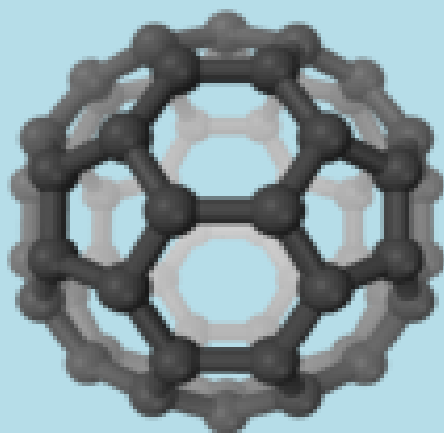


**МОСКОВСКИЙ ГОРОДСКОЙ ДВОРЕЦ
ДЕТСКОГО (ЮНОШЕСКОГО) ТВОРЧЕСТВА
ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ГООУ ЛИЦЕЙ №1525 «ВОРОБЬЁВЫ ГОРЫ»**



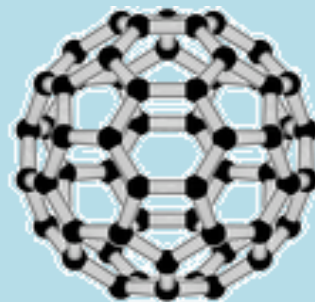
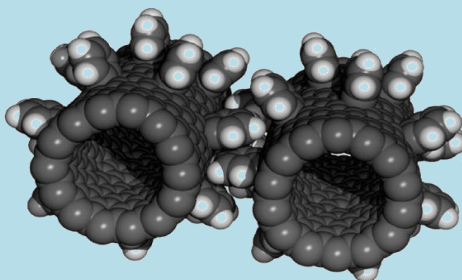
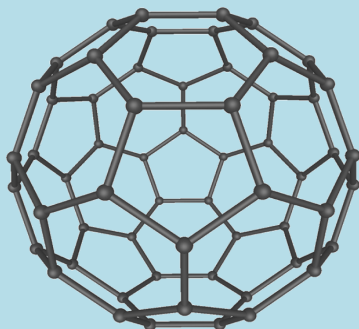
Участие в информационной и образовательной поддержке приоритетных национальных проектов

Реализация образовательной программы «Живому – жить!» (4) и «Земля. Человечество. Знание» (10 и 11)

ПОПУЛЯРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В МИР НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ В НАШИ ДНИ, В БЛИЖАЙШЕМ
И ДАЛЁКОМ БУДУЩЕМ НА СТЫКЕ ХИМИИ,
ФИЗИКИ, ТЕХНИКИ, БИОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ
И ИНЖЕНЕРНОЙ ЭКОЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие для педагогов и учащихся групп дополнительного образования эколого-биологической и естественнонаучной направленности, а также для лицейстов биолого-химических профильных классов, для учителей биологии, химии, физики, экологии, технологии, ОБЖ и преподавателей спецкурсов по основам медицинских знаний



**МОСКВА
2007**

ПОПУЛЯРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В МИР НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ, БИОЛОГИЧЕСКИЕ,
МЕДИЦИНСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ,
ИНЖЕНЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ**

Руководитель проекта

Эгнаташвили Т.Д. – заведующая Центром экологического образования МГДД(Ю)Т, Заслуженный работник культуры РФ, Отличник народного просвещения РФ, член-корреспондент Российской академии естественных наук (РАЕН), методист профильных классов биолого-химического направления ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

Координатор проекта

Буянов В.Э. – заведующий информационно-методическим кабинетом ЦЭО МГДД(Ю)Т; педагог дополнительного образования, руководитель учебных групп «Вечерняя биолого-химическая школа», «Физиология и медицина»; учитель технологии, ОБЖ и изобразительного искусства, преподаватель спецкурса по основам медицинских знаний в классах биолого-химического профиля Лицея.

Рабочая группа проекта

Бреев А.В. – зав. сектором биохимии ЦЭО МГДД(Ю)Т, член-корреспондент Российской академии естественных наук (РАЕН), специалист по неорганическому и органическому синтезу, педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Общая химия», «Неорганический синтез»; учитель химии в классах биолого-химического профиля Лицея.

Михальцова И.С. – председатель методического объединения учителей химии ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы»; учитель химии, экологии, технологии и ОБЖ в классах биолого-химического профиля Лицея; химик-технолог; педагог дополнительного образования ЦЭО, рук. ГДО «Химия и жизнь».

Каспаринская А.Ю. – председатель методического объединения учителей биологии ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы»; учитель биологии и экологии в классах биолого-химического профиля Лицея; биохимик; педагог дополнительного образования ЦЭО, рук. ГДО «Современная биология».

Калабухова Э.Ю. – учитель физики, химии, астрономии и ОБЖ ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы»; химик-технолог.

Смородинова В.А. – учитель физики и астрономии ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы», преподаватель спецкурса по биофизике и инженерной биологии в классах биолого-химического профиля, инженер-технолог.

Пивоварова И.А. – кандидат биологических наук, специалист по агрохимии и физиологии растений, заведующая сектором растениеводства ЦЭО МГДД(Ю)Т, педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Экология растений».

Шевяхова Л.В. – заместитель заведующей Центра экологического образования МГДД(Ю)Т, педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Человек и биосфера», учитель биологии ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

Шуватова Е.Г. – заведующая химической лабораторией сектора биохимии ЦЭО МГДД(Ю)Т, педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Юные химики» и «Занимательная химия»; химик-технолог.

Синюшин А.А. – заведующий кабинетом ЦЭО МГДД(Ю)Т, педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Генетика и селекция растений»; аспирант, сотрудник лаборатории генетики биологического факультета МГУ; руководитель группы учебно-исследовательских работ лицеистов по генетике, молекулярной биологии, биохимии, физиологии и экологии растений.

Герасимова И.Г. – учитель английского языка в классах биолого-химического профиля ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы»; специалист по научному и техническому переводу.

Сергеев В.М. – учитель математики, преподаватель спецкурса по статистке, комбинаторике и теории вероятностей в классах биолого-химического профиля Лицея; педагог дополнительного образования ЦЭО МГДД(Ю)Т, рук. ГДО «Математка в экологии».

Коханов А.А. – зав. лабораторией астрофизики отдела астрономии, авиации и космонавтики МГДД(Ю)Т; учитель информационных технологий ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

Научные консультанты проекта

Бобров А.В. – доктор биологических наук, профессор МГУ; зав. лабораторией физиологии и экспериментальной ботаники ЦЭО МГДД(Ю)Т; учитель биологии и экономической географии в классах биолого-химического профиля Лицея.

Медведев Ю.Н. – кандидат химических наук, доцент, заместитель декана химического факультета Московского государственного педагогического университета; учитель химии ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

Колосков А.В. – кандидат педагогических наук, магистр экологии и природопользования, член-корреспондент Международной академии наук педагогического образования (МАНПО), член Методического совета Московского городского Дворца детского (юношеского) творчества; педагог дополнительного образования, рук. ГДО «Природа под микроскопом» и «Актуальная экология»; учитель биологии и экологии в классах биолого-химического профиля ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

Кротов И.В. – зав. информационно-методическим кабинетом отдела технического творчества МГДД(Ю)Т; преподаватель спецкурсов по техническому конструированию, учитель технологии и ОБЖ в Лицее; инженер-авиаконструктор.

Пшеничнер А.Б. – педагог-психолог Центра экологического образования МГДД(Ю)Т, специалист по профессиональной ориентации учащихся групп дополнительного образования эколого-биологической и естественнонаучной направленности; педагог дополнительного образования ЦЭО, рук. ГДО «Психологи-исследователи»; преподаватель спецкурса по психологии, основам выбора профессии и стратегии профессионального роста в классах биолого-химического профиля ГОУ лицея №1525 «Воробьёвы горы».

**ПРИГЛАШАЕМ ВСЕХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
И УЧАЩИХСЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ
ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В РЕАЛИЗАЦИИ ДАННОГО ПРОЕКТА!**

XXI ВЕК – НАЧАЛО ЭПОХИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Развитие научно-теоретической базы и материально-технического потенциала наноиндустрии – один из приоритетных национальных проектов в современной России

Что же такое нанотехнологии?

Начнём издалека. В мире рептилий есть удивительные создания – гекконы. Они хорошо знакомы нашим герпетологам. Гекконы не только легко взбираются по отвесным стенам, они с такой же эффективностью ходят по потолку или передвигаются по оконному стеклу террариума. Долгое время ученые никак не могли понять, каким же образом геккон может бегать по совершенно гладкому вертикальному стеклу, не падая и не соскальзывая. Сначала ученые полагали, что весь секрет в уникальных присосках, которыми снабжены лапки животного. Но выяснилось, что в строении лап геккона нет ничего, похожего на присоски, которые могли бы присасываться к стеклу и обеспечивать ящерице хорошее сцепление. Потом решили, что геккон бегаёт по стеклу, приклеиваясь к его поверхности с помощью клейкой жидкости, подобно тому, как держится на разных предметах улитка. Но в этом случае на стекле должны были бы оставаться следы от его лап, а никаких следов геккон не оставляет. Кроме того, никаких природных желез, способных выделять такую жидкость, на лапах геккона обнаружено не было (это вообще не характерно для рептилий). Разгадка этого явления пришла вместе с открытием наномира и буквально поразила общественность. Оказалось, что при движении геккон использует законы молекулярных связей! Ученые внимательно изучили лапку геккона под микроскопом, и при этом выяснилось, что она покрыта мельчайшими волосками, диаметр которых в десять раз меньше, чем диаметр человеческого волоса. На кончике каждого волоска находятся тысячи мельчайших подушечек размером всего двести миллионных долей сантиметра. Снизу подушечки прикрыты листочками ткани и при большом увеличении видно, что каждый листочек покрыт сотнями тысяч тонких волосообразных щетинок. Но и это еще не все. Щетинки, в свою очередь, делятся на сотни нанометровых лопатообразных кончиков! То есть, их поверхность сравнима по размеру с атомами и молекулами, и, таким образом, они могут вступать в молекулярное взаимодействие с атомами, находящимися на поверхностях любых даже совершенно гладких, на наш взгляд, поверхностей (подобно молекулярному взаимодействию между атомами в молекулах). Даже стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинки столь плотно прилегают к ней, что лапка как бы «прилипает» к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напрягает мышцы и потянет лапку – молекулярные силы перестают действовать, и лапка легко отделяется от поверхности. Данное открытие побудило исследователей к попыткам создать аналогичные искусственные наношерстинки для разных целей. Например, сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. А если еще удастся прикрепить к нему хвост, такой же, как у геккона, он сможет без проблем бегать по любым острым граням. Если эксперименты по созданию ящерицепо-

добных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых разных областях — от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет. Также принцип наношерстинок лег в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в условиях невесомости (обычный скотч в космосе не работает), или создать новый вид «сухого клея», позволяющего с легкостью приклеить и отлепить все, что нужно. Можно изготовить обувь, которая не скользит на льду и даже позволит человеку ходить по стенам. Она облегчила бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и обычным людям. Вот такой он «хитрый», этот геккон. С виду вроде обычная ящерица, а вот смог ведь “додуматься” до такого необычного способа передвижения! Теперь и нам, людям нужно срочно учиться создавать все, что есть в наномире, и тогда у нас начнется совсем другая жизнь! Мир находится на пороге третьей научно-технической революции. Нанотехнологии — новый и пока не слишком понятный широкой публике термин. Но скоро в мир нанотехнологий войдет каждая домохозяйка, а сами нанотехнологии принесут новую научно-техническую революцию. В ближайшее время в мире на развитие нанотехнологий будут потрачены сотни миллиардов долларов. Расходы правительств ведущих стран составят больше половины этой суммы, что говорит о стратегической, государственной важности нанотехнологий. Еще одна цифра: венчурные компании, которые осваивают новое направление, уже сегодня получают прибыль до 20 млн долларов в год. И это далеко не предел!

Нанотехнологии – это изготовление сверхмикроскопических конструкций из мельчайших частиц материи.

Наномир – это часть реального, привычного для нас мира, только часть эта настолько малых размеров, что увидеть ее с помощью обычного человеческого зрения совершенно невозможно. Впервые объекты наномира – нанообъекты — обнаружили в 1931 году немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска — создатели первого электронного микроскопа (специального прибора для получения увеличенных в миллионы раз изображений изучаемых объектов). Основными объектами наномира являются атомы и молекулы, размеры которых как раз порядка нанометра.

В новых словарях иностранных слов даётся такое определение: «НАНОТЕХНОЛОГИЯ [*нано... + технология*] исследование и обработка объектов, размеры которых порядка 10^{-9} м (одной миллиардной части метра) – атомов, ионов, молекул; процессы нанотехнологии подчиняются законам квантовой механики и включают атомную сборку молекул, методы записи и считывания информации, стимуляцию химических реакций на молекулярном уровне и другие».

НАНОНАУКА может быть определена как междисциплинарная наука, относящаяся к фундаментальным физико-химическим исследованиям объектов и процессов с масштабами в несколько нанометров. НАНОТЕХНОЛОГИЯ может быть определена как совокупность прикладных исследований нанонауки и их практических применений, включая промышленное производство и социальные приложения. “Сегодня для большинства людей нанотехнологии — это такая же абстракция, как ядерные технологии в 1930-е гг.”, — говорил Владимир Путин в послании Федеральному собранию. Он рассчитывает, что продукты нанотехнологий “войдут в жизнь каждого человека”, благодаря им повысится качество жизни, улучшится национальная безопасность, сохранятся высокие темпы роста экономики. Путин предложил выделить не менее 130 млрд руб. в управление специально создаваемой Российской корпорации нанотехнологий. Деньги получают выигравшие конкурсы

академические и прикладные институты, вузы, которые смогут привлечь бизнес на условиях софинансирования. Где место России в нанотехнологическом буме? Мы, по крайней мере, знаем о нем и осознаем его важность. Развитие нанотехнологий значится на одной из верхних строк в утвержденном президентом РФ перечне приоритетных научных направлений и перспективных технологий.

В последнее время термин «нанотехнологии» (сокращённо – «нано-тэк») стал очень популярным. Он объединяет разнородные представления и подходы, а также разные методы воздействия на вещество. К нанотехнологиям принято относить процессы и объекты с характерной длиной от 1 до 100 нм. Один нанометр примерно в 100 тысяч раз меньше толщины человеческого волоса и составляет одну миллионную привычного для нас миллиметра. Разумеется, человеческое воображение и используемые нами слова, образы или термины почти не способны сколько-нибудь адекватно описать мир со столь крошечными объектами. Верхняя граница нано-области соответствует минимальным элементам в так называемых БИС (больших интегральных схемах), широко применяемым в полупроводниковой и компьютерной технике. Нанотехнологии представляются весьма перспективными для получения новых конструкционных материалов, полупроводниковых приборов, устройств для записи информации, ценных фармацевтических препаратов и т.д. Десятки крупнейших университетов по всему миру создают новые факультеты, лаборатории, конструкторские бюро, экспериментальные цеха и целые заводы, перспективные комплексные исследовательские группы для изучения, освоения и внедрения нанотехнологий. Исследования в наномасштабе объединяют многие научные и технические дисциплины. Химики, биологи, врачи, физики, инженеры и программисты — в наноразработки вовлечены все... С чего же началось развитие новой отрасли?

В 1959 году знаменитый американский физик, лауреат Нобелевской премии, Ричард Ф. Фейнман прочитал лекцию под названием «Внизу полным-полно места», в которой впервые была рассмотрена возможность создания веществ (а затем, естественно, отдельных элементов, деталей и целых устройств) совершенно новым способом, а именно, «атомной укладкой», при которой человек манипулирует нужными атомами поштучно, располагая их в требуемом ему порядке. Примерно через сорок лет после этого Эрик К. Дрекслер в своей известной книге «Машины творения» (1986) предложил создавать устройства, названные им «молекулярными машинами», и раскрыл удивительные возможности, связанные с развитием нанотехнологии. Воображаемые устройства Дрекслера по своим размерам были значительно меньше, чем клетки живых организмов. Понятие «нанотехнологии» в 1974 году придумал японец Норё Танигути для описания процесса построения новых объектов и материалов при помощи манипуляций с отдельными атомами. Нанотехнологии имеют дело с объектами в одну миллиардную часть метра, то есть размером с атом. Первые технические средства в этой области были изобретены в швейцарских лабораториях IBM. В 1982 году был создан растровый туннельный микроскоп, отмеченный через четыре года Нобелевской премией. В 1986 году появился атомный силовой микроскоп. В отличие от прежних электронных приборов, которые позволяли лишь наблюдать микромир, новейшие приборы (их правильнее было бы назвать нанозондами) дают возможность изменять этот мир, строить в нем, как из кирпичиков, молекулы с любыми свойствами. Изменения происходят помимо желания человека. По законам квантовой физики любое наблюдение — это манипуляция с наблюдаемым объектом. Тот, кто измеряет импульс атома, вступает во взаимодействие с ним и изменяет его состояние. В растровых микроскопах наблюдение и манипуляция едины, как пальцы на руке. С другой стороны, начиная с 1980 года, в технологии производства транзисторов и лазеров все

чаще стали использоваться искусственно создаваемые пленки толщиной около 10 нм, что позволяло изготавливать устройства с новыми, улучшенными техническими характеристиками. В 1980 году в Японии был изготовлен первый полевой транзистор с высокой подвижностью носителей (High Electron Mobility Transistor, HEMT). А дальше? В 1981 году сотрудники фирмы IBM создали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), позволяющий получать изображение с разрешением на уровне размеров отдельных атомов, что явилось исключительно важным научным достижением, поскольку исследователи впервые получили возможность непосредственно наблюдать и изучать мир в нанометровом, атомарном масштабе. Японские фирмы и научные организации, в свою очередь, начали энергично развивать методики в области микроскопии, в результате чего за короткое время были созданы новые типы сканирующих туннельных микроскопов, а также электронных микроскопов с очень высоким разрешением (напомним, что разрешением оптического прибора физики называют размер наименьшей детали, которую можно выделить на получаемом изображении), позволяющих исследовать движение отдельных атомов и молекул. Это привело к энергичному развитию экспериментальной техники в нанометровом диапазоне и значительно расширило наши представления о микромире и нанообъектах. В 1991 году Япония начала осуществлять государственную программу по развитию техники манипулирования атомами и молекулами (проект «Атомная Технология»), которая привлекла внимание исследователей во многих странах. В настоящее время уровень японских исследований в нанотехнологиях является одним из самых высоких в мире, однако следует помнить, что в XXI веке борьба за техническое лидерство в этой области будет продолжаться, причем ведущими направлениями исследований станут информационные технологии и биологические науки. В 1980 году основой электроники являлась полупроводниковая техника, но сейчас все отчетливее начинают выявляться новые направления (наноэлектроника и биоэлектроника), непосредственно связанные с прогрессом нанотехнологий. В 1990 году началась реализация огромного международного проекта по определению последовательности укладки около 3 миллиардов нуклеотидных остатков в записи генетической информации (проект «Геном Человека»), ставшего ярким прорывом в биологии и медицине. Этот проект одновременно является исключительно важным для развития нанотехнологий, поскольку открывает новые огромные возможности в информационных технологиях, позволяя понять, а затем и использовать принципы обработки информации в живой природе (биоинформатика). Можно даже сказать, что до 1990 года информационная технология (ИТ) была всего лишь составной частью или «ветвью» электроники, а после 1990 года от нее отросла (как от ветви настоящего дерева) независимая отдельная веточка, которую можно назвать *биоинформационной технологией*. В связи с осуществлением проекта «Геном Человека» произошло также быстрое и энергичное развитие разнообразных исследовательских методик в области собственно биотехнологий. Проект «Геном Человека» был завершен в 2000 году и позволил ученым прочитать генетическую информацию, связанную с человеческим организмом, что уже привело к созданию новых лекарств по новым принципам и на новой основе (геномика). Следующим естественным этапом стало развитие новых отраслей фармацевтической промышленности и создание новых производственных процессов и мощностей, а также расширение сферы всего бизнеса и деловой активности в этой обширной отрасли. Можно ожидать, что лекарственные препараты в XXI веке будут выпускаться буквально в индивидуальном порядке (т. е. для каждого конкретного пациента на основе его генной информации будут разрабатываться препараты, обеспечивающие максимальный лечебный эффект при данном заболевании и т. п.). Такая ориентированная на конкретного человека система лечения уже даже получила название «индивидуальной» терапии или «лечения по заказу»

(tailor-made therapy) и она, безусловно, открывает перед практикующими врачами огромные перспективы. Дальнейшие исследования позволяют перейти от генома человека к изучению молекулярной структуры белков, особенностей их функционирования в живых организмах, механизмов их взаимодействия и т. п., что вновь уверенно приводит нас ко многим задачам и проблемам, связанным с информационной технологией. Понимание и использование механизмов взаимодействия на молекулярном уровне важны не только для биологии, но и составляют основу *нанонауки* в целом. Поэтому фундаментальные исследования XXI века в области нанотехнологий должны обязательно нацеливаться именно на изучение механизмов процессов на молекулярном уровне. В прикладных задачах, по-видимому, основное внимание будет уделяться проблемам биотехнологии, а также дальнейшему развитию и прогрессу полупроводниковой техники и информационных приложений (созданию новых типов интегральных схем, запоминающих устройств и т. д.). В области медицины мы уже можем всерьез задуматься о реализации самых немыслимых фантазий (борьба со старостью... лечение всех заболеваний... полная победа над раком...). Возможно, уже в XXI веке мы будем заниматься даже проблемой бессмертия человека. Нанотехнология должна стать основой для практической реализации многих вечных стремлений человека. В 2000 году нанотехнология делала первые шаги и начала бурно развиваться, но к середине столетия уже можно ожидать существенного прорыва во многих областях, включая информационные технологии, биологию, создание «информационного общества», медицину и т.п.

Нанотехнологию можно определить как набор технологий или методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами (т. е. методик регулирования структуры и состава вещества) в масштабах 1 – 100 нм. Использование характерных особенностей веществ на расстояниях порядка нанометров создает дополнительные, совершенно новые возможности для создания технологических приемов, связанных с электроникой, материаловедением, химией, механикой и многими другими областями науки. Получение новых материалов и развитие новых методик обещает, без преувеличения, произвести настоящую **научно-техническую революцию** в информационных технологиях, производстве конструкционных материалов, изготовлении фармацевтических препаратов, конструировании сверхточных устройств и т. д. Классическим примером достижений нанотехнологий стала разработка **сканирующих туннельных микроскопов** (СТМ). Первый такой микроскоп был создан в лаборатории фирмы IBM Бихи и Роллером для исследования особенностей и неоднородностей поверхности монокристаллов кремния. Экспериментатор подводит тончайший золотой щуп (зонд, пробник) на расстояние около 1 микрона к поверхности исследуемого образца, в результате чего между зондом и поверхностью возникает электрический ток, обусловленный квантово-механическим туннельным эффектом, величина которого меняется в зависимости от состояния изучаемой поверхности (например, из-за наличия на поверхности впадин или выступов). Замеряя величину туннельного тока или, наоборот, сохраняя ее постоянной (за счет регулирования потенциала зонда), экспериментатор может «сканировать» поверхность и получать ее прямое «изображение», подобно тому, как электронный луч создает изображение, сканируя поверхность экрана обычного телевизора. Этот метод позволяет не только изучать атомарную структуру поверхности, но и проводить разнообразные и весьма ценные физические эксперименты (например, можно проверять теоретические расчеты, относящиеся к изменению поверхности в определенных условиях и т. п.). Работая со сканирующим микроскопом описываемого типа, экспериментаторы неожиданно вышли на следующий этап развития, а именно — стали проводить прямые технологические операции на атомарном

уровне. Прикладывая к зонду СТМ соответствующее напряжение, его можно использовать в качестве своеобразного атомного «резца» или гравировального инструмента. Впервые это удалось сделать сотрудникам Армаденской лабораторий IBM под руководством Д. Эйглера, которые сумели выложить на поверхности монокристалла никеля название своей фирмы (IBM) из 35 атомов ксенона. Это стало своеобразным рекордом в методах миниатюризации записи «текста» Позднее, в 1991 году из этого выросла методика перемещения атомов ксенона вверх-вниз (относительно поверхности монокристалла), названная **атомным переключением** (atomic switch). В целом, описанная техника создает много возможностей как для манипуляций на уровне отдельных атомов, так и для изучения их структур и поведения.

"Нано" является и хорошим бизнесом. Национальный научный фонд США предсказывает, что к 2015 году продукты и услуги, произведенные с участием нанотехнологий, будут охватывать рынок в триллион долларов, что сделает эту область не только одной из самых быстрорастущих в истории, но и превышающей объединенные телекоммуникационные и информационные технологии в начале технологического бума в 1998. "Нано" также является приоритетным направлением для таких технологических компаний, как HP, NEC и IBM, каждая из которых выделила огромные исследовательские ресурсы на изучение и внедрение наноустройств. Промышленные эксперты предсказывают, что право собственности на продукты нанотехнологий в ближайшее время может составлять более миллиарда долларов. Нанотехнологии пришли из мира будущего в мир настоящего. Инновационные нанотехнологии уже породили шквал коммерческих изобретений: от быстростгорающих присадок ракетного топлива до новых лекарств от рака и относительно точных и простых в обращении детекторов таких биотоксинов, как возбудитель сибирской язвы. Нанокремы для кожи и лосьоны для загара уже присутствуют на рынке, а улучшенные с помощью нанотехнологии теннисные мячики впервые использовались в 2002 году на Кубке Дэвиса.

В области нанотехнологий у современной России очень хорошие перспективы. Например, для для успешного наносинтеза необходимы источники **синхротронного излучения**. Из десятка европейских источников синхротронного излучения два работают в России — в Новосибирске и в Курчатовском центре, третий почти готов в Зеленограде. Еще один синхротронный источник может быть построен в Дубне. Нейтронный источник создается в Санкт-Петербурге. Лучшие в мире сканирующие зондовые микроскопы, которые работают в 90 институтах РАН, созданы в Зеленограде и уже несколько лет приобретаются Европой. С 1970-х годов на наших космических станциях велись уникальные опыты по биотехнологии, где в условиях невесомости выращивались белки и производились особо чистые материалы, в том числе полупроводники. Сейчас эти эксперименты продолжаются на международной космической станции. Создание новых материалов — это решение энергетических проблем, это качественный рывок в информатике. Мы ни от кого в нанотехнологиях не отстали. Все стоят в дверях, но в дверь никто не вошел. Преимущество России перед Европой и Японией состоит в том, что нанотехнологии — это междисциплинарная область, где успешно работать могут только Россия и США. Один из самых важных технологических приоритетов — биоорганическое материаловедение на основе нанотехнологий, где бум, исходя из многих западных публикаций, только начинается. Фактически наука подошла к моделированию принципов построения живой материи, которая основана на саморегуляции. Раньше саморегуляцией были наделены только живые организмы, но нанотехнологии сделают саморегуляцию свойством неживой материи. Впрочем, в этом случае уже и не поймешь, где живая материя, а где мертвая. Свойством

саморегуляции будут наделены, к примеру, нанороботы. Освоенный и отмеченный Нобелевской премией метод создания структур с помощью квантовых точек и есть самая настоящая саморегуляция неорганической материи. Это переворот в науке и в цивилизации — создание бионических приборов, клеточных мембран из биоорганики, даже биологических органов и объектов, вплоть до, скажем, глаза, печени, кожи и самого совершенного компьютера, которым является мозг. Кстати, если говорить честно, современный компьютер — тоже попытка смоделировать мозг. Вся история науки — это накопление и анализ новых знаний. В XX столетии — прежде всего в области ядерной физики и физики высоких энергий, которые определили лицо современной цивилизации. Но сейчас благодаря нанотехнологиям ученые от анализа впервые переходят к синтезу. Это качественное изменение мира науки. Впервые человек присваивает себе функции Творца, получает возможность по своей воле создавать новый мир на основе биоорганики, которая соединила физику и молекулярную биологию. И, как всегда при появлении нового знания, все громче звучат голоса тех, кто обеспокоен возможной неподконтрольностью этого знания. Кому в руки попадет инструмент, созданный нанотехнологиями? Опасения подпитываются историей — и тех, кто разделяет эти взгляды, именуют «наноапокалиптиками». Они предлагают радикальные меры: наложить временный мораторий на развитие нанотехнологий до тех пор, пока не будет создан и одобрен всем мировым сообществом строгий свод правил о применении нового знания. Наноапокалиптики говорят о неминуемости войн, которые, защищая интересы своих создателей, будут вести нанороботы-дизассемблеры. Но очень скоро, предполагают наноапокалиптики, у нанороботов могут появиться собственные интересы, которые не будут иметь ничего общего с интересами человека. Американская компания Superconnect с помощью так называемых нанотехнологий разработала новый материал, который в будущем поможет ускорить передачу данных Интернета в целых сто раз. Материал представляет собой особый полимер, склеенный с набором **углеродных молекул-бакиболлов**. С его помощью можно управлять потоками света. Это - первый шаг на пути создания полностью оптических маршрутизаторов в Сети. Сейчас для управления потоками данных (которые между крупными узлами передаются по оптоволоконным кабелям), сами пакеты преобразовывают из оптических импульсов в электронные. Специальные чипы определяют направление передачи и переключают канал, после чего поток битов информации в виде электронов снова переводят в световые импульсы и отправляют к месту назначения. Такие двойные преобразования - одно из "проблемных мест" Интернета, они снижают общую пропускную способность. Заменив обычные маршрутизаторы, сочетающие оптические и электронные компоненты, на полностью оптические, можно будет существенно повысить скорость передачи данных. В научных центрах мира развитие нанотехнологий идет в основном по трем направлениям: изготовление электронных схем (в том числе и объемных) с активными элементами, величиной примерно со среднюю молекулу; разработка и изготовление наномашин, т.е. механизмов и роботов такого же размера; непосредственная манипуляция атомами и молекулами и сборка из них всего сущего. Нанотехнологии могут привести мир к новой технологической революции и изменить среду обитания человека. Потенциальные возможности их поистине не знают границ. Поэтому исследования в данном направлении все время расширяются. А новые фирмы, занимающиеся нанотехнологиями, стали, наконец, получать ощутимую прибыль, зарабатывая в среднем \$10-20 млн в год. Но у сверхновых технологий с безграничными возможностями есть и обратная сторона. Было обнаружено, что взаимодействие наноматериалов с живыми клетками может быть непредсказуемым и опасным. Крошечные частички углерода диаметром 35 нанометров могут попасть в мозг человека через дыхательные пути и оказать на организм пока еще не изученное, но, вероятнее все-

го, разрушительное воздействие. Полая сферическая структура сверхпроводимой молекулы-бакиболла – одной из трех разновидностей чистого углерода (другие две – это графит и алмаз) - состоит из 60 атомов углерода, устроившихся во взаимосвязанных 20 шестиугольниках и 12 пятиугольниках. По форме она смахивает на футбольный мяч. Проведенные исследования показали, что данные молекулы токсичны. Они убивают дафний – "водяных блох" и могут стать причиной повреждения мозга. Выявленный эффект позволил определить наноматериал как "умеренный яд". Мячеобразный углерод несколько более вреден, чем никель, но все же не так опасен, как химикалии типа бензапирена, который содержится в сигаретном дыме и автомобильных выхлопах. Конечно же, не все наноматериалы обладают такими же вредными для живых существ свойствами. Их "поведение" зависит не только от размера, но и от формы — являются ли они, к примеру, сферами или длинными трубками. И те горизонты, которые открываются при использовании "нано", заставляют пренебречь возможной опасностью. Например, известен целый ряд органических молекулярных групп, которые могут функционировать как выпрямитель, проводящая шина или запоминающее устройство. Для хранения одного бита информации теоретически нужна всего одна молекула. Изготовленный таким образом накопитель на жестком диске мог бы во много раз превзойти по емкости сегодняшние аналоги. Нано-ЗУ, работающий на механическом принципе, изобрели ученые из IBM под руководством Герда Биннига. Так называемый **миллипед** представляет собой растр из 1024 рычажков силового микроскопа. Если нужно записать "1", их кончики продавливают отверстие в мягком слое полимера. Для считывания битов миллипед проверяет поверхность на наличие дырочек. Если рычажок попадает в отверстие, его температура, а вместе с тем и сопротивление, изменяются, а, значит, поддаются измерению. Таким способом можно получить плотность записи до 80 Гб на кв. см (для сравнения: максимально достижимая сегодня емкость в десять раз меньше). Через 3 года IBM изготовит миллипед с 4000 зондов, который можно будет применять в новом поколении портативной техники. По мнению Биннига, несложно и представить себе плату с миллионом зондов.

Одним из самых многообещающих и вполне реальных применений нанотехнологий могут оказаться **нанороботы** (или наноботы) — устройства размером в десятки нанометров, соизмеримые с вирусами, которые самостоятельно манипулируют атомами. Нанороботы будут обладать способностью самовоспроизводиться, создавать из произвольного органического и неорганического подручного материала любые предметы. В итоге нанороботы, манипулируя молекулами, смогут создать любой предмет или даже существо. Звучит фантастически. Нанороботов разделяют на два вида: ассемблеры, способные конструировать и самовоспроизводиться, и дизассемблеры, способные разбирать. Исследователи ведущих лабораторий мира сообщают, что значительно продвинулись в создании нанороботов. Не исключено, что первой областью, где найдут применения таланты нанороботов, станет медицина. Наноробот, введенный в организм человека, сможет самостоятельно передвигаться по кровеносной системе. На этом пути наноробот сможет исправить характеристики тканей и клеток, очистить организм от микробов и молодых раковых клеток, от отложений, к примеру, холестерина. Вооружившись нанотехнологиями, ученые уже подступают к гемофилии, болезни Альцгеймера, врожденным патологиям. Наконец, существует потенциальная нанотехнологическая альтернатива энергоресурсам. Как известно, мировая экономика напрямую зависит от них и, в первую очередь, от нефти. Борьба за "черное золото" спровоцировала немало вооруженных конфликтов. А нанотехнологии способны, по мнению Маккарти, эту причину для войны снять: с ними эффективность сбора солнечной энергии вырастет настолько, что про нефть и

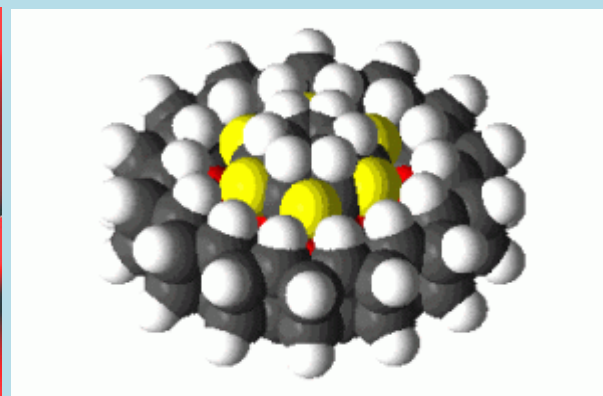
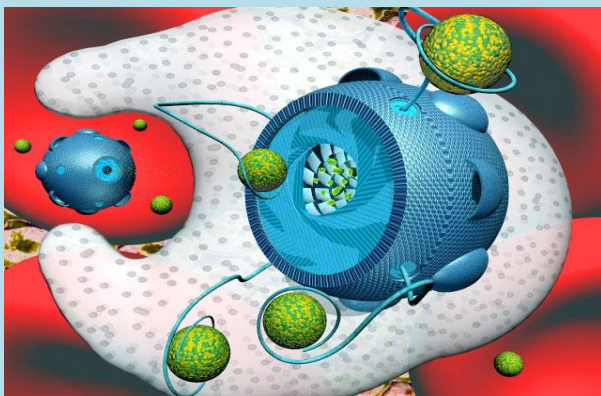
уголь все просто забудут. Энергия Солнца в равной степени доступна всем государствам на планете, и трудно придумать, как одна страна перекроет другой доступ к этому источнику. Следовательно, одной причиной для войн станет меньше.

Прогноз развития нанотехнологий с 2007 по 2050 гг.

(по материалам Интернета)

Основной проблемой в nanoиндустрии на сегодняшний день является **управляемый механосинтез**, т.е. составление молекул из атомов с помощью механического приближения до тех пор, пока не вступят в действие соответствующие химические связи. Для обеспечения механосинтеза необходим **наноманипулятор**, способный захватывать отдельные атомы и молекулы и манипулировать ими в радиусе до 100 нм. Наноманипулятор должен управляться либо макрокомпьютером, либо **нанокomпьютером**, встроенным в робота-сборщика (ассемблера), управляющего манипулятором. На сегодня подобные манипуляторы не существуют. Зондовая микроскопия, с помощью которой в настоящее время производят перемещение отдельных молекул и атомов, ограничена в диапазоне действия, и сама процедура сборки объектов из молекул из-за наличия интерфейса «человек – компьютер – манипулятор» не может быть автоматизирована на наноуровне. Институтом Молекулярного Производства (IMM) разработан предварительный дизайн наноманипулятора с атомарной точностью. За изготовление такого устройства назначена премия только из фонда IMM в размере \$250,000. Как только будет получена система «нанокomпьютер – наноманипулятор» (эксперты прогнозируют это в 2010-2020 гг.), можно будет программно произвести еще один такой же комплекс – он соберет свой аналог по заданной программе, без непосредственного вмешательства человека. Такая «самосборка» называется репликацией, а репликатор - ассемблером. Бактерии, используя репликативные свойства ДНК, способны развиваться за считанные часы от нескольких особей до миллионов. Таким образом, получение ассемблеров в массовом масштабе не потребует никаких затрат со стороны, кроме обеспечения их энергией и сырьем. На основе системы «нанокomпьютер – наноманипулятор» можно будет организовать сборочные автоматизированные комплексы, способные собирать любые макроскопические объекты по заранее снятой либо разработанной трехмерной сетке расположения атомов. Компания Хегох в настоящее время ведет интенсивные исследования в области нанотехнологий, что наводит на мысль о ее стремлении создать в будущем дубликаторы материи. Комплекс роботов (дизассемблеров) будет разбирать на атомы исходный объект, а другой комплекс (ассемблеры) будет создавать копию, идентичную, вплоть до отдельных атомов, оригиналу (эксперты прогнозируют это в 2020-2030 гг.). Это позволит упразднить имеющийся в настоящее время комплекс фабрик, производящих продукцию с помощью «объемной» технологии, достаточно будет спроектировать в компьютеризированной системе любой продукт – и он будет собран и размножен сборочным комплексом. Благодаря репликации можно будет наделять отдельные продукты этим свойством, например, нанороботов. Станет возможным автоматическое строительство орбитальных систем, самособирающихся колоний на Луне и Марсе, любых строений в мировом океане, на поверхности земли и в воздухе (эксперты прогнозируют это в 2050 гг.). Возможность самосборки может привести к решению глобальных вопросов человечества: проблемы недостатка пищи, жилья и энергии. Схематически прогресс нанотехнологий с 2003 по 2050 года представлен на дереве развития нанотехнологий. Благодаря нанотехнологиям существенно изменится конструирование машин и механизмов – многие части упростятся вследствие новых технологий сборки, многие станут ненужными. Это позволит конструировать машины и

механизмы, ранее недоступные человеку из-за отсутствия технологий сборки и конструирования. Эти механизмы будут состоять, по сути дела, из одной очень сложной детали. С помощью **механоэлектрических нанопреобразователей** можно будет преобразовывать любые виды энергии с большим КПД и создать эффективные устройства для получения электроэнергии из солнечного излучения с КПД около 90%. Утилизация отходов и глобальный контроль за системами типа «recycling» позволит существенно увеличить сырьевые запасы человечества. Станут возможными глобальный экологический контроль, погодный контроль благодаря системе взаимодействующих нанороботов, работающих синхронно. Биотехнологии и компьютерная техника, вероятно, получат большее развитие благодаря нанотехнологиям. С развитием наномедицинских роботов станет возможным отдаление человеческой смерти на неопределенный срок. Также не будет проблем с перестройкой человеческого тела для качественного увеличения естественных способностей. Возможно также обеспечение организма энергией, независимо от того, употреблялось что-либо в пищу или нет. Компьютерная техника трансформируется в единую глобальную информационную сеть огромной производительности, причем каждый человек будет иметь возможность быть терминалом – через непосредственный доступ к головному мозгу и органам чувств. Область материаловедения существенно изменится – появятся так называемые «умные» материалы, способные к мультимедиа-общению с пользователем. Также появятся материалы сверхпрочные, сверхлегкие и негорючие (на основе **алмазоида**). Что касается сырьевой проблемы, то для постройки большинства объектов нанороботы будут использовать несколько самых распространенных типов атомов: углерод, водород, кремний, азот, кислород, серу и другие (в меньшем количестве). С освоением человечеством других планет проблема сырьевого снабжения будет решена. Таким образом, на основании прогнозов, нанотехнологии обещают радикальное преобразование как современного производства и связанных с ним технологий, так и человеческой жизни в целом. Нанотехнологии произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией.



ИСКУССТВЕННЫЙ ФАГОЦИТ – ИНСТРУМЕНТ НАНОМЕДИЦИНЫ И НАНОПОДШИПНИК (ПРОЕКТЫ)

НАНОРЕПЛИКАЦИЯ

Ассемблеры и дизассемблеры.

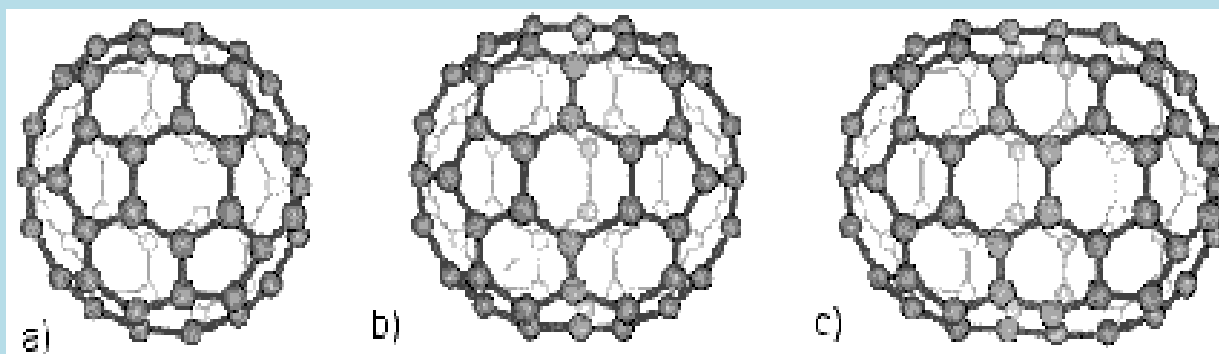
Ассемблером (с англ. assembler - конструктор, составитель, сборщик) в нанотехнологии называют машину молекулярных размеров, способную к саморепликации (самовоспроизведению, саморазмножению) и конструированию других устройств, с наперед заданной структурой. Работать ассемблеры будут с помощью **нанокomпьютера**, который обеспе-

чивает работу всех систем ассемблера - работу **позиционных механизмов, манипуляторов, систем подачи и преобразовывания энергии, систем связи, молекулярных насосов** и др. Эти системы зачастую представлены несколькими большими молекулами. Главная задача ассемблера - составление атомов и молекул в наперед заданном порядке. Макрокомпьютер с поставленной задачей управляет ассемблером до тех пор, пока задача не будет реализована. После этого ассемблер переходит в режим ожидания. Реплицируется (размножается путём создания своей копии) ассемблер или по команде от макрокомпьютера или в зависимости от окружения. Для выполнения некоторых задач (например, восстановление озонового слоя планеты) для устранения всех веществ, разлагающих озон, ассемблеров необходимо строго определенное количество на кубический метр (концентрация), и, в зависимости от содержания вредных веществ в атмосфере, ассемблеры будут регулировать свое количество. Таким образом, эта система не будет зависеть от человека, а восстановление озонового слоя будет протекать в автоматическом режиме. Остановимся подробнее на молекулярном манипулировании. Многие вещества могут быть получены посредством **механохимии** (т.е. сборкой молекул непосредственно атом за атомом). Составление больших молекул со сложной структурой (молекулы белков, ДНК, РНК и полимеров) требует особой точности в позиционировании, т.к. многие большие молекулы имеют определенную трехмерную конфигурацию и не могут быть созданы простым сложением атомов. Поэтому для ассемблера необходимо иметь несколько манипуляторов. Тогда, манипулируя одновременно двумя манипуляторами, количество степеней свободы системы возрастает, и ассемблер может "складывать" более сложные молекулы. Возможно, что ассемблер будет чем-то похож на паука, при этом, несколькими "ногами" он будет держаться за субстрат (т.е. за основу). Представим себе протекание такого процесса: человек-оператор рисует на макрокомпьютере куб из углерода, причем отдельным фрагментом задает его молекулярную структуру. При тесном взаимодействии с биотехнологиями, **наномашин**ы смогут получать "задания" прямо из нервных окончаний человека или из коры его головного мозга, расшифровывая нервные биотоки. То есть можно будет просто подумать о какой-либо вещи, как ее структура будет проанализирована ассемблерами. Можно даже приспособить зрительные окончания для формирования картинки прямо в мозгу человека. Таким образом, он будет ее наглядно изменять и редактировать (как в AutoCad'e). "Нарисовав" нужную вещь, человек передает команду ассемблерам. Они тут же располагаются по специальному порядку, позволяющему конструировать сразу во всех направлениях, и тогда начинают собирать атом за атомом структуру объекта. И через некоторое время у конструктора появляется готовая вещь. Для того чтобы создать копию какой-то вещи, необходимы **дизассемблеры** (англ. disassembler - разбиратель). Объект, предназначенный для копирования, помещают в среду с дизассемблерами, которые разбирают его атом за атомом. Информация о типе атомов и их положении передается к ассемблерам, которые из набора готовых атомов составляют копию объекта. Также дизассемблеры помогут ученым лучше узнать вещи и их атомную структуру. Теоретически такая копия ничем не будет уступать оригиналу. Она будет повторять его вплоть до отдельного атома. Работа ассемблеров и дизассемблеров будет синхронизирована работой макрокомпьютеров, работающих "на поверхности". Интересно, что при такой процедуре исходный образец будет уничтожен, а ассемблеры будут создавать две копии образца! То есть, одна из копий и будет оригиналом! Получается, стирается понятие об оригинале и копии, и в результате такой процедуры мы будем иметь или две копии или два оригинала! Для процесса репликации (размножения) ассемблеров способ с привлечением дизассемблеров будет неприемлем. Зачем привлекать еще одно устройство, когда все можно сделать одним? Э. Дрекслер предполагает, что процесс репликации бу-

дет проходить по методу "строительных блоков". Набор таких манипуляторов и будут производить ассемблера. Механокомпьютер, находящийся в составе ассемблера, поможет решить проблемы позиционирования. И еще немного о создании первых ассемблеров. Первые ассемблеры не могут быть созданы сразу. Сначала на основе белковых молекул (белковых машин, так называемых **протоассемблеров**) будут созданы составные компоненты ассемблера. А затем эти части соединят вместе, получив первый ассемблер! Далее он начнет саморепликацию и эра новых возможностей началась!!! Ориентировочно – это 2030-2050 гг. Тогда бессмертие и огромные материальные богатства в нашем распоряжении!

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Многие из перспективных направлений в материаловедении, нанотехнологии, нанoeлектронике, прикладной химии связываются в последнее время с **фуллеренами**, нанотрубками и другими похожими структурами, которые можно назвать общим термином **углеродные каркасные структуры**. Что же это такое? Углеродные каркасные структуры – это большие (а иногда и гигантские!) молекулы, состоящие исключительно из атомов углерода. Можно даже говорить, что углеродные каркасные структуры – это новая **аллотропная форма углерода** (в дополнение к давно известным – алмазу и графиту). Главная особенность этих молекул – это их **каркасная форма**: они выглядят как замкнутые, пустые внутри "оболочки". Самая знаменитая из углеродных каркасных структур – это фуллерен C_{60} (см. рис. а), абсолютно неожиданное открытие которого в 1985 году вызвало целый бум исследований в этой области (Нобелевская премия по химии за 1996 год была присуждена именно первооткрывателям фуллеренов Роберту Керлу, Гарольду Крото и Ричарду Сمالли). В конце 80-х, начале 90-х годов, после того как была разработана методика получения фуллеренов в макроскопических количествах, было обнаружено множество других, как более легких, так и более тяжелых фуллеренов: начиная от синтезированного только недавно C_{20} (минимально возможного из фуллеренов) и до C_{70} , C_{82} , C_{96} , и выше (некоторые из них показаны на рисунке, помещенном ниже).

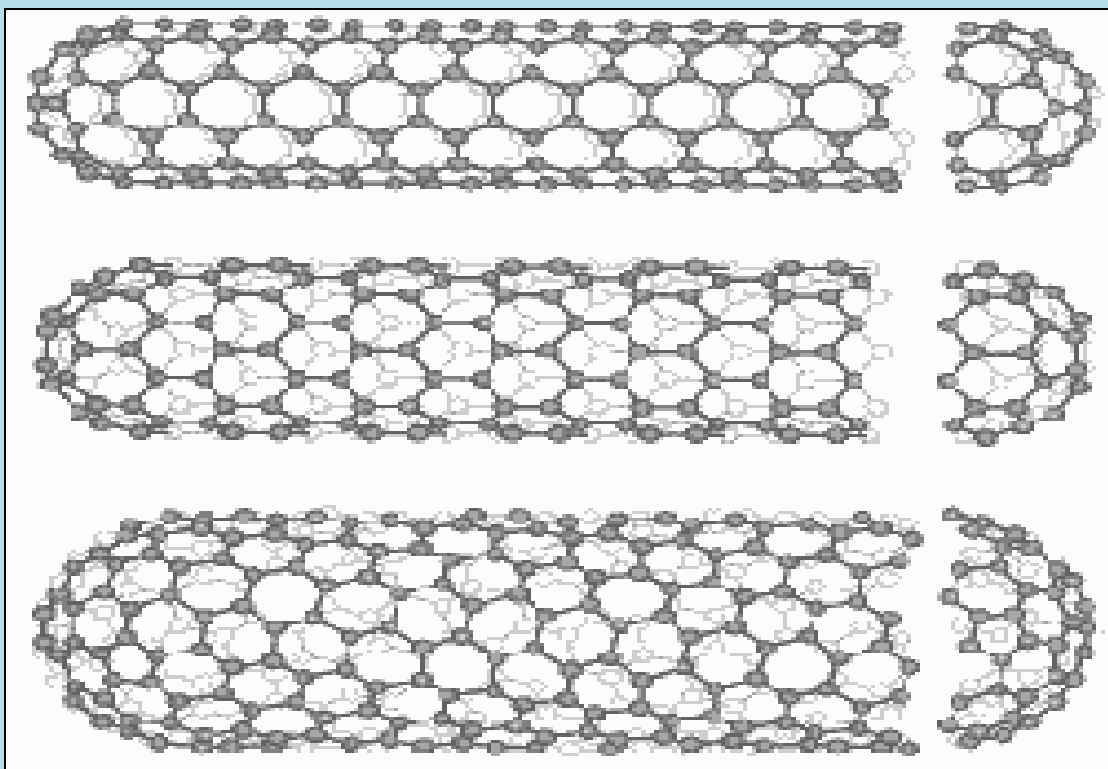


C_{60}	C_{70}	C_{80}
----------------------------	----------------------------	----------------------------

Некоторые представители семейства фуллеренов: (а) C_{60} , (b) C_{70} , (с) C_{80} . Однако разнообразие углеродных каркасных структур на этом не заканчивается. В 1991 году, снова совершенно неожиданно, были обнаружены длинные, цилиндрические углеродные образования, получившие названия **нанотрубок**. Визуально, структуру таких нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и "склеива-

ем" ее в цилиндр (предостережение: такое сворачивание графитовой плоскости - это лишь способ представить себе структуру нанотрубки; реально нанотрубки растут совсем по-другому). Казалось бы, что проще - берешь графитовую плоскость и сворачиваешь в цилиндр! - однако до экспериментального открытия нанотрубок никто из теоретиков их не предсказывал! Так что ученым оставалось только изучать их – и удивляться!

***На рисунке ниже – углеродные нанотрубки:
две прямых и одна спиральная.***



А удивительного было много. Во-первых, разнообразие форм: нанотрубки могли быть большие и маленькие, однослойные и многослойные, прямые и спиральные. Во-вторых, несмотря на кажущуюся хрупкость и даже ажурность, нанотрубки оказались на редкость прочным материалом, как на растяжение, так и на изгиб. Более того, под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки также ведут себя экстравагантно: они не "рвутся" и не "ломаются", а просто-напросто перестраиваются! Далее, нанотрубки демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств. Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости, нанотрубки могут быть и проводниками, и полупроводниками! Может ли какой-либо иной материал с таким простым химическим составом «похвастаться» хотя бы частью тех свойств, которыми обладают нанотрубки?! Наконец, поражает разнообразие применений, которые уже придуманы для нанотрубок. Первое, что напрашивается само собой, это применение нанотрубок в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей. Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, модуль Юнга однослойной нанотрубки достигает величин порядка 1-5 ТПа, что на порядок больше, чем у стали! Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микронов - что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако, длина нанотрубок, создаваемых в

лаборатории, постепенно увеличивается – сейчас ученые уже вплотную подошли к миллиметровому рубежу. Поэтому есть все основания надеяться, что в скором будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в сантиметры и даже метры! Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: ведь "трос" толщиной с человеческий волос, способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет себе бесчисленное множество применений. Нанотрубки могут выступать не только в роли исследуемого материала, но и как инструмент исследования. На основе нанотрубки можно, к примеру, создать микроскопические весы. Берем нанотрубку, определяем (спектроскопическими методами) частоту ее собственных колебаний, затем прикрепляем к ней исследуемый образец и определяем частоту колебаний нагруженной нанотрубки. Эта частота будет меньше частоты колебаний свободной нанотрубки: ведь масса системы увеличилась, а жесткость осталась прежней (вспомните формулу для частоты колебаний груза на пружинке). В результате по сдвигу частоты можно определить массу груза. Другой пример, когда нанотрубка является частью физического прибора – это "насаживание" ее на острие сканирующего туннельного или атомного силового микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место. Необычные электрические свойства нанотрубок сделают их одним из основных материалов наноэлектроники. Уже сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: прикладывая запирающее напряжение нескольких вольт, ученые научились изменять проводимость однослойных нанотрубок на 5 порядков! Еще одно применение в наноэлектронике – создание полупроводниковых гетероструктур, т.е. структур типа металл/полупроводник или стык двух разных полупроводников. Теперь для изготовления такой гетероструктуры не надо будет выращивать отдельно два материала и затем "сваривать" их друг с другом. Все, что требуется, это в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником). Тогда одна часть нанотрубки будет металлической, а другая – полупроводником! Разработано уже и несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Например, созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, с другого конца начинают испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. С помощью того же атомного микроскопа можно производить запись и считывание информации с матрицы, состоящей из атомов титана, лежащих на корундовой подложке. Эта идея уже также реализована экспериментально: достигнутая плотность записи информации составляла 250 Гбит/см². Однако в обоих этих примерах до массового применения пока далеко – слишком уж дорого обходятся такие наукоемкие новшества. Поэтому одна из самых главных задач здесь – разработать дешевую методику реализации этих идей. Далее, целый класс применений нанотрубок связан с использованием ее как микроконтейнера. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть она как бы втягивает в себя вещество. Таким образом, нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов. Попав внутрь нанотрубки, атомы или молекулы уже не могут выйти наружу: концы нанотрубок надежно "запаяны", а углеродное ароматическое кольцо слишком узкое для большинства атомов. В таком виде активные атомы или молекулы

можно безопасно транспортировать. Попад в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца (а операции "запаивания" и "распаивания" концов нанотрубок уже вполне под силу современной технологии) и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это - не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях мира. И не исключено, что через 10-20 лет на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с очень активными ферментами, эти нанотрубки собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и "вскрываются" в определенный момент времени. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы.

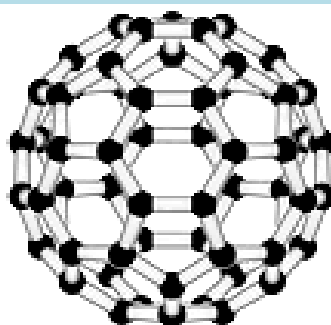
НАНОЧАСТИЦЫ И НАНООБЪЕКТЫ

Современная тенденция к миниатюризации показала, что вещество может иметь совершенно новые свойства, если взять очень маленькую частицу этого вещества. Частицы, размерами от 1 до 1000 нанометров обычно называют «наночастицами». Так, например, оказалось, что наночастицы некоторых материалов имеют очень хорошие каталитические и адсорбционные свойства. Другие материалы показывают удивительные оптические свойства, например, сверхтонкие пленки органических материалов применяют для производства солнечных батарей. Такие батареи, хоть и обладают сравнительно низкой квантовой эффективностью, зато более дешевы и могут быть механически гибкими. Удастся добиться взаимодействия искусственных наночастиц с природными объектами наноразмеров — белками, нуклеиновыми кислотами и др. Тщательно очищенные, наночастицы могут самовыстраиваться в определенные структуры. Такая структура содержит строго упорядоченные наночастицы и также зачастую проявляет необычные свойства. Нанобъекты делятся на 3 основных класса: трёхмерные частицы получаемые взрывом проводников, пламенным синтезом, восстановлением тонких плёнок итд, двухмерные объекты - плёнки, получаемые методами молекулярного наслаивания, CVD, ALD, методом ионного наслаивания и т.д.; одномерные объекты - висеры, эти объекты получают методом молекулярного наслаивания, введением веществ в цилиндрические микропоры итд. Также существуют нанокомпозиты – материалы, полученные введением наночастиц в какие либо матрицы. На данный момент обширное применение получил только метод микролитографии, позволяющий получать на поверхности матриц плоские островковые объекты размером от 50 нм, применяется он в электронике. Метод CVD и ALD в основном применяется для создания микронных плёнок. Прочие методы в основном используются в научных целях. В особенности следует отметить методы ионного и молекулярного наслаивания, поскольку с их помощью возможно создание реальных монослоёв, поэтому, скорее всего, именно с ними будет связан прорыв в нанотехнологиях в ближайшие годы.

НАНОРЕЦЕПТОРЫ (НАНОСЕНСОРЫ) И НАНОМАНИПУЛЯТОРЫ

Как известно, нанотехнология предполагает манипулирование материей на атомном уровне. Рассмотрим, как это будет происходить на практике для идентификации отдельных молекул. В процессе работы таких сложных наномашин как нанороботы, нанокомпьютеры, НЭМС, lab-on-chip, возникнет потребность в сортировке отдельных молекул и их идентификации. Проблема наносенсоров представляет сейчас особый интерес для исследователей-нанотехнологов. Как построить такой нанорецептор, который смог бы отделять молекулы только одного типа? Как сделать перепрограммируемый рецептор, который отбирал бы только те молекулы, описание которых в данный момент передает цен-

тральный компьютер? Можно ли гарантировать чистоту отбора? На все эти вопросы можно ответить с помощью математического моделирования нанорецепторов и наноструктур. Классический нанорецептор, названный **Молекулярным Сортирующим Ротором (далее МСР)**, предложен Эриком Дрекслером. Каждый ротор имеет “гнезда” по окружности, конфигурированные под определенные молекулы. Находясь в окружении молекул “гнезда” селективно связывают заданные молекулы, и удерживают их до тех пор, пока молекула не окажется внутри устройства. От “гнезда” ее отсоединяет стержень, расположенный внутри ротора. Такие роторы могут быть спроектированы из 105 атомов и должны иметь размеры порядка (7х14х14 нм) при массе 2×10^{-21} кг. Они смогут сортировать молекулы, состоящие из 20 и менее атомов, со скоростью 106 молекул/сек при энергозатратах в 10—22 Дж на 1 молекулу. МСР позволяет создавать давление в 30 000 атмосфер, потребляя 10—19 Дж. Роторы полностью обратимы и поэтому могут быть использованы как для нагнетания, так и для выгрузки газов, воды и глюкозы. Каждый ротор имеет 12 “гнезд” для присоединения молекул, расположенных по длине окружности ротора. Несколько МСР, объединенных в каскад, позволят нагнетать в резервуары химически чистые вещества, в которых не будет ни одной чужеродной молекулы. Присоединительные “гнезда” роторов будут иметь специфическую структуру и должны производиться путем конструирования атом за атомом по примеру строения активных центров некоторых ферментов. Так фермент **гексокиназа**, разрывающий молекулу 6-ти углеродной глюкозы на две 3-х углеродные молекулы при гликолизе, имеет присоединительные “гнезда” для глюкозы. Ральф Меркле предполагает, что для большинства «присоединительных гнезд» для молекул, вытянутых в длину и имеющих линейную структуру, можно использовать нанотрубки. Ральф приводит также результаты расчетов, которые показывают, какого диаметра должны быть нанотрубки для различных молекул. По этой ссылке можно найти программу, рассчитывающую оптимальный радиус нанотрубки для того, чтобы присоединить молекулу заданного типа. Расчеты проведены Ральфом для молекул C_4H_2 , C_2H_2 , N_2 , O_2 , CO_2 , C_2HF . Правда, изготовить подобный рецептор пока нельзя, в отличие от предложенного рецептора на основе нанотрубок. Рецептор состоит из двух слоев графита, между которыми помещается искомая молекула. По ее краям расположены две графитовые полосы с атомами фтора по краям. Такая система должна эффективно присоединять молекулы антрацена. По данным математического моделирования, проведенного Ральфом, энергия соединения такого рецептора будет около 41 ккал/моль (расчеты проведены на HyperChem и MM2+). Все нанорецепторы, описанные выше, могут работать благодаря **силам Ван-Дер-Ваальса и Кулона**. Присоединив молекулы с различным электрическим зарядом к присоединительному гнезду, можно настроить гнездо на молекулу определенного типа. **Роберт Фрайтас** предлагает ряд «механических» рецепторов для сортировки молекул. Они имеют разное строение, но смысл один и тот же: рецептор, по сигналу с компьютера, автоматически принимает форму искомой молекулы. Правда, создание таких рецепторов в ближайшем будущем вряд ли возможно.



Нанoeлектромеханические системы (НЭМС) и постепенное вытеснение микроэлектромеханических систем (МЭМС)

Нанoeлектромеханические системы развиваются столь быстро благодаря новым научным открытиям и появлению их технических применений. Механические устройства уменьшаются в размерах, при этом снижается их масса; увеличивается резонансная частота и уменьшается их константы взаимодействия. Нововведения в этой области включают в себя улучшения в процессе изготовления и новые методы для детектирования движения и привода наносистем. Используя методы литографии, стало возможным создание автономных объектов в кремнии и других материалах с толщиной и длиной менее 20 нанометров (нм). Похожими методами можно изготовить каналы или поры молекулярных размеров, что позволит получить доступ в новый экспериментальный режим и ожидать новых применений таких устройств для считывания (сканирования) и молекулярного взаимодействия.

К микроэлектромеханическим системам (МЭМС), изученным в течении десятилетий, недавно возрос интерес благодаря расширению их коммерческого применения. Массивы микромеханических зеркал для оптических шаговых искателей, например, недавно произвели революцию в оптико-коммуникационной промышленности. Существуют зеркальные матрицы, состояние которых зависит от наклона зеркал, диаметром ~ 0.4 мм (3). Подобные технологии используются в проекционных дисплеях на основе матрицы металлических зеркал для модулирования световых лучей. Струйные принтеры, использующие управление жидкой струей – основные потребители микромашинных интегрированных электромеханических систем. Акселерометры, используемые в качестве сенсоров для выброса автомобильных подушек безопасности, также используют МЭМС. Существует, наконец, ряд МЭМС – сенсоров и активаторов, находящихся на разных стадиях развития. Большинство устройств, используемых повседневно, изготовлены с помощью технологий, основанных на производстве из кремния, благодаря хорошо развитым методам, созданных для использования микроэлектронной промышленностью. Типичные размеры МЭМС-устройств колеблются от единиц до сотен микрометров (мкм). Важность МЭМС-технологии не столько в малых размерах, сколько в применении плоских технологий обработки, использующихся в изготовлении электронных интегральных схем для одновременного изготовления ряда простых и сложных механических устройств в интегрированной разработке.

Нанoeлектромеханические системы (НЭМС) характеризуются малыми размерами. При этом их размеры соответствуют функциям, выполняемым устройством. Граничные размеры варьируют от нескольких сотен до единиц нанометров. Новые физические свойства, появившиеся благодаря малым размерам, играют ведущую роль в операциях, выполняемых этими устройствами, поэтому для их изготовления потребуются новые подходы. Производители микроэлектронной техники неуклонно изготавливают транзисторы все меньших размеров, возрастает их плотность на единицу объема в интегральных микросхемах. Основная и самая сильная движущая сила этой миниатюризации – экономика. Так, минимальные размеры транзистора уменьшились до 100-нанометрового диапазона. Миниатюризация коммерческой электроники происходит совместно с физически обоснованными новыми разработками в области электронного транспорта и магнитных свойств мезоскопических и нанометрических устройств. Разработки в области нанотехнологий часто включают в себя разнообразные материалы и методы их обработки с более высоким пространственным разрешением, чем может обеспечить кремниевая микроэлектронная промышленность. Одни и те же усовершенствованные производственные процессы могут быть использованы для дальнейшей миниатюризации электромеханических систем для

того, чтобы работать в НЭМС-режиме. Новый класс НЭМС-устройств может обеспечить революционные результаты при использовании их в сенсорах, медицинской диагностике, дисплеях и устройствах для хранения информации. НЭМС-устройства могут сделать возможными эксперименты над структурой и функциями одиночных биомолекул. Начальные исследования в науке и технике, относящиеся к наномеханическим системам, имеют место уже сейчас во все возрастающем числе лабораторий по всему миру.

Автономные наноструктуры

Один из классов НЭМС-устройств состоит из автономных или подвешенных механических объектов размером порядка десятков нанометров. Эти устройства могут быть получены путем комбинации электроннолучевой литографии и травления, чтобы удалить ненужный материал под литографически изготовленным объектом. Квонг и другие, например, изготовили подвешенные металлические струны шириной менее 50 нм. Этот подход был использован для изолирования тонких металлических струн от фононов, связанных с субстратом. Создание двумерной модели (шаблона) на тонкой пленке и ее вырезание для того, чтобы получить готовую структуру получило название “механическое изготовление микромашин на поверхности” или метод “поверхностной микрообработки”. Для больших структур этот метод использовался с кремниеподобными материалами. Комбинация таких машинных подходов с литографией высокого разрешения позволила создать базовый метод изготовления НЭМС-устройств.

Шаблон наносится на защитную пленку ПММА сканирующим фокусированным лучом электронов, управляемых компьютером. В стандартных литографических подходах используют ультрафиолетовый свет для экспозиции предохранительного слоя, но дифракция при этом ограничивает разрешение модели. Электронные лучи с энергией в несколько килоэлектронвольт не ограничены дифракцией. Электроны изменяют химический характер предохранительного слоя – тонкой полимерной пленки (ПММА), сформированной на кремниевой поверхности с помощью вращения. Химически модифицированная пленка имеет отдельные разрежения в структуре, создающие полимерный шаблон или другую форму для травления и передачи ее на субстрат. Области под полученной структурой должны быть также определены путем следующего литографического шага (вырезание изотропным травлением), чтобы со временем получить только тонкую, изолированную от субстрата структуру. В большинстве случаев наномеханическое устройство подразумевает связь с опорами на субстрате. Но один и тот же продукт может быть использован для изготовления “свободноплавающих структур”. Этот похожий микромашинный метод использует электроннолучевую литографию для создания подвижных систем на базе слоистой однокристалльной пластины. Электроннолучевой метод гибок, так как луч может быть генерирован для шаблона любой формы и пригоден для создания любого двумерного объекта.

Приведение в движение жестких наносистем

Для малых структур проблематично как приведение их в движение, так и его детектирование. Все движущиеся устройства, рассмотренные в предыдущих абзацах, приводились в движение приложенными к ним электромагнитными полями, причем это движение наблюдалось с помощью методов детектирования, основанных на изменении оптической интерференции или угла преломления лазерного луча. Это, вероятно, самые основные и непосредственные методы активирования и наблюдения микро движений. Они могут быть использованы в различных экспериментальных установках. И статическое перемещение, и

резонирующее движение могут достигаться этими методами. Иные методы могут использоваться для индуцирования и детектирования нанодвижения НЭМС-устройств. Силы Лоренца могут быть использованы для приведения в движение маленьких токопроводящих лучей (струн) с помощью переменного тока, проходящего через проводник в сильном поперечном магнитном поле. Индуцированная ЭДС, или напряжение, может служить мерой движения. Этот метод требует полностью проводимые части, и работает достаточно хорошо, например, с проводником, зафиксированным с обоих концов. Пьезоэлектрические элементы и двойные пластины, с разным тепловым расширением (например, биметаллические пластины), установленные на подвижных элементах, могут использоваться для активирования МЭМС-устройств. В резонирующих системах вспомогательный привод также хорошо работает в наномасштабах, используя пьезоэлектричество или другие методы активации колебательных резонаторов НЭМС-устройств. Туннельный метод очень чувствителен и может быть использован для обнаружения субнанометрического движения, благодаря экспоненциальной зависимости туннельного тока, в зависимости от расстояния между туннельными электродами. Для широко распространенного коммерческого применения миниатюризация и интеграция вышеописанных систем принесла бы немалую пользу.

Новый метод убедительно продемонстрировал, как можно использовать сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) в качестве привода совместно со сканирующим электронным микроскопом для детектирования движения. Это попытка обеспечить возможности, необходимые для структур осцилляторного типа на более точном уровне, чем может дать использование лазерной Допплеровской техники. Переменное напряжение, приложенное к пьезоэлектрическому осевому двигателю захвата, сообщает системе локальное механическое передвижение. Наблюдая взаимодействие сфокусированного электронного луча с движущимся осциллятором, можно измерить это движение. СТМ может быть также полезен для представления вида поверхности наноструктуры и для точной корреляции поверхности структуры с механическим положением системы. Этот метод лег в основу изготовления настраиваемых НЭМС-осцилляторов.

Меньшие механические устройства могут использоваться для измерения малых сил, и точно так же НЭМС-системы могут приводиться в движение малыми силами. Возможность изготовления структур, способных взаимодействовать с материалом и обеспечивать его зондирование, открывают новые возможности на молекулярном уровне. Сканирующие микроскопы, такие как СТМ (сканирующий туннельный микроскоп) и АСМ (атомно-силовой микроскоп), уже работают в нанорежиме. НЭМС-технология оказалась более универсальной, чем остальные, разработанные для разнообразных прикладных целей. Миниатюризация механических систем мотивируется, например, ее применением в сверхкомпактных устройствах хранения информации или высокочастотных устройств – компонентов беспроводной связи. С уменьшением размеров устройства поверхность играет доминирующую роль в свойствах объектов и механическое рассеяние, связанное с характером поверхности, становится все более важным. Эти тезисы и определяют ход исследований в области физики материалов НЭМС-систем.

Маленькие и тонкие механические устройства могут иметь очень небольшие постоянные взаимодействия и, в принципе, могут быть использованы для детектирования сил, индуцированных слабыми магнитными полями. Сайдлз ожидает, что механические осцилляторы могут использоваться для прямого определения магнитной силы одиночного спина в магнитно-резонансной системе, что позволит создать магнитно-резонансную систему визуализации с молекулярным разрешением. Консоли для детектирования магнитных сил могут быть более миниатюризованными. С целью увеличить чувствительность экспериме-

нтов в некоторых лабораториях ведутся соответствующие исследования. Биомеханические силы могут быть измерены при помощи матриц отклоняющихся консолей.

Наномеханические осцилляторы могут использоваться для сверхчувствительного детектирования адсорбированной массы. Используемый в настоящее время метод, основанный на анализе сдвига в резонансной частоте макроскопических кварцевых генераторов для измерения изменения масс, хорошо развит и применяется для измерения толщины наращенных пленок в микротехнологиях. МЭМС-резонирующие системы, функционирующие в воздушной среде и использующие электрическую или оптическую передачу данных, могут определить изменение массы порядка 1 пикограмма (пг). Бактерия, например, имеет массу около одного пикограмма, и после прикрепления к консоли она детектируется с помощью резонансного сдвига вибрирующей подвески. Консоль покрыта слоем антител, вырабатываемых организмом животных против этой бактерии, поэтому присоединение специфично и определено только для этого вида патогенного микроорганизма. Очевидно, что разные клетки совместимы по размерам с изготовленной консолью. Сдвиг резонансной частоты этой одиночной клетки может быть определен с помощью вибрации консоли в воздушной среде. А если создавать еще меньшие вибрирующие устройства, с принципом действия, описанным выше, уменьшая при этом давление окружающей среды, то можно детектировать даже аттограммы. Это дает возможность уменьшать в размерах данные механические устройства.

Наномеханические резонансные системы (НМРС) могут осциллировать с высокими частотами и используются как радиочастотные устройства. Например, созданы устройства, которые могут работать как резонатор в диапазоне от 1 до 10 МГц. Асимметричная передаточная характеристика является отражением нелинейных величин в уравнении движения осциллятора. Эти эффекты очевидны даже при самых малых амплитудах (например, при 10 или 15 нм). Такое свойство системы можно использовать для создания параметрических осцилляторов, а также для создания высокочувствительных резонансных сенсоров и масс-детекторов.

Наножидкости

Многие химические, биологические, биофизические и экспериментальные процессы протекают в жидкой среде. Поэтому ожидается, что класс НЭМС-устройств, совместимый по размерам с жидким окружением, будет играть важную роль в исследованиях в вышеуказанных областях. Микрожидкостные технологии представляют интерес и сейчас приняты на вооружение в миниатюризованных системах химической обработки. Микроанализирующие системы «лаборатория-на-чипе» используют системы доставки жидкостей, изготовленные с использованием микротехнологий. Это каналы порядка десятков и сотен микрометров. Граничные размеры наножидкостных систем колеблются от сотен до нескольких нанометров. Электрическое поле в ионно-проводящих жидкостях как альтернатива методу транспортировки с помощью гидростатического давления может быть использовано для нагнетания и контроля за протеканием жидкостей или же даже для слежения за движением индивидуальных молекул. Электроосмотическое движение жидкостей или электрофорезное движение заряженных молекул может контролироваться приложенным электрическим потенциалом посредством изменения формы поверхности или геометрии управляющего канала. Эффективность молекулярного транспорта этих систем следует из их размеров.

Методы создания нанометрических каналов включают использование подходов, связанных с удалением балластного слоя. Эти методы родственны методам изготовления

автономных механических структур с помощью электроннолучевой литографии и непосредственного травления. Таким образом, трубка может быть изготовлена следующим способом: берется нить из травящегося материала и, прежде чем поддерживающая подложка будет убрана (как при создании автономной структуры), необходимо инкапсулировать нить в не травящийся материал, а затем селективно убрать ее, освобождая образовавшуюся полость. Этот подход может применяться для целого ряда материалов и разнообразных форм, используя нитрид или диоксид кремния. Вышеописанный метод используется при создании асимметричных диффузных матриц, а также для устройств динамического сортирования полимеров методом энтропического разделения по способности к деформации и длине. Возможность интегрировать электрически управляемые процессы в наножидкостных системах является очень мощным инструментом, который повышает функциональность устройств на уровень, достигнутый интегральными электрическими устройствами.

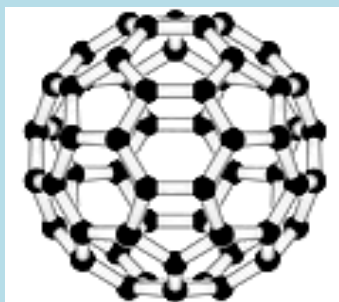
Развитие нанoeлектромеханических систем в ближайшем будущем

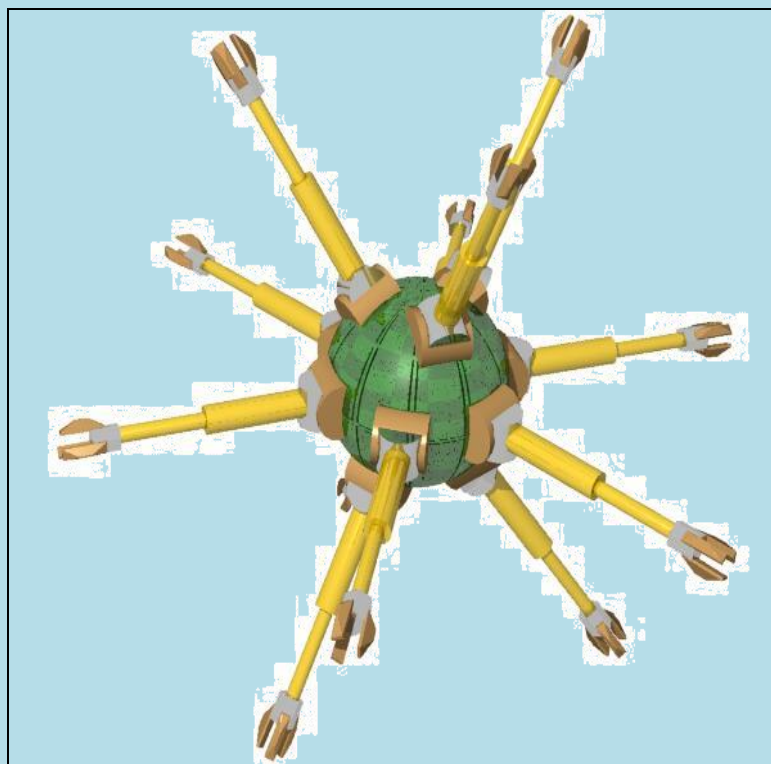
Производство механических структур с произвольной геометрией из целого ряда материалов обеспечивает новые рубежи для экспериментирования в наномасштабах и дает возможность создать устройства, способные взаимодействовать с отдельными молекулами. На сегодняшний день нанотрубки из углерода и другие структуры широко используются и имеют интересные механические характеристики. НЭМС-системы, изготовленные с помощью литографических подходов, достигают размеров углеродных нанотрубок, но, в отличие от них, могут быть изготовлены из разнообразного набора материалов и способны интегрироваться с электрическими и оптическими системами для создания эффективно функционирующих устройств. Связь с действующими рецепторными молекулами, мембранными порами, двигательными молекулами и с другими функциональными молекулярными системами значительно расширяет области применения НЭМС-устройств.

НЭМС-структуры могут быть изготовлены и с помощью методов химии поверхностей, на них можно накладывать шаблоны для взаимодействия с молекулярными системами, объединяя возможности биохимии с описанными выше достижениями нанотехнологий. Здесь описаны будущие технологии, которые могут быть использованы для создания революционно нового класса устройств. Можно уверенно ожидать, что за десятилетие или меньший срок НЭМС-устройства вытеснят МЭМС-системы во многих перспективных областях

Используя НЭМС-технологии, мы можем ожидать появления высокофункциональных сенсоров, атравматичных медицинских диагностических устройств и сверхёмких устройств для хранения информации. В настоящее время продолжается изучение методов изготовления описанных наносистем.

** осциллятор – система, совершающая поступательно-возвратные колебания.*





НАНОРОБОТ, ОН ЖЕ НАНОБОТ (РОБОТ-ЧАСТИЦА) В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ХУДОЖНИКА

БИОМИМЕТИКА В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Нанотехнологии включают в себя манипулирование молекулами и построение структур размерами порядка нескольких нанометров. Однако некоторые живые организмы делают это уже на протяжении 3,8 миллиардов лет. Живая клетка использует ДНК, РНК и большое количество белков для того, чтобы построить клеточные органеллы нанометровых размеров. Поэтому для нанотехнологов логично было бы воспользоваться природными примерами для построения наномашин, в природе не существующих. Биомиметические нанотехнологии находятся сегодня в зачаточном состоянии. Многие открытия пока не могут быть коммерциализованы, но их развитие в будущем позволит существенно помочь при создании наномашин.

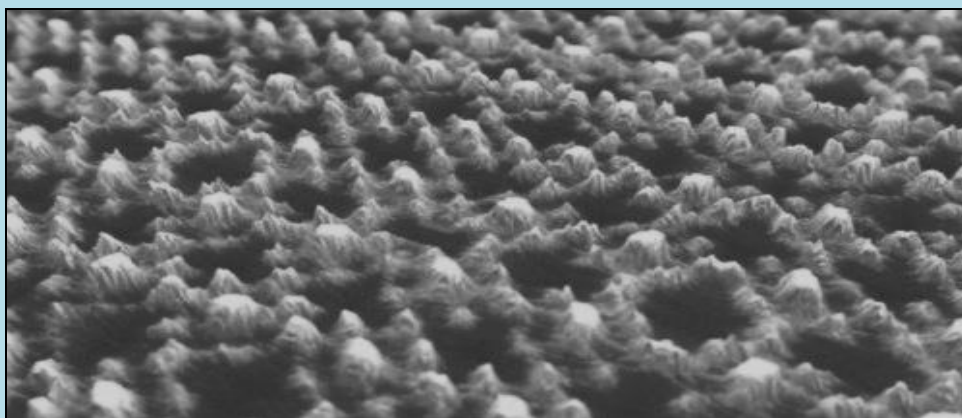
Имитируя природу

Исследователи использовали несколько методов для имитации природы на нанометровом уровне. Один из подходов — создание материалов с уникальными свойствами с использованием примеров, уже имеющих в природе. Так, например, маленькая ящерица геккон может ползать практически по любой поверхности. Для того, чтобы имитировать свойства геккона, необходимо было сначала разобраться в механизме работы его лапок. Эта работа была проделана в центре нанотехнологий в Манчестере. Результаты исследований показали, что на лапках у геккона расположен ряд кератиновых волосков размерами около 200 нм. Капиллярные силы помогают геккону ползать по влажным поверхностям, а силы Ван-Дер-Ваальса — по сухим. Каждая волосинка связывается с поверхностью с силой в 10^{-7} Н. Благодаря высокой плотности волосков на лапках геккона сила связи значительно увеличивается. Так поверхность размерами 10x10 см, состоящая из во-

лосков кератина, может удерживать груз в 100 кг. Гекконы могут ползать по любой поверхности сверху вниз благодаря специфическому строению кожи, покрывающей их лапки (справа). Изготовленные по «технологии геккона» искусственные волокна (с помощью электронно-лучевой литографии) показали адгезию в 30% от аналогичного природного материала (слева). Команда из Манчестера решила продолжить исследования, попробовав сконструировать такой же массив нановолокон. Однако в изготовленном с помощью электронно-лучевой литографии образце только некоторые волокна смогли эффективно соединяться с поверхностью. Это связано с тем, что выращенные исследователями пластиковые волокна жестче, чем аналогичные у геккона. Далее, экспериментируя, исследователи нашли оптимальный вариант геометрии поверхности — диаметр волокон 500 нм, расстояние между волокнами — 1,6 мкм, и длина — 2 мкм. Полученная поверхность 10x10 см смогла удержать всего 30 кг, т.е. была хуже природной. Дальнейшие эксперименты с гекконом показали, что присоединение лапок к поверхности происходит в несколько приемов. Исследователи решили материалы в будущем делать гидрофобными (подобно кератину геккона). По теории, волокна из такого материала не будут прилипать друг к другу. И, конечно же, встал вопрос о массовом выпуске «гекконовых лапок» с помощью не столь дорогих технологий, как электронно-лучевая литография.

Конструируя из белков

Живые организмы конструируют необходимые продукты из белков, поэтому исследователи заинтересовались тем, как с помощью белков можно искусственно создать различные наноструктуры. Некоторые белки, например, могут формировать регулярные структуры в виде кристаллических решеток, которые можно использовать при конструировании наномашин и в нанoeлектронных устройствах.



Реконструкция рельефа кристаллизованного белка *Bacillus sphaericus* CCM2177 с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Расстояния между центрами решетки — 13,1 нм ($13,1 \cdot 10^{-9}$ м)

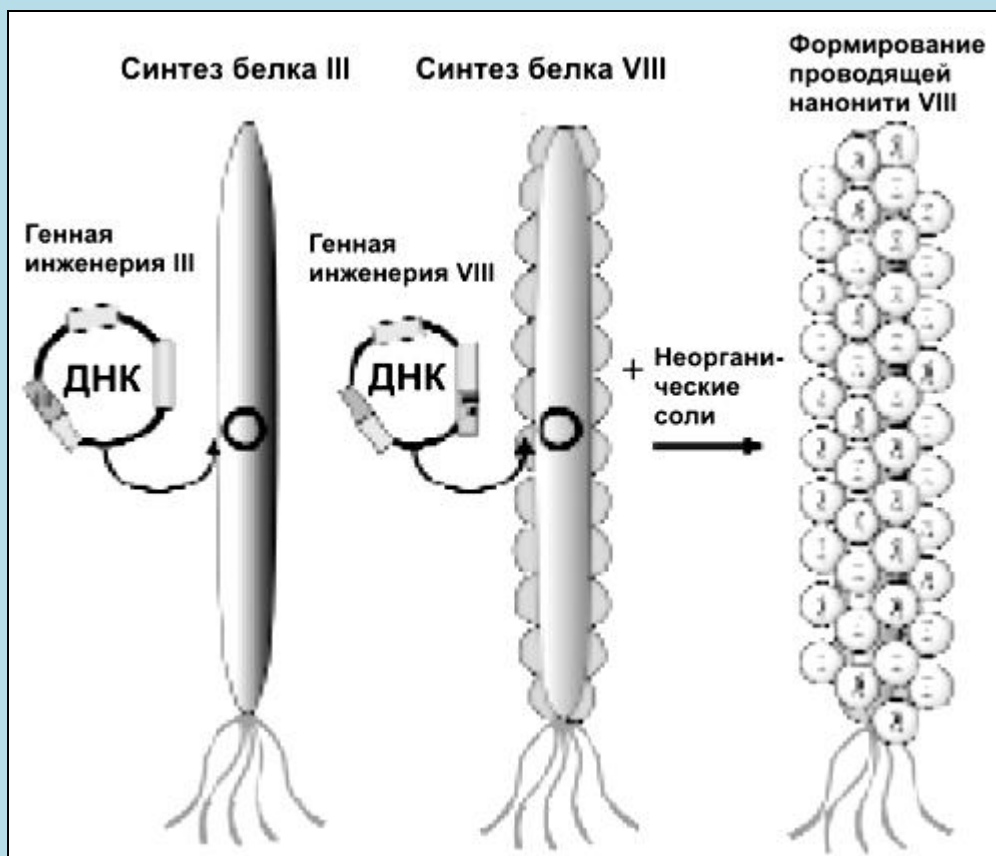
Бактерии на своей поверхности формируют одномолекулярные слои кристаллического белка, называемые S-слои, которые повторяются с 10 нм шагом. Исследователи из наноцентра в Вене, Австрия, решили использовать эти естественные «сверхрешетки» для построения искусственных белковых структур. В первую очередь S-слой был удален с поверхности бактерии и разбит на «субъединицы». Далее, поместив субъединицы в раствор, исследователи добились их реорганизации на кремниевых и металлических подложках, а также на других синтетических полимерах. Как только S-слой помещен на под-

ложку, к нему можно добавить специальные сенсорные молекулы, которые вместе со слоем образуют точный биоаналитический сенсор. Так, например, исследователями был создан сенсор глюкозы на основе S-слоя и молекулы фермента оксидазы глюкозы. Исследователи измеряли величину электрического тока, проходящего через сенсор, в то время как фермент реагировал с глюкозой. Исследователи также использовали S-слой в качестве фоторезиста* в современной фотолитографии. Выдерживание слоя в ультрафиолетовом излучении полностью уничтожает его. Однако толщина слоя — всего 5—10 нм. Современные фоторезистивные материалы имеют гораздо большую толщину.

*Фоторезист (от фото... и англ. resist - сопротивляться, препятствовать), полимерный светочувствительный слой, нанесённый на поверхность полупроводниковой пластины с окисной плёнкой. Ф. используются в полупроводниковой электронике и микроэлектронике для получения на пластине "окон" заданной конфигурации, открывающих доступ к ней травителя. В результате экспонирования Ф. через наложенный на него стеклянный шаблон нужного рисунка ультрафиолетовым излучением (иногда электронным лучом) свойства его меняются: либо растворимость Ф. резко уменьшается (негативный Ф.), либо он разрушается и становится легко удалимым (позитивный Ф.). Последующая обработка растворителем образует в Ф. "окна" на необлучённых участках негативного Ф. или облучённых участках позитивного Ф. Типичные Ф.: негативные - слои поливинилового спирта с солями хромовых кислот или эфирами коричной кислоты, слои циклизованного каучука с добавками, вызывающими "сшивание" макромолекул под действием света; позитивные - феноло- или крезолоформальдегидная смола с о-нафтохинондиазидом.

СОЗДАНИЕ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Другие исследователи поставили перед собой цель, которой достичь еще сложнее. Они решили конструировать из белков и неорганических соединений такие структуры, которых в природе еще не существует. Однако до сих пор исследователи не могут точно определить, как именно белки будут собираться из аминокислот (это назвали проблемой фолдинга белка), и поэтому нельзя аналитически просчитать необходимую структуру белка. Исследователи выбрали альтернативный подход: сборку случайного белка из большого количества разных аминокислот. Это можно сделать с помощью генной инженерии бактериофагов. Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) взяли молекулу ДНК со случайной последовательностью нуклеотидов, кодирующих различные белки, и включили ее в состав ДНК бактериофага в таком участке, что белки на ДНК-доноре синтезировались на поверхности вируса. Колония таких бактериофагов была помещена в среду, к которой исследователи хотели добиться адгезии белков. Потом поверхность была промыта. После этого на ней остались только те вирусы, на поверхности которых белки были адгезивны субстрату. Отобранные вирусы поместили в новую среду и добились роста их колонии. Так опытным путем можно создать белки, которые будут соединяться с различными материалами, образуя новые структуры. Исследователи надеются создать «библиотеку» вирусов, производящих белки, адгезивные к золоту, платине, серебру, оксиду цинка, арсениду галлия и др.



ДНК-фрагменты, кодирующие различные белки, внедряют в ДНК бактериофага, который синтезирует эти белки на своей поверхности. Вирус размножается, образуя длинные нити, покрытые металлом, которые можно использовать в наноэлектронике и наносистемах.

На основе таких белков, соединенных с неорганическими веществами, можно сконструировать ряд квантовых точек, которые получают сегодня с помощью вакуумных технологий. Сборка квантовых точек с помощью гибридных белков может происходить при комнатной температуре и быть гораздо дешевле. Также такие белки могут пригодиться при создании наномашин. Исследователи из МТИ обнаружили, что бактериофаги «собираются» в длинные нити. Их внешние белки, соединенные с сульфидом цинка (или сульфидом кадмия), образуют длинные (600 нм) электропроводящие нанонити диаметром 20 нм. Нагревая полученную структуру до 350 °С, исследователи обнаружили, что бактериофаги удаляются, оставляя одну металлическую нить. Использованные в этом опыте вирусы состоят всего из шести белков, два из которых соединяются с неорганикой. Исследователи хотят продолжить эксперименты с более сложными (в белковом составе) вирусами для того, чтобы получить трехмерные проводящие структуры.

«Поделки» из молекул ДНК

Для производства белков необходима молекула ДНК определенной структуры. Но другим биомиметическим подходом является использование ДНК как строительного материала для наносистем. Эту идею развил Нэдриан Симэн, профессор химии из Нью-Йоркского университета. Он достиг того, что молекула ДНК образует двумерные и трехмерные структуры. Сама по себе молекула ДНК слишком «мягкая» для того, чтобы сформировать жесткую структуру. Но если соединить две молекулы, то полученная ДНК (DX

ДНК) будет жесткой. До 2000 года Симэн строил из этих молекул двухмерные и трехмерные структуры. Новая структура послужит базой для будущих наномеханических устройств. Недавно команда смогла сделать «шагающего» наноробота, используя оригинальный принцип: робот поочередно то присоединяет свои «ноги», состоящие из фрагментов ДНК, к базовой молекуле ДНК, то отсоединяет их от нее, продвигаясь таким образом вперед. Почему исследователи использовали именно молекулы ДНК? На это есть две причины. Первая: цепи ДНК легко соединяются друг с другом, образуя комплементарные пары. Однако две отдельные цепи ДНК просто соединятся в одну молекулу, образуя комплементарную последовательность нуклеотидов, поэтому для того, чтобы добиться эффекта присоединения/отсоединения цепей, необходимо точно контролировать последовательности нуклеотидов. Вторая: исследователи надеются, что можно будет создать более сложных ДНК-роботов в больших количествах, используя репликативную инженерию живых клеток. Каждая из ног состоит из 36 нуклеотидов (в длину) и сформирована из двух цепей ДНК, которые образуют двойную спираль. Сверху «ног» расположена еще одна упругая часть ДНК, связывающая обе «ноги» вместе. Снизу одна цепь молекулы ДНК длиннее другой, что дает возможность присоединять и отсоединять «ноги» от базовой молекулы ДНК. Конечно, как и говорилось выше, это только первые пробы биомиметики в нанотехнологиях. Не следует забывать о том, что природные наномашинки пока совершеннее и проще тех, которые планирует изготовить человек, поэтому исследователи изучат в первую очередь то, что предлагает нам природа.

НАНОМЕДИЦИНА

Наномедицина - слежение, исправление, конструирование и контроль над биологическими системами человека на молекулярном уровне, используя разработанные нанороботы и наноструктуры. Это определение было установлено ведущим первооткрывателем в этой области деятельности и аналитиком института по молекулярному производству IMM Робертом Фрайтасом. Наномедицина подразумевает применение достижений нанотехнологии при лечении и омоложении человека, включая достижение физического бессмертия. Новое междисциплинарное направление медицинской науки в настоящее время находится в стадии становления. Ее методы только выходят из лабораторий, а большая их часть пока существует только в виде проектов. Однако большинство экспертов полагает, что именно эти методы станут основополагающими в 21 веке. Так, например, Американский Национальный институт здоровья включил наномедицину в пятерку самых приоритетных областей развития медицины в XXI веке, а Национальный институт рака США собирается применять достижения наномедицины при лечении рака. Ряд зарубежных научных центров уже продемонстрировали опытные образцы в областях диагностики, лечения, протезирования и имплантирования. Классик в области нанотехнологических разработок и предсказаний, Эрик Дрекслер в своих фундаментальных работах описал основные методы лечения и диагностики на основе нанотехнологий. Ключевой проблемой достижения этих поразительных результатов является создание **машин ремонта клеток**, прототипами которых являются нанороботы, называемые также ассемблерами или репликаторами. Но если обычные нанороботы должны уметь превращать одну вещь в другую, переставляя составляющие их атомы, то медицинские нанороботы должны уметь диагностировать болезни, циркулируя в кровеносных и лимфатических системах человека и внутренних органах, доставлять лекарства и даже делать хирургические операции. Они смогут уничтожать болезни еще в момент их зарождения и возвращать молодость. Кроме того, представляется актуальным нахождение нанороботов в нервной сис-

теме для анализа ее деятельности, а также возможность корректировки собственной ДНК, например, для лечения аллергии и диабета. Медицинские нанороботы предоставят возможность оживления людей, замороженных методами **крионики**. Типичный медицинский наноробот будет иметь микронные размеры, позволяющие двигаться по капиллярам, и состоять (на базе нынешних взглядов) из углерода. Углерод и его производные выбираются по причине высокой прочности и его химической инертности. Конструкции нанороботов еще не разработаны и находятся в стадии проектирования. Их использование, порядок, время работы и вывода из организма будут зависеть от конкретных задач. Проблема биосовместимости решается за счет выбора оптимального материала и размеров наноробота. В качестве основных источников энергии предполагается использовать локальные запасы глюкозы и аминокислот в теле человека. Управление нанороботами будет осуществляться акустически путем подачи команд через компьютер. Обратную связь также возможно осуществить акустически, но можно ее создать и на основе внутренней сети с локальными данными, которые пересылаются на некоторый центральный узел связи, откуда они поступают к лечащему врачу. Лечение будет заключаться во введении нанороботов в человеческое тело для дальнейшего анализа ситуации и принятия решения о выборе метода лечения. Врач управляет нанороботами, получая информацию от активных нанороботов. Наномедицинский персонал будущего должен будет отвечать повышенным требованиям к знанию основ наномира, поскольку, к примеру, незнание законов физики может привести к гибели пациента. Категорически планируется исключить репликацию (размножение) нанороботов в теле человека для исключения фатальных последствий. Среди проектов будущих медицинских нанороботов уже существует внутренняя классификация на микрофагоциты, респироциты, клоттоциты, васкулоиды и другие. Микрофагоциты принадлежат к классу медицинских нанороботов, являющихся искусственными иммунными клетками. Они предназначены для очищения крови человека от вредных микроорганизмов, потенциально помогая в свертывании крови, транспорте кислорода и углекислого газа, и создании надстройки к естественной иммунной системе. Предполагается, что микрофагоциты будут находить в организме человека чужеродные элементы и перерабатывать их в нейтральные соединения. Причем в отличие от натуральных фагоцитов микрофагоциты будут это делать намного быстрее и чище. Респироциты являются аналогами эритроцитов (красные кровяные тельца, доставляющие кислород к клеткам), которые имеют значительно большую функциональность, чем их природные прототипы. Их внедрение позволит снизить постоянную потребность человека в кислороде, позволяя подолгу обходиться без него, и поможет людям, страдающим астматическими заболеваниями. Эти наномашинки будут анализировать сигналы от своих сенсоров для принятия акустических команд от врача. Команды по нагнетанию кислорода позволят пловцам задерживать дыхание на несколько часов, а спринтерам бежать дистанцию без глотка воздуха. Клоттоциты - искусственные аналоги тромбоцитов (клеток, участвующих в свертывании крови). Эти машинки позволят прекращать кровотечения в течение 1 секунды, будучи более эффективными своих природных аналогов во много раз. Их работа будет заключаться в быстрой доставке к месту кровотечения связывающей сети. Эта искусственная сеть будет задерживать кровяные клетки, останавливая ток крови. Время и место выброса сети клоттоциты смогут узнать либо по сигналам от врача, либо по парциальному давлению газов. При этом существует потенциальная проблема лавинообразного срабатывания всех клоттоцитов, что вызовет моментальную коагуляцию крови. Настоящая задача влечет за собой повешение требований к клоттоцитам, включая решение обратных задач – не только связывания крови, но и ее очистку от тромбов. Васкулоид - это механический протез, созданной на основе микрофагоцитов, респироцитов и клоттоцитов, и входящий в

состав проекта по созданию робототехнической крови, совместно разработанного Крисом Фениксом и Робертом Фрайтасом. Этот проект, названный "Roboblood", представляет собой комплекс медицинских нанороботов, способных жить и функционировать в теле человека, выполняя все функции естественной кровеносной системы, но только гораздо лучше и эффективнее природной. Робототизированная кровь позволит своему владельцу не бояться микробов и вирусов, атеросклероза и варикозного расширения вен, не говоря уже о тотальном лечении больных и поврежденных клеток. Помимо медицинских нанороботов, существующих пока только в головах ученых, в мире уже создано ряд технологий для наномедицинской отрасли. К ним относятся адресная доставка лекарств к больным клеткам, диагностика заболеваний с помощью квантовых точек, лаборатории на чипе, новые бактерицидные средства. Адресная доставка лекарств к больным клеткам позволяет медикаментам попадать только в больные органы, избегая здоровые, которым эти лекарства могут нанести вред. Например, лучевая терапия и химиотерапевтическое лечение уничтожая больные клетки, губит и здоровые. Решить эту проблему помогут кристаллы нанометрового размера, которые лишены этого недостатка. Лаборатории на чипе, разработанные рядом компаний, позволяют очень быстро проводить сложнейшие анализы и получать результаты, что крайне необходимо в критических для пациента ситуациях. Эти лаборатории, производимые ведущими компаниями мира, позволяют анализировать состав крови, устанавливать по ДНК родство человека, распознавать ядовитые вещества. Технологии создания подобных чипов родственны тем, что используются при производстве микросхем, но с поправкой на трехмерность. Новые бактерицидные средства создаются на основе использования полезных свойств ряда наночастиц. Так, например, применение серебряных наночастиц может быть полезно при очистке воды и воздуха, при дезинфекции одежды и спецпокрытий. В мире наблюдается бум вложений в наноотрасли. Большая часть инвестиций в наноразработки приходится на США, ЕС, Японию и Китай. Количество научных публикаций, патентов и журналов непрерывно растет. Существуют прогнозы создания уже к 2015 году товаров и услуг на один триллион долларов, включая создание до двух миллионов рабочих мест. В России Министерство образования и науки создало Межведомственный научно-технический совет по проблеме нанотехнологий и наноматериалов, деятельность которого направлена на сохранение технологического паритета в будущем мире. Для развития нанотехнологий в целом и наномедицины в частности готовится принятие федеральной целевой программы по их развитию. Данная программа будет включать подготовку целого ряда специалистов в длительной перспективе. Предполагаемые достижения наномедицины станут доступны по разным оценкам только через 40-50 лет. Однако, целый ряд последних открытий, разработок и инвестиций в наноотрасли привел к тому, что все больше аналитиков сдвигают эту дату на 10 – 15 лет в сторону уменьшения, и, быть может, это еще не предел. С помощью достижений нанотехнологии в целом и наномедицины в частности станет возможной имплантация нанороботов в человеческий мозг, что может стимулировать многократное повышение уровня интеллекта человека и скорости его мышления. Эти прогнозы, включая потенциал достижения личного бессмертия, и стали одним из главных факторов появления нового философского течения - трансгуманизма, согласно которому человеческий вид является не венцом эволюции, а промежуточным звеном. Этому виду еще только предстоит радикальное усиление своих интеллектуальных и физических возможностей.

ЗАДАЧИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАНОМЕДИЦИНЕ: ФАНТАСТИКА И РЕАЛЬНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

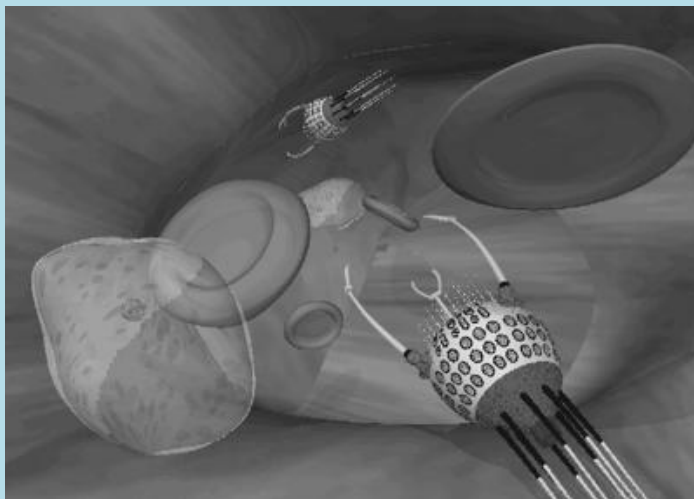
Итак, что мы ожидаем от нанотехнологий? Прежде всего создание твердых тел и поверхностей (материалов и пленок) с измененной молекулярной структурой. На практике это даст сверхпрочные металлы, ткани, пластмассы, самовосстанавливающиеся материалы. Создание новых химических веществ посредством составления молекул (без химических реакций). Это даст массу новых лекарств (в ближайшие 10-20 лет, потом они будут не нужны), которые врачи будут "конструировать", исходя из особенностей болезни и генетической неповторимости пациента. Также создание биологически совместимых полимеров, в основном на базе углерода. Это тоже потребуется для развития наномедицины. Нанороботы должны приниматься организмом как "свой" и не провоцировать атаки антител. Создание сверхпроводников нового типа, так называемых «сверххолодных». Следующая перспектива - создание коммуникационных супер-линий: нанотрубки, ДНК 4G. (ДНК 4G – обыкновенная ДНК, в которой гуаниновые основания заменены на проводящие или непроводящие участки, что позволит получить структуру с различной электропроводимостью). Создание нанокomпьютера. Дальнейшая миниатюризация и радикальное повышение вычислительной мощности. Разработка самореплицирующихся (саморазмножающихся) систем на базе биоаналогов – бактерий, вирусов, простейших. Проектирование и испытание моделей наномашин (нанодвигателей). Создание прецизионных (точных) наноманипуляторов и многое другое. Когда сказка станет явью... На основе нанотехнологии можно создать производительные агрегаты (мнемоконструкторы, персональные синтезаторы и т.п.). Это компьютер, понимающий человеческий голос плюс множество управляемых им нанороботов. Человек сможет отдать голосом (или мысленно) команду – и тот мгновенно создаст любую (!) вещь. Сказка о джине или волшебной палочке станет реальностью. У каждого человека будет такой «наноджин»! Энергия для таких устройств будет выбираться в соответствии с их применением. Ассемблеры, вероятно, будут использовать для своей работы электроэнергию. Многие «искусственные клетки», то есть фагоциты, респироциты и другие будут получать химическую энергию АТФ. Также возможно использование солнечной энергии и даже преобразование тепловой энергии молекул инертных газов в механическую или электрическую). А что же такое **наномедицина**?. По каноническому определению ведущего учёного в данной области Р. Фрейтаса, как уже было сказано, это ***слежение, исправление, конструирование и контроль над биологическими системами человека на молекулярном уровне, используя разработанные наноустройства и наноструктуры***. В действительности, наномедицины пока еще не существует, а существуют лишь нанопроекты, воплощение которых в медицину, в конечном итоге, и даст результат. Но научное проектирование и прогнозирование тоже очень важная и нужная вещь. Через несколько десятков лет, когда уже, наконец, будет работать первый ассемблер (наноробот-сборщик), знания, накопленные наномедициной, воплотятся в жизнь. И тогда... Представьте себе, что кто-то заразился гриппом. Тут же среагирует система искусственно усиленного иммунитета – десятки тысяч наноботов начнут распознавать (в соответствии со своей внутренней базой данных) вирус гриппа, и за считанные минуты ни одного вируса в организме не останется. Или... начался ранний атеросклероз, и искусственные клетки начинают чистить механическим и химическими способом пораженные сосуды. Не нужно при этом говорить, что совместно с этим происходит полное обновление всех клеток организма, и пациент всегда всегда выглядит на 20-30 лет. Так из оборонительной медицина станет наступательной и даже упреждающей. Нанороботы будут способны ремонтировать клетки. Снабжённые полным описанием че-

ловеческого тела с точностью до атома они смогут вернуть даже очень старого человека в то состояние, в котором он был в молодости. От операций на органах мы перейдём к операциям на молекулах и станем практически бессмертными. Замороженные при помощи **крионики** продолжают жить активно, так как миллиарды нанороботов смогут атом за атомом восстановить их повреждённые в процессе криоконсервирования клетки. **Когда планы и мечты воплотятся в жизнь?** По-видимому, тогда, когда будет создан первый наноманипулятор, полностью управляемый человеком или программируемый компьютером. Пока его создание планируется на 2050 год. Потом на базе наноманипулятора и уже готового к тому времени нанокomпьютера можно будет сделать первого наноробота, способного собирать любые материальные, вещественные объекты. Но первым объектом, который он произведет, будет он сам! Затем эти двое снова скопируют себя, и эти четверо снова... И так до тех пор, пока мы не получим достаточное количество нанороботов для создания нами всего задуманного, вообще всего, что не противоречит законам природы. Прогресс приобретёт экспоненциальный характер, и мы быстро приблизимся к границам возможного. Итак, середина нашего века – время, до которого нам необходимо дожить! Тогда станет возможным почти всё, на что только способно человеческое воображение. Тогда главной проблемой будет понять то, чего же мы на самом деле хотим... **Не принимайте данный текст слишком близко к сердцу! Сохраняйте чувство юмора. Мечтать не вредно!**

Потенциал и подводные камни наномедицины

Тысячелетиями человек искал волшебное средство для избавления от многочисленных болезней и ран. Многие современные исследователи верят, что нанотехнология может стать гигантским шагом человечества к этой цели. Пока не ясно, основана ли эта вера на фактах или только на надежде, но уже и правительства, и множество корпораций инвестируют огромные средства, чтобы узнать, что случится, если нанотехнология будет использована в медицине, то есть какие перспективы имеет недавно родившаяся наномедицина. Сотни миллионов, если не миллиарды долларов инвестировались правительствами, например, американским Национальным институтом рака, и частным сектором в предприятия, связанные с наномедицинскими исследованиями и нанотехнологиями в биологии. В 2008 году бюджет американской Национальной Нанотехнологической Инициативы (U.S. National Nanotechnology Initiative) выделяет более 200 миллионов долларов для Национальных институтов здоровья. Европейский союз, особенно Германия и Великобритания, а также Япония тоже вкладывают большие капиталы в эту область. Некорректно придирается к технологии, которая обещает излечивать рак до его появления и предотвратить распространение СПИДа и других инфекционных болезней. Ученые всего земного шара ищут способы заставить наночастицы улучшать человеческое здоровье. Однако остается под вопросом **токсическое воздействие** на организм человека, а также этические проблемы, которые появятся вместе с наномедициной, и на них нужно также обращать внимание, как и на выгоды. Возможные медицинские достижения, которые станут доступными с помощью нанотехнологии, простираются от диагностики до терапии. За прошлые несколько десятилетий визуализация стала решающим инструментом в постановке диагноза болезни. Магнитный резонанс и компьютерная томография — превосходные методы, но нанотехнология обещает создать чувствительные и чрезвычайно точные инструменты для диагностики *in vitro* и *in vivo* с возможностями, находящимися далеко за пределами современного оборудования. Как и при развитии разных методов диагностики, окончательная цель состоит в том, чтобы позволить врачам идентифицировать болезнь

как можно раньше. Ожидается, что нанотехнология сделает возможным постановку диагноза на клеточном и даже субклеточном уровне. **Квантовые точки**, в частности, наконец, сделали шаг от чистых демонстрационных экспериментов до реальных применений в визуализации. В последние годы ученые обнаружили, что эти нанокристаллы могут позволить исследователям изучить процессы в клетке на уровне отдельной молекулы. Это может значительно улучшить качество постановки диагноза и лечение раковых образований. Флуоресцентные полупроводниковые квантовые точки, оказывается, чрезвычайно эффективны для медицинских методов клеточной диагностики и позволяют достигать высокую разрешающую способность. Таким образом, квантовые точки могли бы совершить революцию в медицине, но в то же время, к сожалению, в большинстве своем они токсичны. Однако недавние исследования, проводимые в Университете Калифорнии, Беркли (University of California, Berkeley) показали, что защитные покрытия для квантовых точек помогут устранить токсичность. В области терапии самое существенное применение наномедицины, как ожидают, будет осуществлено при решении проблем доставки препаратов и регенеративной медицине. Наночастицы позволяют врачам доставлять лекарство точно к месту болезни, увеличивая эффективность и минимизируя побочные эффекты. Они также предлагают новые возможности для контролируемого вывода терапевтических веществ. Наночастицы также могут использоваться, чтобы стимулировать врожденные механизмы регенерации. Основное внимание здесь сосредоточено на искусственной активации и управлении взрослыми стволовыми клетками. Вот несколько достижений, которые уже стали реальностью: амфифильные белки, которые поддерживают рост клеток для восстановления поврежденного спинного мозга; покрытия областей опухоли головного мозга из магнитных наночастиц и чувствительных к ферментам частиц; зонды из наночастиц для внутриклеточной доставки препарата и экспрессии генов, и **квантовые точки**, которые обнаруживают и определяют количество биомаркеров рака молочной железы человека. В то время как новые нанолекарства открывают огромный рынок и потенциальную прибыль, доля существующих фармацевтических препаратов типа химиотерапевтических, стоящих миллиарды долларов в ежегодном доходе, сильно уменьшится. Существуют и токсикологические проблемы. Наномедицина и нанотехнология вообще являются новыми областями, и существует немного экспериментальных данных о непреднамеренных и неблагоприятных эффектах. Недостаточность знаний о том, как наночастицы будут встраиваться в биохимические процессы в человеческом теле, доставляет особое беспокойство.



Медицинский наноробот в крови (так представляют его аналитики и художники)

Наномедицина открывает новые возможности для регенерации нервных клеток

Известно, что повреждённые нейроны центральной нервной системы не регенерируют (или делают это очень-очень медленно), хотя и не до конца ясно, почему. Возможно, они сами не обладают способностью к **быстрой регенерации**, а окружающие их глиальные клетки могут препятствовать их восстановлению или недостаточно способствовать этому. На конференции NSTI Nanotech 2007 Национального Института Стандартов и Технологии были представлены два доклада, рассказывающие о применении нанотехнологий для регенерации нервных клеток. В одном докладе описывается использование магнитных наночастиц для создания **механического натяжения**, стимулирующего рост аксонов. Исследователи из Университета Майами (University of Miami) разрабатывают методы инкорпорации магнитных наночастиц в аксоны повреждённых участков ткани. В качестве моделей *in vivo* используются ткани зрительного нерва и спинного мозга, а моделью *in vitro* являются отдельные нейроны сетчатки глаза. Хотя работа всё ещё находится на весьма раннем этапе, она может оказаться важной для лечения травм спинного мозга, и стать новым шагом на пути к внедрению новой технологии в клиническую практику. В другом исследовании ориентированные нановолокна, содержащие факторы роста, использовались в качестве биоактивной матрицы, на которой могут расти нервные клетки. Учёные из Университета Калифорнии в Беркли (University of California, Berkeley) обратили своё внимание на периферийные нервы, травмы которых часто приводят к пожизненной потере трудоспособности, в частности — сенсорных и моторных функций. Самой тяжёлой формой такой травмы является разрыв нерва. Разорванный нерв может регенерировать. Для этого необходимо, чтобы нервное волокно с той стороны разрыва, которое ближе к спинному мозгу, проросло до отделённой части; обычно такая регенерация ограничена длиной повреждённого участка до нескольких миллиметров. Если разрыв имеет большую протяжённость, нервное волокно не может самостоятельно восстановиться. На сегодняшний день такие травмы лечат путём автотрансплантации здорового участка нервного волокна из другой части тела в область повреждений. Этот участок является «ориентиром» для роста повреждённого нерва. Такой метод обладает очевидными недостатками: потерей функции в донорской области, необходимостью нескольких операций, а часто найти подходящий нерв для трансплантации оказывается просто невозможно. Существуют различные синтетические «протезы», но они работают хуже, чем автотрансплантация; они способны соединять разрывы длиной до 4 см. Группа из Беркли разработала новый метод, потенциально способный заменить синтетические волокна. Материал состоит из ориентированных полимерных **нановолокон**, сопряжённых с биохимическими веществами (факторами роста). Таким образом, новый материал направляет рост нерва не только физически, но и биологически. Метод был протестирован на культурах нейронов крысы. На неориентированных подложках рост нервных клеток не наблюдался, в то время как на ориентированных клетки не только росли, но рост этот происходил в том же направлении, в котором были ориентированы нановолокна. Добавление же биохимических веществ усилило этот рост в 5 раз: за 5 дней нервные волокна проросли на 4 мм. Для того, чтобы новую технологию можно было применять в клинической практике, исследователи также разработали новый метод производства нановолокон, основанный на **электроспиннинге** и позволяющий изготавливать подложки из ориентированных волокон нужной длины и толщины. Доклинические испытания новой технологии лечения на животных начнутся в мае 2008 года, а сама технология патентуется Университетом Калифорнии и была лицензирована компанией NanoNerve, Inc.

Медицинский наноробот общего применения

Какое строение должен иметь наноробот?

Рисунок на странице 34

Так как основная функция наноробота — передвижение по кровеносной системе человека, то он должен иметь мощную навигационную систему. Устройству необходимо иметь несколько типов различных сенсоров для мониторинга окружающей среды (внутренней среды тела человека), навигации, коммуникации и работы с отдельными молекулами. Также нанороботу необходима мощная транспортная система, доставляющая отдельные атомы и молекулы от хранилищ к наноманипуляторам и обратно. Для работы с пораженными структурами устройство будет оборудовано набором телескопических наноманипуляторов разного применения. Материал, из которого будет изготовлен наноробот — алмазоид или сапфирид. Это обеспечит биосовместимость человека и большого количества наномашин. Также необходимо наличие приемо-передаточных устройств, позволяющих нанороботам связываться друг с другом. И, наконец, для удержания крупных объектов необходимы телескопические захваты. На основании выдвинутых требований аналитик Юрий Свириденко построил модель медицинского наноробота общего применения. В идеальном случае, это устройство будет способно «ремонтировать» поврежденные клетки, ткани; производить диагностику и лечение раковых заболеваний и картографировать кровеносные сосуды; производить анализ ДНК с последующей ее корректировкой; уничтожать бактерии, вирусы, и т.п. В соответствии с требованиями, максимальный размер устройства не должен превышать $1 \times 1 \times 3$ микрона (без двигательных жгутиков). На предыдущей картинке представлен вид наноробота, выполненного из алмазоида. Электромагнитные волны, которые смогут распространяться в теле человека, не затухая, будут по длине волны сравнимы с нанороботом. Поэтому приемно-передающие антенны будут иметь вид диполей, выступающих за пределы корпуса. Наноманипуляторы, механические захваты и жгутики должны быть телескопическими и при необходимости должны складываться в корпус робота для того, чтобы робот смог лучше передвигаться в кровеносном русле. Иммунная система в основном реагирует на «чужеродные» поверхности. Размер наноробота также играет важную роль при этом, так же как и мобильность устройства, шероховатость поверхности и ее подвижность. Ряд проведенных экспериментов подтвердил, что гладкие алмазоидные структуры вызывают меньшую активность лейкоцитов и меньше адсорбируют фибриноген. Поэтому кажется разумным надеяться, что такое алмазоидное покрытие («организованное», т.е. нанесенное атом-за-атомом, с нанометровой гладкостью), будет иметь очень низкую биологическую активность. Благодаря очень высокой поверхностной энергии алмазоидной поверхности и сильной ее гидрофобности, внешняя оболочка роботов будет полностью химически инертна. Для такого наноробота, можно будет использовать нанокomпьютер, производящий $\sim 10^6$ - 10^9 операций в секунду для исполнения своей работы. Это на 4—7 порядков меньше вычислительной мощности человеческого мозга, составляющей $\sim 10^{13}$ операций в секунду. Так что этот наноробот не будет обладать искусственным интеллектом. 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. В Интернете выложено достаточное количество рисунков, изображающих

наноробота в кровеносной системе и наноробота, ремонтирующего клетку *in vivo* (автор – Юрий Свириденко). Для связи нанороботов друг с другом, а также для формирования навигационной системы полезно будет использовать еще один тип нанороботов — коммунноцитов, которые будут работать усилительными станциями.

Микрофагоциты – искусственные иммунные клетки. **Математическое моделирование разрабатываемых медицинских нанороботов.**

Люди часто спрашивают о примерах тех уникальных возможностей, которые нанороботы могут принести медицине. Правда ли, что некоторые простые вещи, исполняемые нанороботами, не могут быть реализованы с помощью биотехнологий? Респироциты — искусственные красные клетки крови — один из ответов на этот вопрос. Их функциональность во много раз превосходит существующие эритроциты: это и возможность переносить больше кислорода, чем природный аналог, и высокая долговечность, и возможность перепрограммирования (что вообще в данное время не может реализовать биотехнология), и высокое быстроедействие. В живых системах быстроедействие играет основную роль. Наномедицина предлагает мощные инструменты для борьбы с человеческими заболеваниями и для потенциального улучшения человеческого организма. Выполненные из алмазоида медицинские нанороботы смогут, возможно, внести улучшения возможностей нашего организма по сравнению с природными. Клоттоциты, например, заменяя «родные» человеческие тромбоциты достигают прекращения кровотечения (искусственный быстроедействующий гемостазис) за 1 секунду, причем кровотечение может быть довольно обширным (физическое повреждение тканей) или небольшим внутренним. При этом концентрация искусственных тромбоцитов меньше натуральных в 100 раз. То есть, клоттоциты в 10000 раз эффективней природного аналога, т.к. время нормального тромбогенеза колеблется от 5 до 17 минут. Рассмотрим далее еще одну составляющую «механизированной крови» — механических фагоцитов или микрофагоцитов. На самом деле, микрофагоцитами можно назвать целый класс нанофагоцитов. Различные представители этого класса выполняли бы различные функции в организме — от линии первого реагирования в крови (внутривенные) до внутритканевых и внутрицереброспинальных. Но общая цель подобных устройств — уничтожение микробиологических патогенов, найденных в организме человека, с использованием метода «перевари-и-выброси». Сепсис, известный также как заражение крови — это наличие в крови патогенных микроорганизмов, анаэробной гнилостной инфекции. Если размножение микроорганизмов не контролировать, то инфекция будет прогрессировать. Бактеремия — наличие бактерий в кровеносной системе человека. Хотя в крови и много веществ, которыми могут питаться бактерии, однако кровь обычно не содержит микроорганизмов (бактерий). Основная противомикробная защита кровеносной системы — циркулирующие нейтрофилы и моноциты (белые кровяные тельца), способные к фагоцитозу (захвату и перевариванию других клеток) и продукции иммуноглобулина, формируя иммунный ответ. Однако, несмотря на это, в кровеносной системе человека может присутствовать небольшое количество бактерий. Чистка зубов, например, вызывает небольшое их движение в гнездах, что приводит к попаданию микроорганизмов, находящихся в ротовой полости, в кровеносную систему, не говоря уже про кариес. Бактерии также могут попадать в кровь через раны на коже, деснах, языке. Бактерии также попадают в кровь в ходе хирургических операций, лечения зубов, а также после инъекций, биопсии, анализа крови и даже при замене клапана сердца на искусственный. Эти бактерии обычно уничтожаются лейкоцитами (а также ретикулоэндотелиальными фа-

гоцитами печени, легких и лимфатической системы). Однако некоторое количество вирулентных (вредных для человека, смертоносных) бактерий все же могут обойти естественную защиту. Центр Здравоохранения утверждает, что около 25000 граждан США ежегодно умирают от бактериального сепсиса. В настоящее время используют ряд антибиотиков для подавления сепсиса, принимая их в количестве нескольких миллиграмм в день. Такой метод лечения длится иногда недели или даже месяцы для того, чтобы уничтожить патогенные бактерии, такие, как, например, *Pseudomonas aeruginosa* или *Salmonella*. Комплекс наноустройств, способный быстро очищать кровь человека от патогенов при сравнительно небольшой концентрации нанороботов, был бы желательным дополнением в современном терапевтическом арсенале. Такой робот назовем *микрофагоцитом*, или искусственным механическим белым кровяным тельцем. **Микрофагоцит** — это сфероидальное наномедицинское устройство, состоящее из 610 миллиардов точно расположенных атомов, плюс около 150 миллиардов молекул газа или воды, когда резервуары устройства будут заполнены. Размеры наноробота — 3,4 мкм в диаметре вдоль главной оси, и 2,0 мкм вдоль оси, перпендикулярной к главной. Такие размеры дают наноустройству возможность беспрепятственно проникать в мельчайшие капилляры, диаметр которых около 4 мкм. Его сравнительно большой для наноустройства объем (12 мкм³) дает возможность разместить внутри наноробота два пустых внутренних резервуара объемом 4 мкм³. Наноустройство потребляет 100—200 пВт (пикоВатт) мощности при работе и может полностью «переварить» микробов, находящихся во внутреннем резервуаре наноустройства со скоростью 2 мкм³ за 30-секундный цикл. Как и в предыдущих проектах нанороботов Роберта Фрайтаса, для того, чтобы гарантировать надежную работу наноустройства, микрофагоцит спроектирован с десятикратным запасом по всем основным характеристикам, исключая большие пассивные структурные элементы (такие, например, как корпус). Масса «пустого» устройства — 12,2 пикограмм. Опишем работу наноустройства. В течение каждого цикла операций, выполняемых устройством, патогенная бактерия прилипает к поверхности наноробота, как муха на липкую ленту, благодаря специальным обратимым «присоединительным гнездам». Затем телескопические наноманипуляторы, изготовленные по примеру «руки робота», выдвигаются из специальных гнезд на поверхности микрофагоцита и, достигнув жесткого прикрепления к мембране бактерии, транспортируют микроорганизм к входному порту на передней части устройства, где бактерия оказывается в «танаторезервуаре» объемом 2 мкм³. После интенсивного механического перемазывания бактерии (или бактерий) органические остатки выдавливаются специальным поршнем в «дигестальный» резервуар объемом 2 мкм³, где остатки перевариваются с помощью запрограммированной последовательности 40 специально сконструированных энзимов (ферментов), которые сменяются около шести раз. В результате полученные остатки будут представлять собой простые аминокислоты, мононуклеотиды, глицерин, воду, жирные кислоты и простые сахара, абсолютно безвредные для организма человека. Далее они выбрасываются в кровеносную систему пациента. Все эти операции происходят в течение 30-секундного цикла. Этот процесс под кодовым названием «перевари-и-выброси» практически идентичен процессам переваривания и фагоцитоза, которые используют натуральные фагоциты. Однако искусственный процесс фагоцитоза будет намного быстрее и чище — продукты механических микрофагоцитов не будут содержать вредных для человека веществ. Например, всем известные макрофаги после фагоцитоза патогенных микроорганизмов выбрасывают в кровь биологически активные вещества, в то время как продукты фагоцитоза микрофагоцитов будут биологически неактивными и не представляющими угрозу для человека. Обычные фагоциты больше по объему в 100—1000 раз, чем искусственные, при этом они потребляют на фагоцитоз столько же энергии.

Например, изменение теплоэнергии от обычных человеческих нейтрофилов при фагоцитозе составляет 19 пиковатт. Это число растет с увеличением частиц, которые захвачены фагоцитом. Т-лимфоцит объемом около 400 мкм^3 при иммунном ответе потребляет около 45 пиковатт. Захват микроорганизмов натуральными фагоцитами длится недолго — порядка нескольких минут; зато полный цикл переваривания и экскреции может длиться часами. В то время как макрофаги могут захватить и переварить около 25% их объема в час, механические микрофагоциты могут обработать более 2000% своего объема в час. Это значит, что механические фагоциты могут быть эффективнее обычных в примерно в 80 раз. Другими словами, аналогичный объем нанороботов может переварить патогенные бактерии в 80 раз быстрее натуральных фагоцитов. Жизненный цикл многих естественных фагоцитов (например, нейтрофилов), колеблется от нескольких часов в крови или нескольких дней в тканях. Исследователи предложили простую математическую модель фармакокинетических свойств определенной дозы устройств, инъецированных в человеческую кровеносную систему. Результаты математической модели были следующими: при терапевтической дозе наноустройств в 1-теработ (10^{12} устройств) можно устранить легкую бактеремию ($0,1 \times 10^6$ патогенных единиц (ПЕ) на 1 мл) от $5,4 \times 10^8$ ПЕ в кровеносной системе человека до <1 ПЕ за 460—5400 секунд (8—90 мин), если при этом необходимо 1—10 столкновений бактерии с микрофагоцитом для достижения «прилипания» патогена к поверхности наноробота. Средняя бактеремия (100×10^6 ПЕ/мл) будет устранена за 620—7300 сек (10—120 мин). При этом необходимо заметить, что 1-теработ внутривенная доза ($\sim 12 \text{ см}^3$ инъекция) микрофагоцитов составит концентрацию наноустройств в крови взрослого человека (нанокрит) $N \sim 0.2\%$, выделяя тепловой энергии около 100—200 Вт, что составляет максимальную терапевтическую дозу по теплогенному действию на организм для медицинских наноустройств. В то время как микрофагоциты могут полностью устранить сепсис за минуты или часы, естественные защиты организма (даже подкрепленные антибиотиками) могут достичь того же результата за недели или даже месяцы. Поэтому иммунитет, построенный на микрофагоцитах, будет в 1000 раз более быстродействующим, чем естественные защиты. С минимальными дополнениями к конструкции микрофагоцит может быть использован для лечения боевой токсемии — распространения в человеческом теле патогенов, вырабатываемых бактериями. Например, у подопытных обезьян наблюдался септический шок с использованием бактерии *E. coli* с концентрацией $4,25 \times 10^6$ ПЕ/мл. При этом концентрация патогенного бактериального липополисахарида (ЛПС) в их крови выросла от 0,076 нанограмм/мл (нормальное количество) до максимальной концентрации 1,130 нг/мл. При проведении другого исследования, уровень эндотоксина, в течение бактериальной инфекции, вырос от 0,2 до 2 нг/мл в крови подопытной свиньи. Для устранения ~ 2 нг/мл ЛПС эндотоксина из крови, необходимо изолирование и ферментная переработка $\sim 8 \times 10^{14}$ ЛПС молекул из кровяного объема в $\sim 5400 \text{ см}^3$, или около ~ 800 ЛПС молекул на 1 наноустройство, предполагая терапевтическую дозу в 1 теработ модифицированных нанофагоцитов. Высокая смертность (от 30% - 50%) связана с реакцией пациента на ЛПС, которые провоцируют производство цитокинов IL-1 β и IL-6, которые вызывают неконтролируемое воспаление в тканях и дисфункцию органов. Мы уже упоминали, что малые концентрации ($\sim$ нг/мл) молекул ЛПС производятся бактериями живущими в человеческом теле, однако уничтожение бактерий с помощью антибиотиков оставляет в крови большое количество ЛПС (до ~ 105 нг/мл). Использование искусственных микрофагоцитов предполагает полное «переваривание» бактерий, включая уничтожение мембранных ЛПС. Поэтому микрофагоциты представляют антимикробную терапию, не производящую септического шока. Если перед внедрением микрофагоцитов в кровь пациента она уже содержит большое количество воспалительных цитокинов, то необходимо

произвести первичную противовоспалительную терапию, внедрив в кровь пациента наноустройства класса респирицитов (например, фармацитов) для удаления молекул цитокинов. Внутривенная терапевтическая доза фармацитов микронных размеров в размере 1-теработ (каждый наноробот имеет 10^5 молекулярных сортирующих роторов и резервуар объемом 0.5 мкм^3 для хранения цитокинов) может понизить содержание цитокинов в крови от 100 нг/мл ($\sim 3 \times 10^{-9} \text{ молекул/нм}^3$) до нормального уровня $\sim 10 \text{ пг/мл}$ ($\sim 3 \times 10^{-13} \text{ молекул/нм}^3$) в течение ~ 200 секунд, используя для хранения молекул $\sim 0.1\%$ от объема резервуаров наноустройств. Удаление $\sim 10^5 \text{ нг/мл}$ молекул ЛПС займет $\sim 100\%$ объема резервуаров фармацитов. Микрофагоциты будут также полезны при лечении менингитов цереброспинальной жидкости и респираторных заболеваний. Нанороботы также могут устранить такие небактериальные патогены, как вирусы, грибки, микроскопические паразиты и пр. Вне человеческого тела микрофагоциты могут служить для очищения биологически опасных сред и для манипуляций с органическими токсическими материалами.

Тематика научно-познавательных работ и учебно-исследовательских проектов по нанотехнологиям, предлагаемая лицеистами 8 – 11 классов биолого-химического профиля (а также лицеистам других профильных классов) ГОУ лицея №1525 «Воробьевы горы», учащимся ГДО Центра экологического образования МГДД(Ю)Т (и учащимся учебных групп других отделов Дворца) с указанием руководителей и научных консультантов (к кому обращаться по данной теме):

1) История нанотехнологий и перспективы их развития. Структура nanoиндустрии XXI века. Руководители и консультанты (к кому обращаться по данной теме?):
2) Проблема построения nanoиндустрии в России как важнейший национальный проект. Государственная корпорация нанотехнологий.
3) Проблема создания российских технопарков – современных научно-исследовательских центров по нанотехнологиям. Дискуссии о месте России в мировом нанотехнологическом буме.
4) Наночастицы и nanoобъекты, их разнообразие и применение. Границы «наномира».
5) Проблемы самоорганизации наночастиц. Супрамолекулярная химия и нанотехнологии.
6) Проблемы образования агломератов наночастиц. Использование веществ-дисперсантов, противостоящих «слипанию» наночастиц.
7) Примеры особенных свойств различных веществ, взятых в nanoколичествах по сравнению с макроколичествами тех же веществ.
8) Дискуссии о возможности механического манипулирования молекулами и создания самовоспроизводящихся манипуляторов для этих целей.
9) Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия между молекулами и механосинтез.
10) Сканирующие туннельные микроскопы (СТМ) – классический пример достижений нанотехнологий. Квантово-механический туннельный эффект (КМТЭ).
11) Атомно-силовая микроскопия и развитие нанотехнологий.
12) Идеи Ричарда Фейнмана о нанотехнологиях и их реализация в начале XXI века.

13) Эрик Дрекслер и его книга «Машины творения» (1986). Популяризация концепции создания и развития индустрии нанотехнологий.
14) Создание различных наноплёнок (толщиной около 10 нм) и их использование в некоторых традиционных и новых отраслях. Сверхтонкие плёнки органических материалов и производство солнечных батарей.
15) Проблемы изучения взаимодействия искусственных наночастиц с природными объектами наноразмеров и необычных свойств этих комплексов.
16) Методы ионного и молекулярного наслаивания – передний край нанонауки.
17) Вискеры – нанообъекты, получаемые методом молекулярного наслаивания и введением веществ в цилиндрические микропоры.
18) Метод микролитографии и развитие нанотехнологий.
19) Биоорганическое материаловедение на основе нанотехнологий – один из самых важных технологических приоритетов.
20) Проблемы создания саморегулирующихся и самовоспроизводящихся наносистем.
21) Метод создания структур с помощью квантовых точек – путь к саморегулирующейся неорганической материи.
22) Нанотехнологии и транзисторы нового поколения.
23) Нанокompозиты – материалы, полученные введением наночастиц в какие-либо матрицы.
24) Национальные проекты и программы разных стран по развитию и использованию нанотехнологий. Японский госпроект «Атомная технология» (1991-2007гг.).
25) Нанoeлектроника и биоелектроника: фантастика и реальность, проекты и перспективы.
26) Проект «Геном человека» и развитие нанотехнологий. Что такое геномика?
27) Нанотехнологии и регенерация повреждённых клеток человеческого организма.
28) Новые поколения лекарственных препаратов и методы лечения на основе нанотехнологий.
29) Tailor-made therapy – система лечения на принципах наномедицины («индивидуальная терапия», «лечение по заказу»).
30) Нанотехнологии и полная победа над раком к середине XXI. <i>Руководители и консультанты (к кому обращаться по данной теме?):</i>
31) Фуллерены – новая аллотропная модификация углерода, их разнообразие, история открытия и значение для развития нанотехнологий. «Мячеобразные» фуллерены.
32) Углеродные нанотрубки и их значение для развития индустрии нанотехнологий.
33) Нанорецепторы (наносенсоры) и наноманипуляторы: проекты и перспективы, фантастика и реальность. Молекулярные сортирующие роторы (MCP).
34) Управляемый наномеханосинтез – составление сложных молекул с заданными свойствами непосредственно из атомов путём механического приближения без химических реакций.

35) Проблема создания наноманипуляторов для обеспечения процессов механосинтеза.
36) Нанороботы-сборщики (наноботы-ассемблеры) и управление их работой при помощи макро- и нанокомпьютеров в ходе механосинтеза: проекты и перспективы.
37) Нанотехнологическая альтернатива энергоресурсам – совершенствование способов преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию.
38) Использование зондовой микроскопии на начальных этапах развития нанотехнологии для перемещения отдельных молекул и атомов с целью механосинтеза, недостатки и трудности этого подхода.
39) Сборочные автоматизированные комплексы для построения макромолекулярных объектов на основе системы «нанокомпьютер – наноманипулятор» по трёхмерной сетке расположения атомов: проекты и перспективы, фантастика и реальность.
40) Философские и технологические аспекты проблемы создания «дубликатов материи».
41) Наноботы-дизассемблеры – атомно-молекулярные деструкторы в нанотехнологических процессах.
42) Эволюция машин и механизмов в связи с развитием нанотехнологий.
43) Трансформация различных видов энергии с помощью механоэлектрических нанопреобразователей (МЭНП). Нанотехнологии и получение электроэнергии от солнечного излучения к высоким КПД (около 90%).
44) Нанотехнологии и глобальный экологический мониторинг.
45) Нанотехнологии и утилизация бытовых отходов, промышленных и транспортных загрязнителей окружающей среды.
46) Медицинские нанороботы и проблемы увеличения продолжительности жизни людей.
47) Проблема создания «умных» материалов, способных к мультимедиа-общению с пользователем, как одно из направлений развития nanoиндустрии.
48) Проблемы создания нанотехнологических сверхпрочных, сверхлёгких и негорючих материалов на основе алмазоида.
49) Многозвенные роботы-амёбы для освоения малопригодных для жизни земных ландшафтов, а также поверхности Луны и Марса.
50) Нанотехнологии, глобальный и локальный погодно-климатический контроль.
51) Нанотехнологические нейроинтерфейсы и имплантаты – решение проблемы непосредственного полноценного взаимодействия пользователя с компьютерами через нервную систему: проекты и перспективы, фантастика и реальность.
52) Новые поколения прозрачных и гибких дисплеев на основе нанотрубок или квантовых точек.
53) Квантовые компьютеры и спинтроника как продукты развития нанонауки и nanoиндустрии.
54) Риск использования наноматериалов при производстве товаров массового потребления.

55) Негативное воздействие некоторых наноматериалов на лёгочную ткань, сердечно-сосудистую систему, печень и почки.
56) Перспективы развития бионических нанотехнологий. «Нанотехнологические эффекты» в живой природе.
57) Графен и создание алмазных механосинтетических устройств.
58) Геомодификаторы трения – реальная нанотехнологическая разработка.
59) Профессии и специальности, связанные с нанотехнологиями. Как стать нанотехнологом?
60) «Наноапокалипсис» – алармистская концепция будущего с глобально-деструктивными тенденциями развития нанотехнологий. Захват Земли и освоенных планет нанороботами-дизассемблерами. «Серая слизь». Философское осмысление проблемы.

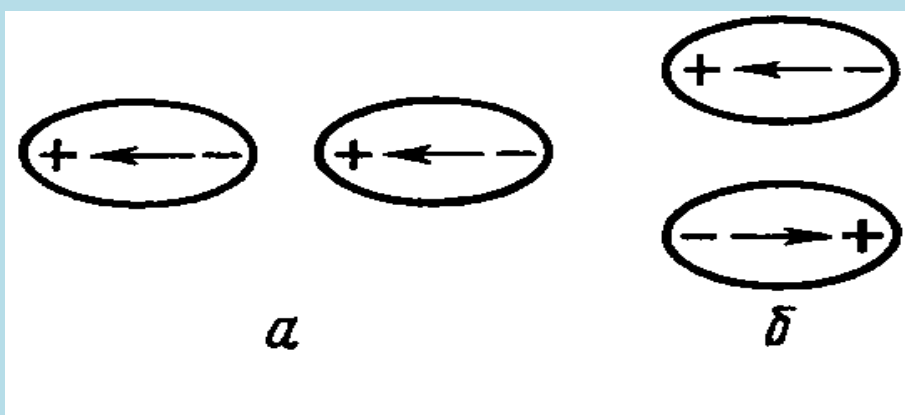
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМ

Силы Ван-дер-Ваальса: ориентационные, индукционные и дисперсионные взаимодействия

В отличие от химической связи (ковалентной, донорно-акцепторной, ионной) **водородная и ван-дер-ваальсовы связи**, как правило, не настолько сильны. Однако они оказывают значительное влияние на многие физические свойства веществ (теплота испарения жидкости либо теплота возгонки кристалла, температуры плавления и кипения). А также на количественные характеристики некоторых химических реакций, такие как тепловой эффект и энергия активации (температура активации либо минимальная для активизации реакции частота излучения) образования и диссоциации молекулярных комплексов, молекул и сложных ионов. Именно **ван-дер-ва-альсовы** и водородные взаимодействия являются причиной как коагуляции коллоидных растворов, так и их устойчивости, а также физической основой абсорбции и адсорбции, что уже сейчас применяется при проектировании очистных сооружений. Как известно, все химические вещества состоят из молекул, в свою очередь состоящих из электрически заряженных частиц, электронов и атомных ядер. Вследствие того, что в молекуле положительные и отрицательные заряды разделены и постоянно находятся в относительном движении, в каждый момент времени подавляющее большинство молекул находятся в виде электрических диполей. **Взаимодействие возникших вследствие тех или иных причин дипольных моментов молекул и называется связью Ван-дер-Ваальса.** В зависимости от происхождения дипольного момента взаимодействующих молекул ван-дер-ваальсовы притяжения разделяют на **ориентационные, индукционные и дисперсионные**. Притяжение между молекулами принимает существенные значения уже на довольно больших расстояниях ($\sim 10\text{\AA}$); однако же, взаимодействие Ван-дер-Ваальса включает эффекты не только притяжения, но и отталкивания, эти силы играют в нашей жизни не менее

важную роль т.к. не позволяют всем молекулам слипнуться в единый материальный ком, в гигантскую глобулу. То, что плотности жидкостей и кристаллов имеют вполне конечную величину, указывает на одновременное существование отталкивания между молекулами; не будь отталкивания, молекулы при сближении сливались бы в одно целое, и плотность возрастала бы практически не ограничено. В конденсированном состоянии (жидкости или кристалла), построенном из молекул, притяжение сближает частицы до расстояния, на котором силы притяжения и отталкивания равны по величине. Таким образом, различие между химическими и межмолекулярными (ван-дер-ваальсовыми и водородными) связями в первую очередь – количественное. Природа же сил в обоих случаях одна и та же – электрическая. Расстояние между молекулами в жидкостях и кристаллах $\sim 3\text{--}5\text{\AA}$, а энергия взаимодействия $\sim 1\text{--}5$ кДж/моль для сил Ван-дер-Ваальса, что в 100 раз меньше энергии химической связи (водородные связи как по энергии, так и по длине связи близки как к ван-дер-ваальсовым, так и к химическим связям). При образовании физической (межмолекулярной) связи энергия системы понижается на величину энергии возмущения, называемую энергией межмолекулярного взаимодействия; аналогично тому, как энергия системы понижается на величину энергии возмущения, называемую тепловым эффектом реакции, при образовании химической (ковалентная или донорно-акцепторная) связи. Именно на разрыв физических связей тратится теплота парообразования или сублимации, совершение работы расширения системы занимает в теплоте парообразования ничтожно малую долю. Однако между физическими и химическими связями все же есть одно принципиальное отличие – насыщаемость химических связей в противовес абсолютной ненасыщаемости ван-дер-ваальсовых и ионных (поэтому их часто тоже относят к физическим связям) взаимодействий. Водородные связи в отличие от ван-дер-ваальсовых (и ионных) взаимодействуют не со всеми молекулами конденсированной фазы (кристалл, расплав), а лишь с ближайшими соседями; однако в отличие от химических связей число ближайших соседей ограничено нестрогим и может незначительно варьировать в пределах одной фазы, поэтому, как правило, водородные связи считают **ненасыщаемыми** и относят к физическим, а не к химическим связям. Однако, водородные связи все таки обладают насыщаемостью (хотя и нечетко выраженной). Поэтому в медицинской литературе при рассмотрении химии высоко организованных органических молекул и молекулярных комплексов (учитывая, что водородные связи примыкают к химическим также по значениям длины и энергии связи) водородные связи часто рассматривают наравне с химическими связями. Ван-дер-Ваальс сделал предположение о **дальнодействующем характере сил притяжения**. В случае дальнодействия можно считать, что при переходе от одной конфигурации молекул к другой их потенциальная энергия не изменится, они находятся в среднем поле соседей с постоянной плотностью энергии. Ван-дер-Ваальс в 1873 году одним из первых указал на наличие **нехимического межмолекулярного взаимодействия** в **аморфных** состояниях вещества и разделил это взаимодействие на **даль-**

нодействующее притяжение и близкодействующее отталкивание. Как показывает квантовомеханический расчет, энергия дальнегодействующего межмолекулярного взаимодействия состоит из так называемой *электростатической* и энергии возмущения второго порядка – *индукционной* и *дисперсионной*. Электростатическое взаимодействие возникает между дипольными моментами молекул, между ионами и диполями в растворах или сплавах. Для нейтральных молекул в электростатическом взаимодействии важно так называемое *ориентационное* взаимодействие постоянных дипольных моментов молекул. **Ориентационное, индукционное и дисперсионное** взаимодействия – три важнейшие составляющие ван-дер-ваальсовых сил притяжения. Силы Ван-дер-Ваальса называют дальнодействующими, так как энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия довольно медленно спадает с расстоянием. Рассмотрим ориентационные взаимодействия Ван-дер-Ваальса, так называемый **эффект Кезома**.



Если два диполя расположены на одной прямой и одинаково ориентированы (см. рис. а), то они притягиваются с силой обратно пропорциональной третьей степени расстояния между ними, установка диполей в "хвост". Аналогичная сила действует между двумя противоположно направленными диполями, расположенными на параллельных прямых, на кратчайшем расстоянии друг от друга (см. рис. б), установка диполей "один под другим" (антипараллельная установка диполей). В обоих случаях они ориентируются так, чтобы энергия системы стала минимальной (см. рис.). Если диполи ориентированы не так, как показано на рисунке, то между диполями кроме силы радиального взаимодействия (притяжение либо отталкивание) возникает крутящий момент. Для полярных молекул вклад ориентационного взаимодействия в энергию межмолекулярного взаимодействия жидкостей можно оценить, не зная конкретных расстояний между молекулами. В полярном диэлектрике на молекулу действует эффективное поле, создаваемое всеми остальными молекулами. Ориентационный вклад в энергию сцепления полярных жидкостей весьма существенен, но все же, как правило, меньше вклада дисперсионных сил. Это объясняется тем, что по сравнению с общим случаем электростатических взаимодействий (например, ионного взаимо-

действия) аддитивностью ориентационных взаимодействий можно пренебречь, т.к. взаимная ориентация двух диполей мешает им ориентироваться относительно третьего. Поэтому эффект ориентационного взаимодействия уступает действию значительно более аддитивных вследствие гибкости дисперсионных связей дисперсионных взаимодействий. Вклад ориентационного взаимодействия в энергию сцепления полярных жидкостей является преобладающим лишь для наиболее полярных молекул, например для воды. Ориентационные взаимодействия Ван-дер-Ваальса играют определяющую роль в процессах электролитической диссоциации. Для наиболее полярных веществ связи Ван-дер-Ваальса ориентационной природы вносят наиболее существенный вклад в значения энергии и температуры плавления и сублимации (или кипения). Ориентационные взаимодействия Ван-дер-Ваальса, наряду с индукционными взаимодействиями, используются в абсорбционных и адсорбционных пылеочистных сооружениях (поэтому в качестве абсорбатов и адсорбатов в пылеочистных сооружениях практически всегда используются именно сильнополярные материалы... Индукционные взаимодействия Ван-дер-Ваальса по-другому называются **эффектом Дебая**. Молекула, обладающая постоянным дипольным моментом, наводит в другой молекуле, неполярной или полярной, так называемый индуцированный дипольный момент. Индуцированный дипольный момент имеет то же направление, что и линии напряженности электрического поля постоянного диполя вызвавшего появление наведенного дипольного момента у поляризуемой молекулы или радикала в точке нахождения поляризуемой молекулы (или соответственно радикала). Взаимодействие постоянного диполя одной молекулы (радикала, сложного иона) и наведенного им диполя второй молекулы (или вообще группы атомов) понижает потенциальную энергию системы из двух молекул и упрочняет систему. Энергия индукционного взаимодействия, как и ориентационного, убывает пропорционально шестой степени расстояния, но индукционное взаимодействие не зависит от температуры. Последнее связано с тем, что ориентация наведенного дипольного момента не может быть произвольной, она однозначно определяется направлением и положением наводящего диполя в пространстве. Величина энергии индукционного взаимодействия тем значительнее, чем выше поляризуемость поляризуемых молекул. Индукционное взаимодействие наблюдается при образовании гидратов благородных газов, в растворах полярных веществ, в неполярных растворителях (например, ацетона в тетрахлорметане) и т.п., но существенно только для молекул со значительной поляризуемостью; к ним, в первую очередь, относятся молекулы с сопряженными связями. Индукционное взаимодействие не аддитивно. Это становится ясным, если рассмотреть неполярную частицу в поле двух симметрично расположенных диполей. Каждый из них, действуя сам, вызвал бы индукционный эффект, но совместное их действие взаимно уравновешивается, в результате чего дипольный момент у неполярной частицы не наводится, а, следовательно, энергия системы в рассматриваемом случае индукционным взаимодействием не понижается. В следствие нераспространенности легко

поляризуемых молекул и неаддитивности индукционных взаимодействий эффект Дебая никогда не бывает доминирующим по сравнению с эффектом Кезома (ориентационные взаимодействия) и с эффектом Лондона – дисперсионными взаимодействиями Ван-дер-Ваальса. Существуют, однако, такие молекулы у которых нет не только дипольного электрического момента, но и электрических моментов более высокого порядка; это – сферически симметричные молекулы, прежде всего молекулы идеальных газов. Однако, и благородные газы при охлаждении сжижаются, а при дальнейшем охлаждении (гелий – только под повышенным по сравнению с атмосферным давлением) кристаллизуются. Силы, приводящие к конденсации идеальных газов, называются дисперсионными ван-дер-ваальсовыми силами. Дисперсионные взаимодействия Ван-дер-Ваальса играют большую роль при взаимодействии и между всеми другими молекулами, без исключений. Каждый из указанных эффектов имеет строгое квантово-механическое определение, но если ориентационный и индукционный эффекты можно понять также на основе представлений электростатики, то дисперсионное взаимодействие объяснимо только на основе квантовой механики. Грубое модельное представление о дисперсионном взаимодействии между двумя атомами благородного газа можно составить, рассматривая протоны ядра атома и движущиеся вокруг ядра электроны как положительный и отрицательный полюсы вращающихся вокруг центра атома мгновенных электрических диполей. Поскольку направление этих диполей меняется с частотой $\nu \sim 10^{15}$ циклов в секунду, вследствие чего атом не обладает дипольным моментом постоянного направления, в среднем по времени его дипольный момент равен нулю. Однако, при встрече двух атомов их мгновенные дипольные моменты ориентируются друг относительно друга, и их направления изменяются "в такт". Эта корреляция между направлениями мгновенных дипольных моментов атомов (или обладающих электронами ионов) уменьшает потенциальную энергию системы на величину, называемую энергией дисперсионного взаимодействия (или величиной эффекта Лондона). Сущность эффекта Лондона заключается в том, что электроны в атомах и молекулах можно уподобить колеблющимся около ядра частицам — осцилляторам. Любой осциллятор, согласно современным квантовомеханическим представлениям, даже при абсолютном нуле температуры совершает так называемые нулевые колебания. При сближении двух осцилляторов и их ориентации в такт происходит нечто подобное соединению двух маятников упругой нитью. Дисперсионное взаимодействие имеет исключительно квантовомеханическую природу — понижение суммарной энергии нулевых колебаний осцилляторов. Лондон, разработавший теорию дисперсионного взаимодействия, показал, что величину энергии нулевых колебаний осциллятора можно заменить потенциалом ионизации. Так как потенциалы ионизации молекул колеблются в нешироких пределах, вблизи 10 эВ, то различие энергии дисперсионного взаимодействия определяется главным образом поляризуемостью молекул. Энергия дисперсионного взаимодействия (так же как ориентационного и индукционного взаимодействий) пары частиц обратно пропорцио-

нальна шестой степени расстояния; однако же для приближенного расчета теплоты испарения жидкости следует ввести поправочный коэффициент, учитывающий координационное число и другие факторы, т.е. параметры взаимодействия частицы с ее окружением. Особенностью дисперсионного взаимодействия является его всеобщность – во всех молекулах есть движущиеся электроны, поэтому дисперсионное взаимодействие существенно для всех без исключения молекул, а для неполярных молекул эффект Лондона – главный и практически единственный источник сил Ван-дер-Ваальса. Дисперсионное взаимодействие вносит также определенный вклад в энергию связи ионов в молекулах и в кристаллах. Дисперсионные взаимодействия играют основную роль в межмолекулярных взаимодействиях подавляющего большинства веществ. Они также формируют гидрофобные оболочки клеточных органоидов и мембран. За счет гидрофобных (в основном дисперсионных, а также, отчасти, индукционных) связей неполярные участки радикалов аминокислот в структуре белка и радикалов нуклеотидов в структуре нуклеиновых кислот, радикалы липидов в липидных оболочках и т.п. располагаются упорядоченно, а не создают неопределенность положения в молекуле и органоиде в целом, свободно изгибаясь и мешая работе организма. Другой важной особенностью дисперсионного взаимодействия является его аддитивность. Например, если имеются три частицы, то общая энергия взаимодействия U_{123} складывается из энергий попарного их взаимодействия U_{12} , U_{23} и U_{31} : $U_{123} = U_{12} + U_{13} + U_{31}$. Наглядно аддитивность дисперсионных взаимодействий можно объяснить как результат согласованного в такт движения электронных осцилляторов, понижающего общую энергию нулевых колебаний системы. Аддитивность дисперсионных сил проявляется в адсорбции и других процессах связанных с конденсацией газа. Дисперсионные силы играют большую роль при взаимодействии не только отдельных молекул, но и коллоидных частиц. Благодаря аддитивности дисперсионных сил энергия взаимодействия одной молекулы коллоидной частицы со всеми молекулами другой коллоидной частицы убывает уже не пропорционально шестой, а только третьей степени расстояния. Если же учесть взаимодействие всех молекул одной коллоидной частицы со всеми молекулами другой коллоидной частицы, то энергия дисперсионного взаимодействия, отнесенная к единице поверхности, спадает пропорционально квадрату расстояния между поверхностями макрочастиц. Исследование этого эффекта советскими физиками Ландау и Лифшицем и изучение Дерягиным сил отталкивания между коллоидными частицами позволило Дерягину разработать современную теорию устойчивости и коагуляции коллоидных систем. Особый вид дисперсионных взаимодействий наблюдается в так называемых лиофильных коллоидах (в истинных растворах высокомолекулярных соединений). У молекул, составляющих лиофильные коллоидные системы, длина осциллирующего диполя так велика, что взаимодействуют, по сути, не мгновенные диполи, а меняющие положение отдельные заряды; причем у каждой молекулы высокомолекулярного соединения, составляющего лиофильную коллоидную систему, одновременно существует множество

положительных и множество отрицательных полюсов. Это, названное Лондоном униполярным, взаимодействие существенно в молекулах с сопряженными связями, в высокополимерных и т.п. соединениях, где электрон может перемещаться вдоль цепочки сопряженных связей. Энергия униполярного взаимодействия обратно пропорциональна второй степени расстояния. Изучено также Ван-дер-Ваальсово отталкивание, называемое эффект Паули. При сближении молекул (или их частей), наряду с вышеизложенными дальнедействующими силами, заметными становятся также **короткодействующие силы**, возникающие при перекрывании электронных облаков молекул (или частей молекул). На больших расстояниях эти силы несущественны, так как электронная плотность спадает практически до нуля уже на отдалении порядка $3\text{\AA}$ от ядра атома. Перекрывание электронных облаков может привести к двоякого рода результатам: если у частиц имеются незаполненные целиком или низко лежащие свободные молекулярные орбитали, могут образоваться донорно-акцепторные, координационные, межмолекулярные и другие химические соединения; короткодействующие силы другого вида — силы ван-дер-ваальсового отталкивания, возникающие при перекрывании полностью заполненных атомных или молекулярных электронных оболочек, связанных с проявлением принципа Паули. Принцип Паули (принцип исключения Паули, запрет Паули) играет фундаментальную роль в поведении многоэлектронных систем. Согласно принципу Паули на одной спин-орбитали не может находиться двух электронов с одинаковым набором четырех квантовых чисел. Принцип исключения Паули относится к основным законам природы и выражает одно из важнейших свойств не только электронов, но и всех других обладающих полуцелыми значениями спинового квантового числа микрочастиц (в том числе: протонов, нейтронов, многих других элементарных частиц, а также многих атомных ядер). Например, если две молекулы H_2 в основном состоянии оказываются очень близко друг к другу, между ними возникают силы отталкивания: два электрона первой молекулы на орбитали $\sigma 1s$ и два электрона второй молекулы на такой же $\sigma 1s$ -орбитали оказываются в одной области пространства; но так как в граничной области $\sigma 1s$ -орбитали может находиться не более чем два электрона с антипараллельными спинами (запрет Паули), то обе пары электронов двух столкнувшихся молекул будут стремиться отдалиться друг от друга. Электронная плотность в области соприкосновения понизится, и кулоновское отталкивание отделит одну пару ядер от другой; слияние системы в молекулу H_4 не произойдет. В ван-дер-ваальсовом отталкивании проявляется насыщаемость химических связей. Аналогичное состояние возникает при сближении и других молекул, орбитали которых заполнены парами электронов с антипараллельными спинами: при перекрывании молекулярных орбиталей возникает эффект ван-дер-ваальсового отталкивания (иногда силы отталкивания, возникающие при перекрывании полностью заполненных электронных оболочек, называют "силами Паули"). Природа их, также как и других сил Ван-дер-Ваальса — электрическая. Силы ван-дер-ваальсового отталкивания — важная компонента межмолеку-

лярного взаимодействия. На коротких расстояниях они значительны и возрастают при сближении очень быстро. Из всего рассмотренного материала можно заключить, что между физическими связями и химическими связями нельзя провести четкую границу. Физические и химические связи имеют общую физическую природу (электрическую). Кроме того, один и тот же эффект (эффект исключения Паули) считается поддерживающим устойчивость химической связи в пределах молекулы (или ее участка) либо устойчивость физической связи в пределах фазы только в зависимости от того, считаются ли взаимодействующие атомы связанными химически или несвязанными химически. По длине и энергии связи физические и химические связи тоже граничат вплотную. Единственным фактором, который позволяет отделить физические связи от химических, может быть лишь **насыщаемость/ненасыщаемость связи**. Однако и в этом случае, разделение связей на химические и физические будет нестрогим вследствие существования водородной (иногда ее также называют протонной) связи, насыщенность которой нечетко выражена (вследствие того, что водородная связь является переходной между различными механизмами химического и межмолекулярного взаимодействия практически по всем параметрам ее уже сейчас часто относят как к первым так и ко вторым). Кроме того, такое разделение связей на физические и химические требует отнесения также ионной связи к физическим, а не к химическим связям, так как она не обладает насыщенностью.

**СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ НАУЧНОЙ, НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ,
А ТАКЖЕ ССЫЛКИ НА РАЗЛИЧНЫЕ РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТА ПО ТЕМАТИКЕ ПРОЕКТА –
НАНОТЕХНОЛОГИЯМ И СВЯЗАННЫМ С НИМИ НАУКАМ**

1. Азимов А., Мир углерода, пер. с англ., - М.: «Химия», 1978.
2. Барашков Н.Н., Полимерные композиты: получение, свойства, применение, - М.: «Наука», 1984.
3. Бейли Дж., Оллис Д., Основы биохимической инженерии, пер. с англ., в 2-х частях, - М.: «Мир», 1989.
4. Березин И.В., Яцимирский А.К., Биотехнология и её перспективы (инженерная энзимология), - М.: «Знание», 1986
5. Богданов А.А., Медников Б.М., Власть над геном, - М.: «Просвещение», 1989.
6. Богданов К.Ю., Что могут нанотехнологии? – научно-популярный аналитический Интернет-сайт http://kbogdanov1.narod.ru/index.html (главы: «Ричард Фейнман - пророк нанотехнологической революции», «Машины созидания Эрика Дрекслера», «Как войти в наномир», «Как двигать атомы с помощью микроскопа», «Ла-

зерный нанопинцет», «Углеродные нанотрубки», «Квантовые точки – рукотворные атомы», «Нанокapsулы из дендримеров», «Нанoeлектроника», «Наночастицы серебра убивают бактерии», «Нанofазные материалы – более прочные», «Наночастицы увеличивают мощность батареек», «Магнитные наностержни в жёстких дисках компьютеров», «Нанотехнологии в криминалистике», «Эритроциты и бактерии – перевозчики нанокapsул с лекарствами», «Гибкий дисплей из нанотрубок», «Нановолоски делают поверхность чистой», «Нановыключатель для батарейки», «Нанотрубки делают полимеры более прочными», «Дендримеры помогают убивать раковые клетки», «Наномыло и ловушка для УФ из оксида титана», «Наночастицы внутри нанотрубок – подарок химикам», «Сколько стоят нанотехнологии?»; на этом сайте очень много полезных ссылок по всем главам.

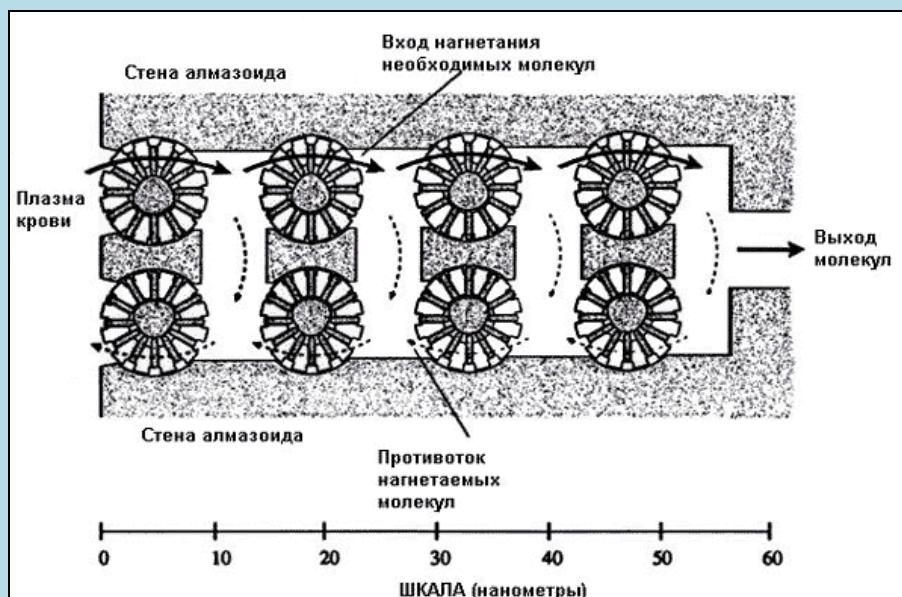
7. Большая энциклопедия «Химия», - М.: Русское энциклопедическое общество, 2003.
8. Бушелёв С.Н., Степанов Н.Ф., Электронная структура и биологическая активность молекул», - М.: «Знание», 1989.
9. Вишневский Л.Д., Элементоорганические соединения, - М.: «Просвещение», 1987.
10. Волькенштейн М.В., Биофизика, - М.: «Наука», 1988.
11. Габриелян О.С., Лысова Г.Г., Химия, 11 класс, - М.: «Дрофа», 2005. (главы: «Строение атома», «Строение вещества»).
12. Годмен А., Иллюстрированный химический словарь, пер. с англ., - М.: «Мир», 1988.
13. Гроссе Э., Вайсмантель Х., Химия для любознательных. Пер с нем., - Л.: «Химия», 1985.
14. де Дюв К., Путешествие в мир живой клетки, пер. с англ., научно-популярное издание, - М.: «Мир», 1987.
15. Зацепина Г.Н., Физические свойства и структура воды, научная монография, - М.: Издательство МГУ, 1998.
16. Карапетьянц М.Х., Дракин С.И., Строение вещества, учебник для вузов, - М.: "Высшая школа", 1978.

17. Карьера в медицине. Энциклопедия профессий, - М.: «Аванта+», 2003. (Глава «Перспективы медицины. Нанотехнологии»)
18. Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С., Физическая химия, учебник для вузов, - М.: "Высшая школа", 1990.
19. Композиция силикатно-керамическая (КСК) – реальное достижение отечественной нанотехнологии. ЦНТ – Центр новейших технологий. Специальный Интернет-сайт: http://www.cnt-moscow.ru
20. Краснов К.С., Молекулы и химическая связь, учебник для вузов, - М.: "Высшая школа", 1984.
21. Лазаревич А., Сеть «НАНОТЕХ», научно-фантастическая повесть, веб-издание, можно прочитать по адресу http://www.lib.ru/LAZAREWICH/nanoteh.txt
22. Медников Б.М., Биология: формы и уровни жизни, пособие для учащихся, - М.: «Просвещение», 1994.
23. Московские учебные заведения. Вузы: координаты, направления обучения. Техникумы и колледжи. Справочник. 2006-2007 уч.год и 2007-2008 уч.год, - М.: «Модерат», 2006 (2007)
24. Мушкамбаров Н.Н., Аналитическая биохимия, учебник для вузов, - М.: "Экспедитор", 1996.
25. НАНОМЕТР. Нанотехнологическое сообщество. Специальный информационно-аналитический Интернет-сайт: http://www.nanometer.ru Много ссылок.
26. Нанотехнологии: азбука для всех, коллектив авторов под руководством академика Ю. Третьякова, веб-издание на сайте http://www.nanonewsnet.ru (Сайт о нанотехнологиях №1 в России)
27. Нанотехнологии. Информационно-аналитический сайт. http://www.nanotech.info/ со страницами: «Что такое наномир?», http://www.nanotech.info/nanomir ; «Что такое нанотехнология?», http://www.nanotech.info/nanotech ; «История развития нанотехнологий», http://www.nanotech.info/histiry
28. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ. Национальный информационно-аналитический центр. Адрес сайта: http://www.iacnano.ru

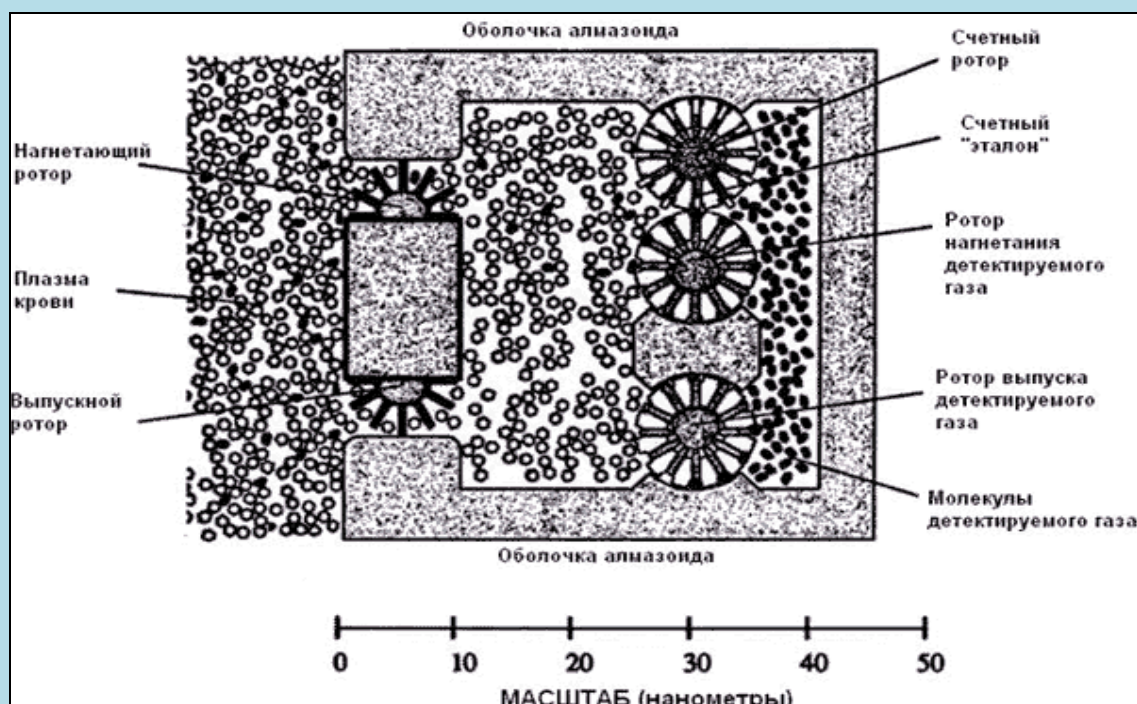
29. НАНОТЕХНОЛОГИЯ. Материал из <i>Википедии</i> – свободной энциклопедии. http://ru.wikipedia.org – Подробнейший информационный ресурс со множеством полезных ссылок, с иллюстрациями и анимацией.
30. Нанoeлектроника и квантовая информатика. Официальный сайт лаборатории квантовых компьютеров Физико-технологического института РАН (ФТИАН), http://www.ftian.ru/
31. Николаев А.Я., Биологическая химия, учебник для вузов, - М.: ООО "Медицинское информационное агентство", 1998.
32. Новосельцев В.Н., Организм в мире техники: кибернетический аспект, - М.: «Наука», 1989.
33. Общая биология: учебник для 10-11 кл. с углубленным изучением биологии / Л.В. Высоцкая, С.М. Глаголев, Г.М. Дымшиц и др.; под ред. В.К. Шумного и др., - М.: «Просвещение», 2004 (и последующие издания).
34. Пик технологий в облаке кошмаров. Нанотехнологии как возможная угроза человечеству. http://techcloud.narod.ru/index.htm - это аналитическая публицистика, предупреждение нынешнему и грядущим поколениям.
35. План действий по стимулированию развития наноиндустрии в Российской Федерации. Приложение к «Программе координации работ в области нанотехнологий и наноматериалов в Российской Федерации». Электронная версия на сайте «Предпринимательское право», http://www.businesspravo.ru
36. Программа координации работ в области нанотехнологии и наноматериалов в Российской Федерации. Электронная версия на сайте «Предпринимательское право», http://www.businesspravo.ru
37. Распоряжение Правительства РФ «Об одобрении Программы координации работ в области нанотехнологий и наноматериалов в Российской Федерации» от 25 августа 2006 г., №1188-р (НТЦС), Электронная версия на сайте «Предпринимательское право», http://www.businesspravo.ru
38. Ратнер М., Ратнер Д., Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи, - М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. Избранные главы на сайте издательства: http://www.williamspublishing

39. Раубах Хайнц, Загадки молекул, пер. с нем., - Л.: «Химия», 1979.
40. Рыбалкина М., Нанотехнологии для всех, веб-издание на сайте NanoNewsNet, http://www.nanonewsnet.ru (Сайт о нанотехнологиях №1 в России)
41. Рыбалкина М., Путешествие в наномир (для учащихся младшего и среднего возраста), веб-издание на сайте NanoNewsNet, http://www.nanonewsnet.ru (Сайт о нанотехнологиях №1 в России)
42. Сайт о нанотехнологиях №1 в России, http://www.nanonewsnet.ru , раздел «Что такое нанотехнологии?», страницы: «Исследовательский инструментарий нанотехнологов», «Нанобиология», «Наноматериаловедение», «Нанотрубки», «Физика наноструктур», «Микроскопия нанообъектов (наноскопия)», «ДНК-наноструктуры», «Графеновые материалы», «Фуллерены», «Углеродные нанотрубки», «Наноактюаторы», «Нанoeлектроника», «Методы нанотехнологического производства».
43. Сассон А., Биотехнология: свершения и надежды, пер. с англ., - М.: «Мир», 1987.
44. Свидиненко Ю., Информационно-аналитические материалы по разным направлениям нанонауки и nanoиндустрии. Переводы зарубежных публикаций по нанотехнологиям. Авторские проекты. http://www.nanonewsnet.ru (Сайт о нанотехнологиях №1 в России)
45. Степанов Н., Новости нанотехнологий, блог на сайте /www.nanonewsnet.ru (Сайт о нанотехнологиях №1 в России)
46. Терлецкий Е.Д., Металлы, которые всегда с тобой, - М.: «Знание», 1986.
47. Фейнман Р.Ф., Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики, самая первая лекция о нанотехнологиях, <u>краткий</u> перевод с английского, в «Российском химическом журнале» («Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева»), 2002 год, том XLVI, №5.
48. Фейнман Р.Ф., Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики, самая первая лекция о нанотехнологиях, <u>полный</u> перевод с английского, веб-публикация, http://www.zyvex.com/nanotech/feynman/html

49. Хомченко Г.П., Химия (для подготовительных отделений), учебник, - М.: «Высшая школа», 1993 (и последующие издания); разделы: «Строение атома», «Строение вещества».
50. Черкасов А.Н., Пасечник В.А., Мембраны и сорбенты в биотехнологии, - Л.: «Химия», 1991.
51. Чухрай Е.С., Молекула, жизнь, организм, - М.: «Просвещение», 1981.
52. Школьникам о современной физике: Акустика. Теория относительности. Биофизика; книга для учащихся 8 – 11 классов средних школ / Л.К. Зарембо, Б.М. Болотовский, И.П. Стаханов и др., - М.: «Просвещение», 1990 (главы: «Жидкие кристаллы», «Физические основы подвижности клеток», «Физика биологических мембран»).
53. Шлегель Г., Общая микробиология, пер. с нем., - М.: «Мир», 1987.
54. Шредингер Э., Что такое жизнь? (с точки зрения физика), - М.: «Атомиздат», 1972.
55. Энциклопедия для школьников «Биология», - М.: «Аванта+», 2002.
56. Энциклопедия для школьников «Техника», - М.: «Аванта+», 2004.
57. Энциклопедия для школьников «Физика», - М.: «Аванта+», 2003.
58. Энциклопедия для школьников «Химия», - М.: «Аванта+», 2000.
59. Эткинс П., Порядок и беспорядок в природе, пер. с англ., - М.: «Мир», 1987.
60. Яковлев В.И., Технология микробиологического синтеза, - Л.: «Химия», 1987.



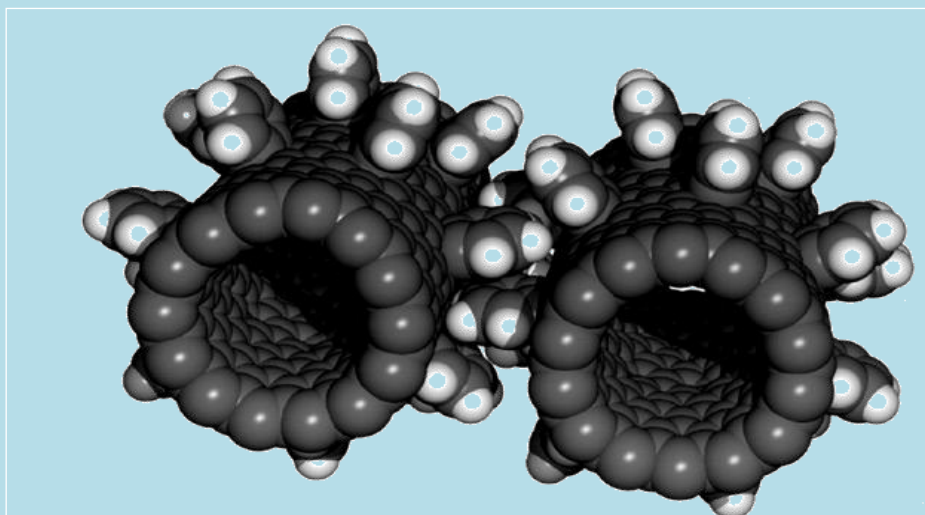
МОЛЕКУЛЯРНЫЙ КАСКАДНЫЙ ФИЛЬТР – ПЛАНИРУЕМЫЙ ПРОДУКТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ



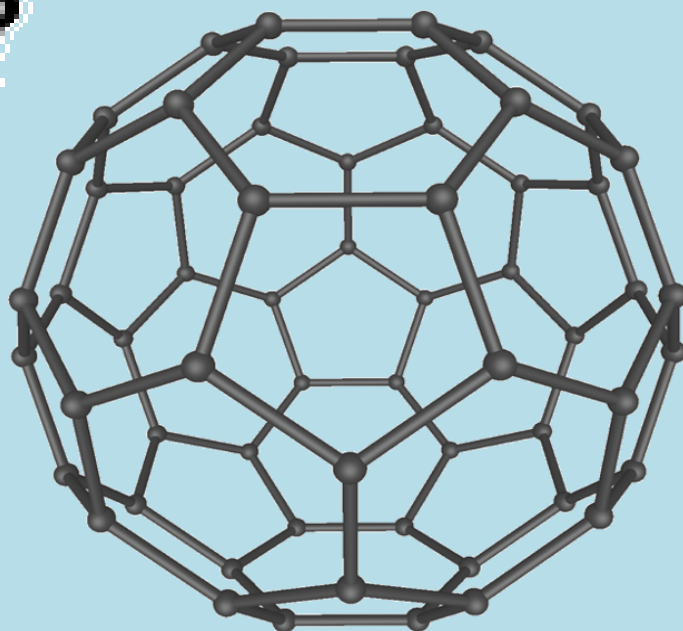
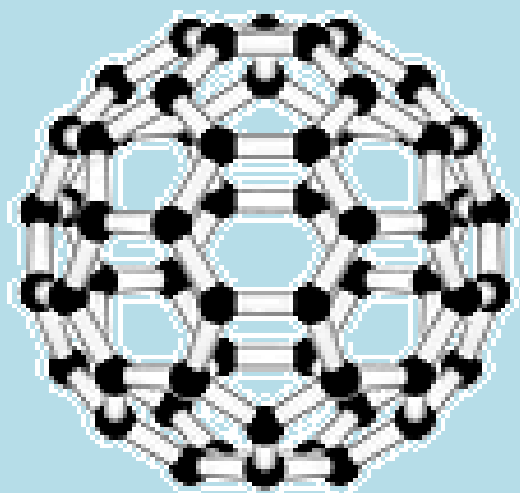
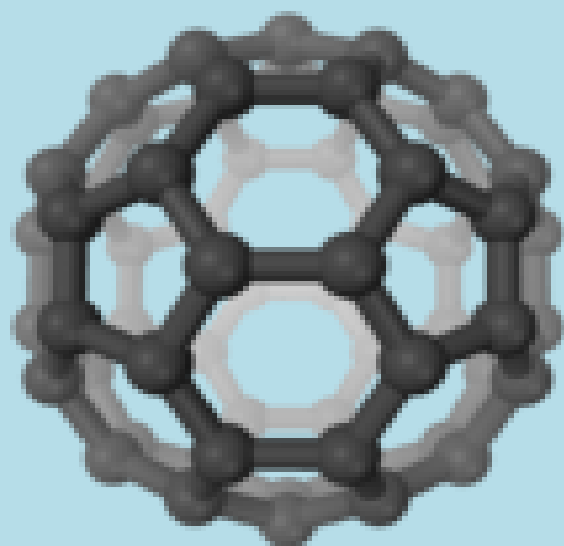
МОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ НУЖД (ПОКА ТОЛЬКО ПРОЕКТ)



НАНОРОБОТ-СБОРЩИК, ОН ЖЕ НАНОБОТ-АСЕМБЛЕР (В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ХУДОЖНИКА)



НАНОШЕШТЕРЁНКИ (ДИНАМИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ)



РАЗНЫЕ МОДЕЛИ ФУЛЛЕРЕНОВ