развитие биотехнологий.

Однако использование одних и тех же методов и инструментария как в нано-, так и биотехнологиях, позволяет говорить об этих технологиях как обладающих общей методологией и направлением работ.

Такой подход основывается на том, что все возрастающие возможности нанотехнологического инструментария используются в биотехнологиях, и, наоборот, бионический подход в исследованиях биосистем во многом помогает продвигать разработки в наноробототехнике [9].

Такие работы поддерживает не только государство, но и частные компании. Поэтому можно с уверенностью говорить, что первые рабочие биологические нанороботы появятся уже через несколько лет [10]. Достаточно скоро ожидается появление нанороботов из алмазодных материалов, а первые результаты в области наномедицины появятся уже очень скоро [11, 12].

3. Проектирование элементной базы для создания медицинских нанороботов

3.1. Исходные требования к компонентам нанороботов

При определении исходных требований к компонентам нанороботов необходимо иметь достаточно четкое представление о том, какие подсистемы должен иметь наноробот. Поскольку основная функция медицинского наноробота – передвижение по кровеносным сосудам, то он должен иметь мощную навигационную систему. Устройству необходимы несколько типов различных сенсоров для мониторинга окружающей среды, навигации, коммуникации и работы с отдельными молекулами. При этом наноробот должен обладать мощной транспортной системой, доставляющей отдельные атомы и молекулы лекарственных средств от хранилищ к наноманипуляторам и обратно [13].

Для работы с пораженными структурами устройство оборудуется набором телескопических наноманипуляторов разного применения [14]. Материал, из которого будет изготовлен наноробот – алмазод или сапфирид. Это обеспечит биосовместимость человека и большого количества наномашин.

Также необходимо наличие приемопередаточных устройств, позволяющих нанороботам связываться друг с другом. И, наконец, для удержания крупных объектов необходимы телескопические захваты.

В техническом задании на построение медицинского наноробота необходимо предусмотреть способность ремонта поврежденных клеток (как это делают вирусные структуры при вводе своей управляющей программы в виде вирусной ДНК в клетку), что даст возможность производить лечение, например, раковых заболеваний. Также необходимо предусмотреть постановку задачи для нанороботов по картографированию кровеносных сосудов, проведению анализа ДНК с последующей ее корректировкой, уничтожению бактерий и вирусов. Естественно, что при испытании нанороботов появятся другие важные практические задачи [13].

В соответствии с [1], максимальный размер устройства не должен превышать $1 \times 1 \times 3$ микрона (без двигательных жгутиков). Ниже представлен вид наноробота, выполненного из алмаза (рис. 1).

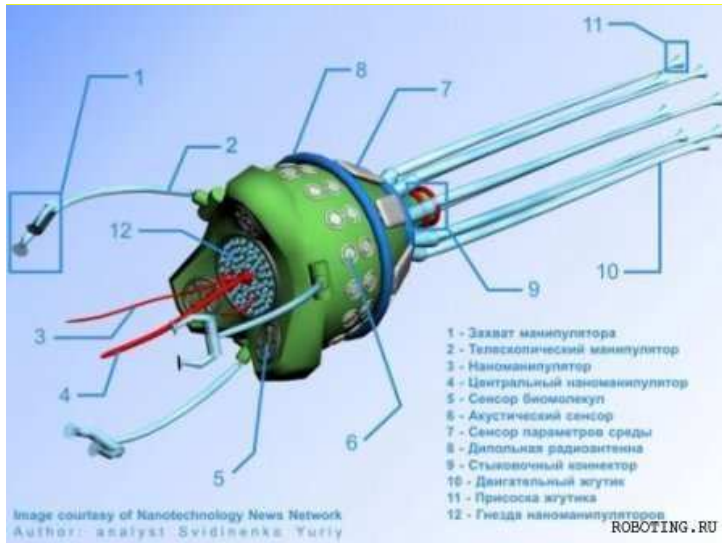


Рис. 1. Медицинский наноробот общего применения из алмаза [13]

Электромагнитные волны, которые смогут распространяться в теле человека не затухая, будут по длине волны сравнимы с нанороботом. Поэтому приемопередающие антенны будут иметь вид диполей, выступающих за пределы корпуса. Наноманипуляторы, механические захваты и жгутики должны быть телескопическими и при необходимости складываться в корпус робота для того, чтобы робот смог лучше передвигаться в кровеносном русле.

Иммунная система в основном реагирует на «чужеродные» поверхности. Размер наноробота играет важную роль при этом так же, как и мобильность устройства, шероховатость поверхности и ее подвижность. Ряд проделанных экспериментов подтвердили, что гладкие алмазоидные структуры вызывают меньшую активность лейкоцитов и меньше адсорбируют фибриноген. Поэтому стоит надеяться, что такое алмазоидное покрытие («организованное», т.е. нанесенное атом за атомом, с нанометровой гладкостью) будет иметь очень низкую биологическую активность.

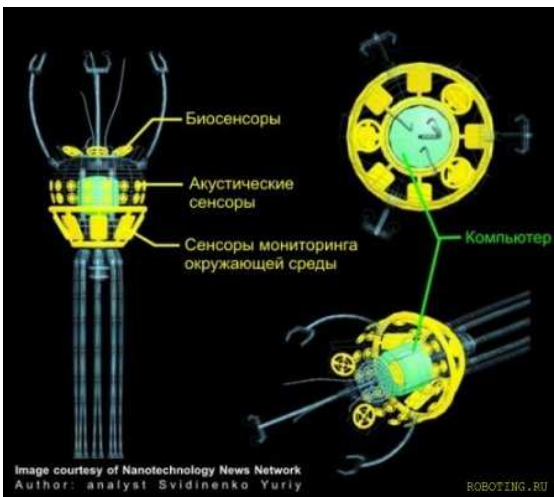


Рис. 2. Сенсорная и обрабатывающая подсистема наноробота [13]

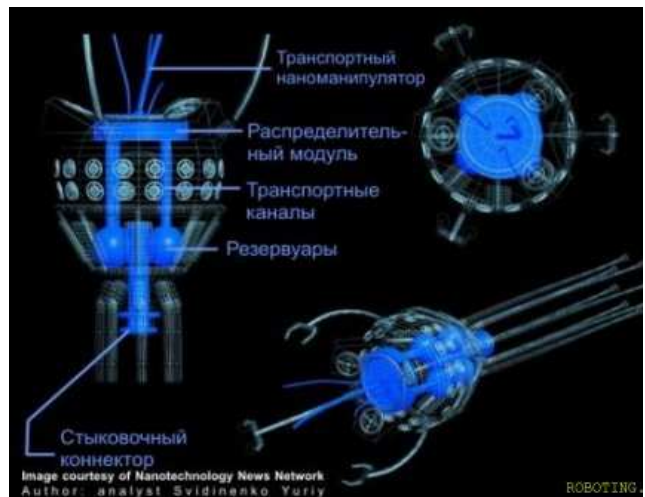


Рис. 3. Транспортная подсистема наноробота [13]

Для работы с внутриклеточными структурами нанороботу вовсе не обязательно целиком проникать внутрь клетки (можно повредить внутриклеточный цитоскелет). Зато телескопические наноманипуляторы предотвратят повреждение органелл и цитоскелета.

Для связи нанороботов друг с другом, а также для формирования навигационной системы полезно использовать еще один тип нанороботов – коммунноцитов [1], которые будут работать в виде усилительных станций.

Теперь специалисты работают над уменьшением наноробота – микротранспорта для диагностических приборов [15]. На рис. 2 и 3 показаны примеры комплектования нанороботов с минимальными требованиями к сенсорным и транспортным подсистемам.

3.2. Проектирование манипуляторных систем для нанороботов

Большинство нанороботов должны манипулировать различными объектами: от атомов до живых клеток. У макроскопических машин для подобных задач есть целый набор рабочих манипуляторов типа «рука робота». Естественно, что основная задача нанороботов – это манипулирование отдельными атомами и молекулами. Поэтому манипулятор должен будет обеспечивать позиционирование перемещаемых объектов с атомарной точностью. Детальных разработок подобного устройства пока нет. Вероятно, что это будет макромолекула с набором различных свободных радикалов в так называемом «держателе инструментов». Для нанороботов, работающих в теле человека, «держатель инструмента» должен иметь набор антигенов для успешного присоединения различных органических макромолекул (ДНК, РНК, АТФ и др.).

Если наномедицинские роботы манипулируют макромолекулами, для которых часто не нужна высокая точность позиционирования, то ассемблеры будут манипулировать отдельными атомами. Точность позиционирования должна быть достаточной для образования между атомами различных химических связей. Этого можно добиться, используя так называемый «гибкий инструмент», присоединяющий к себе необходимый атом одной химической связью. После присоединения атома на нужное место с помощью более сильной связи указанный инструмент способен автоматически перейти в исходное положение [13] (рис. 4).

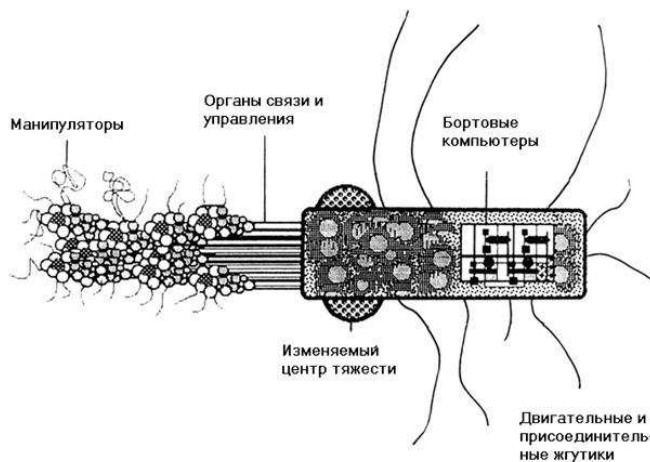


Рис. 4. Медицинский наноробот с набором молекулярных наноманипуляторов

Столь гибкое функционирование наноманипулятора подразумевает высокую степень свободы. Из устройств с высокой степенью свободы и высокой жесткостью на сегодняшний день известна платформа Стюарта [1].

Платформа Стюарта состоит из шести выдвигающихся стержней-опор, гибко присоединенных к базе и держателю инструмента. В ходе работы длина стержней изменяется, соответственно изменяется положение держателя инструмента. Степень

свободы платформы равна шести. К примеру, степень свободы человеческой руки равна двадцати семи. Но и шести степеней свободы будет достаточно для выполнения задач, стоящих перед

наноманипулятором ассемблера. У платформы Стюарта один недостаток – низкая жесткость. Для повышения жесткости и прочности была разработана система из двух треног, названная «двойной трипод» [1]. Конструкция каждой треноги состоит из одного главного и двух несущих стержней. Их функция – изменение положения части верхнего шарнирного соединения, в котором размещается инструмент. Вся конструкция в целом имеет большую жесткость, чем платформа Стюарта. Поэтому целесообразней использовать именно ее в качестве «скелета» для будущего манипулятора.

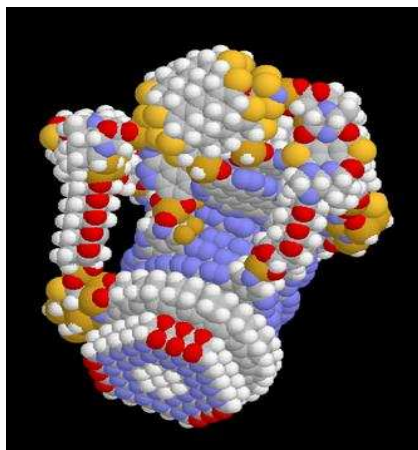


Рис. 5. Наноманипулятор:
пространственный вид

На ее основе был спроектирован наноманипулятор без приводных элементов. К нему можно будет присоединять различные радикалы для удержания необходимых атомов. Посредством вращения боковых платформ можно добиться плавного перемещения в пространстве держателя инструмента (рис. 5).

Устройство состоит из 2596 атомов (что гораздо меньше, чем в платформе Стюарта). В конструкции задействованы атомы азота, углерода, кремния, кислорода и водорода. Создание подобного устройства возможно только методами механохимии, которые надо разработать [13].

Подобные манипуляторы будут управляться нанокomпьютерами (либо макрокомпьютерами) и предоставят возможность манипулировать отдельными атомами.

4. Выводы

1. В статье представлены примеры проектирования процессов перемещения нанороботов внутри человеческого тела посредством создания их трехмерных образов. Нанороботы учатся избегать препятствий в виде органических макромолекул и находить цель в виде больной клетки. Программы позволяют исследователям строить оптимальные алгоритмы навигации наноустройств в таком сложном окружении, как кровеносный сосуд человека.

2. В процессе построения моделей можно выбирать ее сложность, что позволяет просчитывать более простые модели и рассматривать частные случаи на более сложных симуляциях. Такие оптимизирующие подходы позволяют быстро создавать новый расчетный проект для моделирования, исходя из требований к наноустройствам, которые варьируются в зависимости от их применения в биомедицинской инженерии.

3. Нанотехнологи рассматривают вопрос создания таких нанороботов, которые будут находить в организме поврежденные клетки и аккуратно их «чинить». Хотя для замены поврежденных и погибших клеток в организме есть переоткрытые недавно стволовые клетки, нанороботы будут трудиться в каждом человеческом организме и выполнять свои функции не хуже, чем делают биотехнологи с помощью живых «инструментов». Это подтверждается и созданием большинства нанодеталей, которые получены в различных лабораториях из ДНК и других биологических молекул с привлечением нанотехнологий.

4. Нанотехнологии смогут расширить естественные человеческие возможности. Сочетание возможностей органического биокомпьютера (мозга) будет значительно дополнено электронным, но с меньшими размерами. В человеческом мозге информация передается с помощью заряженных ионов в жидком растворе. Подвижность ионов в водном растворе составляет 10^{-3} см²/В с. Подвижность электронов в кремниевых носителях составляет 10^3 см²/В с. Механическая или электронная наноробототехника будет, в первую очередь, быстродействующей.

5. Для борьбы с болезнями будут использоваться специфические наноробототехнические системы, содержащие геноинженерные вакцины и сложные молекулы, в том числе те же антитела, которые уже сейчас синтезируют трансгенные растения и животные, а, возможно, и рибозимы, изучение которых только начинается.

6. Для доставки лекарственных веществ в нужное место, к клеткам опухоли или к определенной ткани будут использоваться бионанороботы в виде антител или искусственных вирусов. Создание программ для мирных вирусов – это только вопрос времени.

Благодарность. Авторы благодарны Ю. Свидиненко за большую работу по созданию и поддержке сайта в области нанотехнологий с адресом: www.nanonewsnet.ru. Информация сайта во многом способствует проведению исследований по различным направлениям нанотехнологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтович И.Д. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов. Ч.1 / И.Д. Войтович, А.И. Золот, Н.И. Ходаковский // Математичні машини і системи. – 2009. – № 4. – С. 147 – 160.
2. <http://www.nanorobotdesign.com/papers/nanorobotTutorial.pdf>.
3. Nanorobot architecture for medical target identification / Cavalcanti A. et al. // Nanotechnology. – 2004. – N 2. – P. 145 – 151.
4. www.nanorobotdesign.com.
5. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / Суздалев И.П. – М.: Комкнига, 2006. – 592 с.
6. www.nanomedicine.com/NMI/9.4.7.htm.
7. www.foresight.org/stage2/mechsynthbib.html.
8. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века / В.Е. Борисенко // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 5. – С. 100 – 104.
9. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / Рыбалкина М. – М.: Техносфера, 2005. – 444 с.
10. www.nanoworld.org / Наномир сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии.
11. Nanotechnology gateway to everything nanotech – портал нанотехнологических новостей. – Режим доступа: www.nanotech-now.com.
12. <http://www.nanobot.ru/>.
13. Свидиненко Ю.Г. Нанороботы: взгляд изнутри. – Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru>.
14. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров / Под ред. И.В. Яминского. – М.: Научный мир, 1997. – 391 с.
15. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007/meditsinskii-nanorobot-obshchego-primeneniya>.

Стаття надійшла до редакції 06.11.2009.