

# ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

ПРОДОЛЖЕНИЕ. НАЧАЛО ОПУБЛИКОВАНО В № 2/2007

**К**ак отмечают отечественные и зарубежные эксперты [1, 2, 3], наноэлектромеханические системы (НЭМС) и устройства на их основе уже в ближайшие годы должны стать важнейшими элементами узлов, изделий, образцов, комплексов и систем вооружения и военной техники. Применение НЭМС будет распространяться не только на средства поражения, но и на средства боевого, технического и тылового обеспечения ведения боевых действий.

Одним из перспективных направлений применения нанотехнологий является их использование для обеспечения радиационной, химической и биологической защиты войск.

К примеру, на основе НЭМС может быть создан способный улавливать индивидуальные феромоны "электронный нос" – высокочувствительный датчик для анализа параметров состояния воздушной среды. Принцип его действия моделирует функционирование рецепторов носа при идентификации запаха как определенной конфигурации молекул, хранящейся в памяти мозга. Любая находящаяся в воздухе молекулярная комбинация, попадая в одну из 2200 ячеек кристалла "электронного носа", кодируется и обрабатывается интегрированным компьютером. Необходимо отметить, что площадь чувствительного элемента (ЧЭ) такого датчика составит всего около 2 мм<sup>2</sup> (рис. 1).

Исследования, проведенные в стране и за рубежом, показали, что в качестве конструктивной основы ЧЭ наносенсоров могут быть использованы углеродные нанотрубки. ЧЭ датчиков обнаружения боевых отравляющих веществ получают, например, спеканием углеродных волокон – нанотрубок толщиной 1 нм (рис. 2). В результате получается напомина-

ющая сетку структура, обладающая по сравнению с единичной нанотрубкой большей чувствительностью. Нанеся эту наноструктуру на внутреннюю поверхность кварцевой трубки, можно получить прочную наноконструкцию ЧЭ.

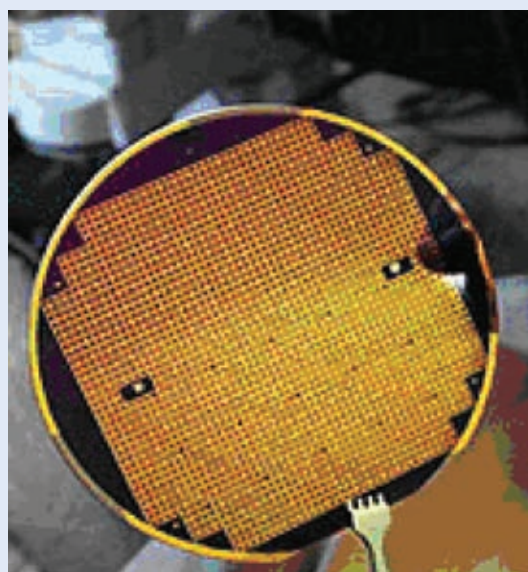


Рис. 1 Чувствительный элемент "электронного носа"

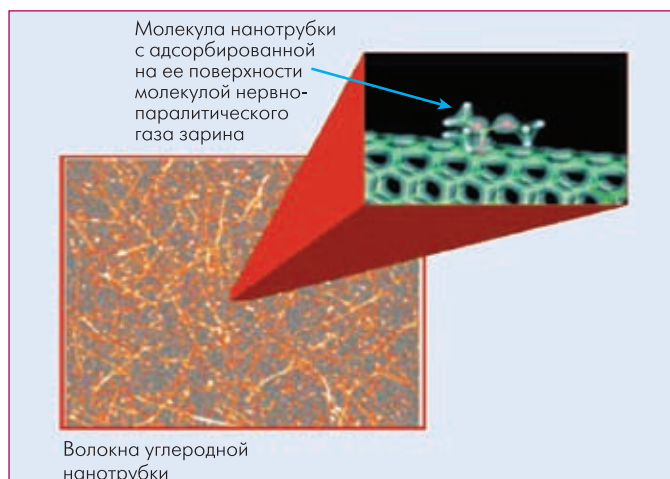


Рис.2 Чувствительный элемент на основе нанотрубки

Углеродная наноструктура не только полупроводник, но и хороший адсорбент, изменение концентрации дырок которого приводит к значительному изменению электропроводности волокон. Соединив концы трубки ЧЭ с измерительным устройством, можно получить датчик, принцип работы которого основан на измерении текущего сопротивления наноструктуры [4].

ЧЭ такого датчика способен распознать наличие в воздухе зарина (нервно-паралитический газ), аммиака, углеводородов, паров воды и других веществ, поскольку каждому из них соответствует своя характерная кривая изменения сопротивления от времени. Например, присутствие зарина вызывает быстрое изменение сопротивления, в то время как на углеводороды и водяные пары реакция существенно более слабая.

Датчики с ЧЭ на основе нанотрубок позволят также обнаруживать в воде ионы тяжелых металлов и ряд химикатов. В качестве ЧЭ таких устройств рассматриваются нанотрубчатый транзистор, покрытый слоем пептидов на основе 20 аминокислот [5].

При создании биосенсоров в качестве ЧЭ могут использоваться молекулы ДНК, сопряженные с различными микроорганизмами (например, вирусом сибирской язвы). Рабочие ДНК наносятся на один из электродов такого датчика. Зараженная вирусом ДНК, попавшая на второй электрод биосенсора, смыкается рабочей ДНК и создает перемычку между двумя электродами. Сопротивление цепи изменяется в тысячи раз даже при наличии одной болезнетворной молекулы [6].

Компания CombiMatrix разработала датчик HANAA [7], позволяющий в полевых условиях определять различные химические и бактериологические вещества в концентрациях от 10 молекул (бактерий) на 100 см<sup>3</sup>. Принцип его действия состоит в репликации образца ДНК на основе полимеразной цепной реакции (удвоение числа молекул ДНК с помощью специальных ферментов обеспечивает точное копирование генетической информации).

Нагрев-охлаждение молекул ДНК происходит в специальной кремниевой микрокамере. Когда количество молекул определяемой ДНК становится достаточным для проведения точных проб, прибор их обрабатывает с помощью флуоресцентных меток, сравнивает с заложенными в память типами патогенов и принимает решение о выборе и минимальной вводимой дозе антитодов или антител, с помощью которых организм человека сможет сам сопротивляться воздействию вредных веществ.

Учитывая малые массо-габаритные характеристики (масса – около 1 кг), низкое энергопотребление (для питания достаточно нескольких батареек) и высокую оперативность (полный цикл работы прибора занимает до 30 минут), можно ожидать, что датчик HANAA найдет широкое применение не только в армии США, но и при реализации комплекса мероприятий по борьбе с терроризмом.

Еще одним интересным проектом, реализуемым в настоящее время за рубежом, является создание молекулярного биосенсора, состоящего из 1,5 миллионов живых клеток – аналога человеческой печени, чувствительного к различным боевым отравляющим веществам (ОВ) (рис. 3).

На поверхность одной из двух ультратонких кремниевых пластин, разделенных каналами, помещают живые клетки печени, образующие биореактор, через который циркулируют питательные вещества. Вредные вещества распознаются по реакции биореактора на их появление.

Введенные в структуру биодатчика клетки печени работают в режиме биореактора. При поступлении в "нанопечень" вредных веществ и микроорганизмов она вырабатывает специфическое химическое вещество, которое идентифицируется нанолaborаторией.

Через такой биодатчик, встроенный в экипировку, военнослужащий получит сигнал о химической или биологической опасности раньше, чем концентрация патогенов в окружающей среде или поглощенная организмом доза станет опасной для жизни.



Рис.3 Наносенсор – аналог печени человека в составе мультиlaborатории

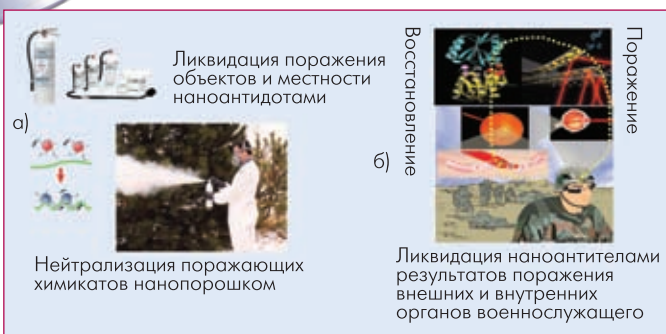


Рис.4 Применение специальных нановеществ в боевых условиях

Кроме отмеченных выше проектов за рубежом активно проводятся исследования по созданию датчиков, в основе чувствительного элемента которых используется целый слой молекул ДНК.

Спектр индивидуальных средств защиты военнослужащего с использованием нанотехнологий также достаточно широк и включает широкую номенклатуру изделий: от защитных перчаток, которые не пропускают токсичные вещества на кожу человека, до специальных кремов, снижающих токсичность патогенов.

Для обезвреживания боевых ОВ успешно используются порошки из активных наночастиц (нанопорошки) [5]. Нанопорошок, связывающий и деактивирующий десятки (в перспективе – сотни) токсичных соединений, может быть использован при отрицательных температурах и в различных средах (рис. 4а).

Прошли апробацию наносоединения фуллеренов с антителами для защиты от спор бактерии *Vacillus anthracis* – наиболее распространенных боевых бактериологических агентов. Нанопрепарат убивает эти споры, не позволяя размножаться в организме до концентраций, несовместимых с жизнью человека (рис. 4б) [8].

По оценкам ведущих отечественных и зарубежных ученых, нанотехнологии в перспективе кардинально изменят систему медицинского обеспечения боевых действий.

Перспективным направлением практической реализации достижений нанотехнологий для повышения эффективности медицинского обеспечения ведения боевых действий может рассматриваться создание устройств диагностики физиологического состояния военнослужащих [9].

Предполагается, что такие устройства будут осуществлять съем и передачу данных о физическом состоянии (пульс, температура тела, кровяное давление, энцефалограмма, кардиограмма, водный баланс, поглощенная доза радиации, потраченные калории) на микрокамеру, проектирующую изображение на сетчатку глаза. Информация может проецироваться и на встроенные в шлемы гибкие дисплеи (по аналогии с игровыми монокулярами и шлемами виртуальной реальности).

Если военнослужащий болен или ранен, медик, находящийся даже в десятках километров от него, выдаст команду на выполнение жизненно важных процедур или инъекций.

Как показывают предварительные оценки, включение таких устройств в подсистему жизнеобеспечения боевой экипировки сможет значительно повысить выживаемость военнослужащих на поле боя.

Результаты исследований в области нанотехнологий могут найти практическое применение для осуществления лечебно-диагностических мероприятий в условиях военных госпиталей на этапе оказания специализированной медицинской помощи.

Освоение технологии закрепления (путем имплантации) на внешней поверхности макромолекулы наночастиц, способных присоединяться к "маркерам", позволит "настраивать" их на идентификацию поврежденных клеток и разрушение опухолей, на проникновение внутрь молекулы и восстановление структуры ДНК (рис. 5).

Обычная инъекция позволит доставить в кровеносную систему человека нанокapsулы с сотнями тысяч наночастиц. Введенные наночастицы получают информацию о наличии поврежденных клеток в формате клеточной сигнальной системы, поскольку поврежденная клетка производит "маркер" в виде определенного класса белков, размещенных на внешней поверхности защитной мембраны.

Результаты исследований в области "квантовых" точек дают возможность использовать для "подсветки" поврежденных клеток люминофоры (хеморецепторы) принципиально нового типа, позволяя отказаться от традиционных для биомедицины люминесцентных мелкодисперсных красителей, менее информативных и небезопасных для здоровья человека. Взаимодействие "квантовая точка" – "сигнальный рецептор" позволяет синтезировать "квантовые маркеры", способные присоединяться к определенному типу клеток (рецепторов).

Конструкция наноробота, вводимого в организм путем инъекции, реализуется из алмазоида, а управление манипуляциями в русле кровеносного сосуда и воздействием на пораженную клетку антителами или антидотом сможет выполнять "бортовой" нанопроцессор производительностью до  $10^9$  операций в секунду. Вариант конструкции наноробота для доставки антител и антидотов к пораженной клетке в организм человека представлен на рис. 6 [10].

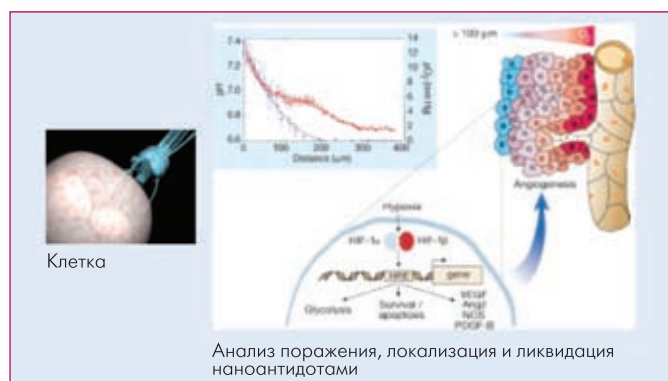


Рис.5 Применение нанотехнологий для оказания специальной медицинской помощи



**Рис.6** Наноробот для доставки антител и антидотов к пораженной клетке в организме человека

*Перспективная экипировка*, по представлениям разработчиков, будет являть собой некий биоэлектронный и материалосвязующий комплекс "военнослужащий – обмундирование – оружие". Элементы такого комплекса настолько тесно связаны между собой, что при полной экипировке "идеальный солдат" будет представлять собой военнослужащего, информационно и энергетически автономного, быстро и точно действующего, выживающего в запредельных условиях боя и окружающей среды (рис. 7).

Отличительной особенностью экипировки нового поколения является наличие системы экзоскелета.

Конструктивно экзоскелет представляет собой облегченный механический костюм с многочисленными нанодатчиками, соединенными со встроенным компьютером, и системой электроприводов с тяговыми усилиями до 100 кг.



**Рис.7** Элементы перспективной экипировки военнослужащего с использованием наноматериалов и композитов

Экзоскелет покрывается специальной нанотканью, в тонком (1,2 мм) слое которой будут содержаться функционально сложные нано- и молекулярные компоненты (наноактюаторы, преобразователи механических величин). С помощью таких устройств экипировка сможет одновременно играть роль бронежилета, универсального медицинского "диагностического центра", силового экзоскелета (рис. 8).

Полимерные наноактюаторы, которые будут размещены в облегченном механическом костюме, по сигналу медицинского компьютера превратят его отдельные участки в более жесткие или мягкие. Например, сломанную ногу соответствующий участок экзоскелета захватит в искусственные шины, сформированные нанотканью костюма, что позволит не только правильно зафиксировать ее, но и сохранить определенные опорные и динамические функции.

Для обеспечения принятия требуемого положения экзоскелета в зависимости от воздействия и управляющего сигнала необходимы быстродействующие наноакселерометры, электропроводные нанополимеры, покрытия и наноткани, совместимые с живой материей и обладающие функцией "самосборки" в требуемые структуры и функциональные композиции.



**Рис.8** Экзоскелет, как элемент перспективной экипировки военнослужащего

Отдельным направлением исследований при разработке боевой экипировки нового поколения является создание перспективных материалов на основе наноструктурированных частиц для средств индивидуальной бронезащиты.

Анализ поражений военнослужащих на поле боя показывает, что основными поражающими факторами (~80 %) являются "осколки естественного дробления" массой до 1 г и скоростью менее 550 м/с [11].

Использование наноматериалов позволяет втрое повысить жесткость прозрачных полимерных поверхностей шлемов военнослужащих [12]. Наночастицы в растворе наносятся на

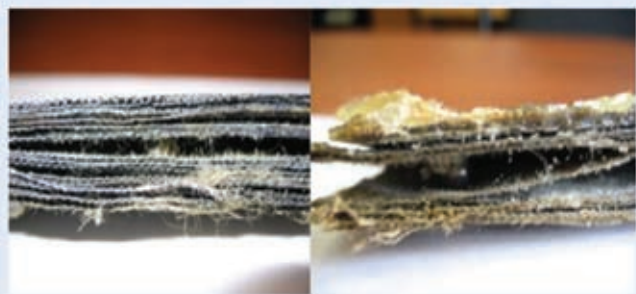


Рис.9 Материал брони с наночастицами

пластиковую поверхность, образуя сверхтвердую пленку, которая не только защищает от воздействия климатических и механических факторов, биологических и химических агентов, но и от пуль.

Присутствие наночастиц в составе связующего материала повышает сопротивление ударному сжатию и стабильность характеристик, способствует диссипации энергии из зоны взаимодействия с поражающим элементом. Понимание этого явления позволило отечественным нанотехнологам создать способ введения наночастиц в состав материала брони (рис. 9).

Сравнение противоосколочной стойкости контрольных образцов и образцов экипировки с наночастицами (внутренние оболочки шлема 6Б7-1, композиционные бронепанели) показало, что контрольный образец разрушается при взаимодействии с имитатором осколка на два слоя, а образец с наночастицами – послойно. Это свидетельствует о различном характере диссипации энергии при взаимодействии бронепанели с поражающим элементом.

Испытания на ударную стойкость продемонстрировали, что величина запреградного выступа внутренней оболочки у контрольного образца – 25 мм, а у образца с наночастицами – 8,5 мм [13].

Усилия создателей перспективной экипировки сосредоточены и на нанокерамических материалах, эффективных там, где необходимы водонепроницаемость, защита от коррозии, отсутствие коробления и ломкости.

В рамках работ в данной области созданы новые материалы (так называемые "неорганические подобные фуллеренам наноструктуры" – inorganic fullerene-like nanostructures (IF), которые, будучи многократно прочнее и легче стали, могут стать основой для необычайно прочной наноброни [14].

Чтобы синтезировать новый материал, ученые вместо углеродных нанотрубок и фуллеренов использовали дисульфид вольфрама ( $WS_2$ ). Открытый сотрудниками израильского Института Вейцмана,  $WS_2$  был первым "неорганическим" аналогом этих веществ. Многослойные трубки из  $WS_2$  диаметром несколько нанометров, которые сохраняют большинство свойств углеродных волокон, были сплетены в специальную ткань. В ходе исследований рассматривались другие соединения данной группы (сульфиды молибдена, титана и ниобия).

Составленные из таких частиц материалы обладают необычайно высокой прочностью и превосходной способностью к поглощению (рассеиванию) энергии удара, сохраняя после воздействия начальную форму. Сплетенные в специальную ткань из многослойных трубок диаметром 5–6 нм такие материалы способны обеспечить защиту от пули, летящей со скоростью 1,5 км/с.

Практический интерес для военно-технического применения вызывают и другие свойства нанорастворов и наножидкостей. Отечественные и зарубежные исследователи вплотную приблизились к промышленной технологии "жидкой наноброни" в виде сверхпрочного геля (рис. 10). Пропитанное таким гелем обмундирование приобретает свойства бронезиelta, который выдержит выстрел из пневматического ружья с расстояния в 1 м.

"Броня" состоит из двух компонентов – неиспаряющегося геля и наночастиц металла. От резкого механического внешнего воздействия материал мгновенно затвердевает в точке этого воздействия.

Эффект достигается благодаря сверхтвердым наночастицам металлов, распределенным в гелевой жидкости. При механическом воздействии они группируются в микрокластеры, изменяя за 1 мс структуру жидкой брони в месте удара или давления. Время, в течение которого материал вернется в исходное состояние, зависит, в основном, от концентрации гелевого раствора.

Пластичность "жидкой брони" позволяет изготавливать на ее основе защитные костюмы с закрытыми локтевыми и коленными суставами. Путем пропитки ею кевларовой ткани принципиально возможно создание "бронекombineзонов", у которых сила удара пули, осколка или взрыва распределяется по всей затвердевшей поверхности [14, 15].

Производители текстиля [16] разработали наноткань для экипировки военнослужащего, по виду и на ощупь не отличающаяся от обычной, но способную в различных температурных условиях изменять свои теплоизоляционные свойства. К волокнам ткани прикреплены миллиарды наночастиц, состав которых реагирует на изменение температуры окружающей среды, меняя фазовое состояние – от жидкого в тепле до твердого на холоде. Важно, что наноткань не теряет терморегулирующих свойств после стирки и химчистки.

Утеплитель на основе полимерного материала с наночастицами обладает свойствами хорошего теплоизолятора и может

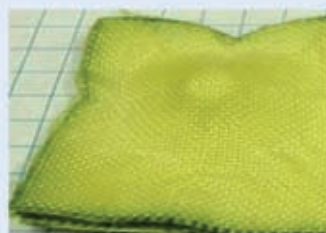


Рис.10 Жидкая "наноброня"

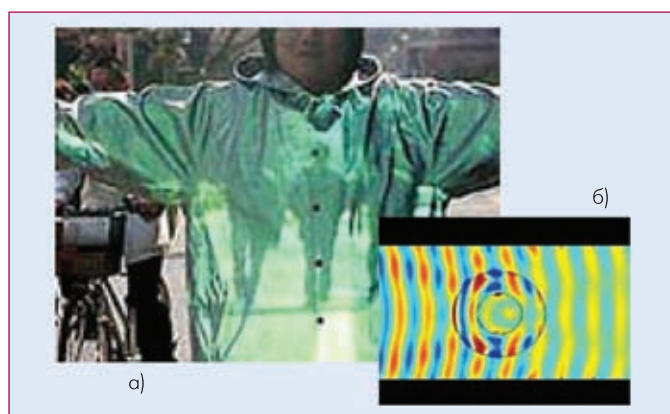


Рис. 11 "Плащ-невидимка"

быть использован в обуви военнослужащего или в виде теплых стелек толщиной до 2,5 мм [16].

По предварительным оценкам военных ученых, широкое использование достижений в области нанотехнологий позволит уменьшить массу экипировки военнослужащего до 20 кг при сохранении (или даже расширении) перечня решаемых функциональных задач.

Еще одним важным направлением прикладного использования нанотехнологий в военном деле является *снижение заметности существующих и перспективных образцов (систем, комплексов) вооружений и военной техники (ВВТ) различного целевого назначения за счет использования материалов и покрытий на основе наноструктурированных частиц.*

Разработчики военной техники планируют использование специальной "электромеханической нанокраски", которая позволит менять цвет подвижных объектов ВВТ и предметов боевого снаряжения военнослужащих наподобие хамелеона. Ожидается, что такая "краска" позволит также предотвратить коррозию конструктивных элементов вооружения и обеспечить "затягивание" мелких повреждений на корпусе машин. "Краска" будет состоять из специальной среды наноструктур размерами 1–100 нм, которые обеспечат выполнение всех перечисленных функций (их даже называют наномеханизмами).

В результате внедрения нанотехнологий ожидается появление принципиально новых способов "трехмерной маскировки". Так, за рубежом реализуется проект по созданию

"плаща-невидимки" [17], в основу действия которого положен принцип видеосъемки (рис. 11а). Вмонтированные в плащ нановидеоискатели передают изображение на массив наноэкранов на его противоположной стороне. В результате на плаще воспроизводится обстановка с разных сторон.

Однако, если смотреть на замаскированный предмет сбоку или сзади, "невидимку" можно увидеть, поскольку сами датчики замаскировать пока не удастся. Этот недостаток может быть устранен применением материала на основе наноструктур с определенными оптическими свойствами, который способен взаимодействовать с волнами электромагнитного спектра излучения. Такой материал не отражает свет, но перенаправляет потоки электромагнитных волн так, что они обтекают объект, создавая иллюзию невидимости (рис. 11б).

Основными недостатками "плаща-невидимки" являются большая масса, обусловленная применением прочной светонепроницаемой (экранирующей) ткани, а также невозможность снижения заметности объектов в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн.

Еще одним направлением прикладного использования нанотехнологий является создание покрытий для образцов ВВТ, обладающих высокими функциональными и эксплуатационными характеристиками. Принципиально возможно получить недостижимые до настоящего времени свойства корпусов подводных лодок и надводных кораблей, обшивок летательных аппаратов, поверхностей боевой бронированной техники.

Одно из таких свойств – способность к самоочищению покрытий от налипания грязи, воды, льда, различных химических веществ (рис. 12). Защита обеспечивается созданием нанопокрывтий (модификация поверхности на молекулярном уровне), которые сохраняются длительное время (до 1 года).

Для их нанесения используются специальные средства [18], которые представляют собой растворы наночастиц, глубоко проникающих в материалы естественного и искусственного происхождения. Раствор заполняет неровности поверхности защищаемого объекта, предотвращая впитывание и поверхностное оседание посторонних частиц. Важно, что образуемое покрытие пропускает воздух, но отталкивает воду,

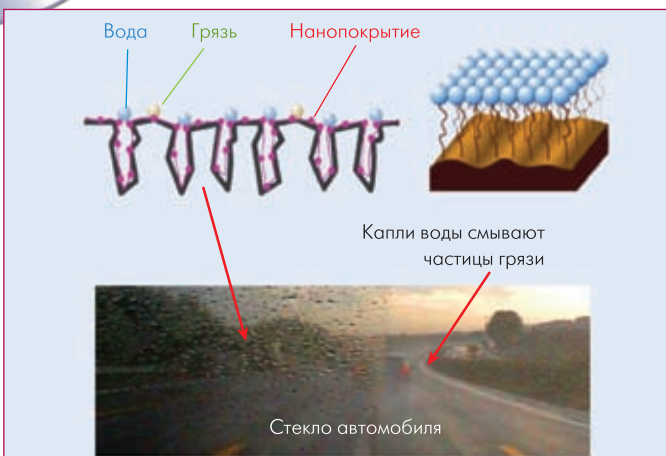


Рис. 12 Самоочищающиеся покрытия

химические соединения и жиры, устойчиво к трению, пластично, не подвержено воздействию солнечного света и температуры в диапазоне от минус 40 до 450 °С.

Как отмечают эксперты [19, 20], нанoeлектромеханические системы и устройства на их основе в перспективе должны стать *важнейшими элементами "интеллектуальных" систем управления войсками и оружием* (рис. 13).

ЧЭ, выполненные с использованием характерных для процессов создания МЭМС и НЭМС технологий групповой обработки [21], уже нашли применение в разведывательно-сигнализационных системах, функционирующих при любых погодных условиях. НЭМС, обладая на порядки меньшими размерами, имеют выраженную тенденцию к сопряжению с молекулярными структурами вплоть до перехода на них при построении функциональных узлов.

От МЭМС- и НЭМС-ЧЭ и акселерометров в составе базовых электронных систем во многом зависит точность и быстродействие систем ориентации, навигации и управления как самих образцов ВВТ (боевых бронированных машин, летательных аппаратов, надводных и подводных кораблей), так и комплексов их вооружения [22].



Рис. 13 Применение нанoeлектромеханических систем в средствах и системах боевого обеспечения

Важнейшим вопросом, требующим приоритетного решения, является создание систем нормативно-технического и метрологического обеспечения исследований и разработок в области нанотехнологий.

Переход к проведению ОКР и тем более к серийному производству НЭМС требует наличия соответствующих стандартов, методик испытаний и аттестации, программ стандартизации и унификации. Отсутствие указанных документов поставит под угрозу промышленную реализацию многочисленных отечественных исследовательских проектов в области нанотехнологий.

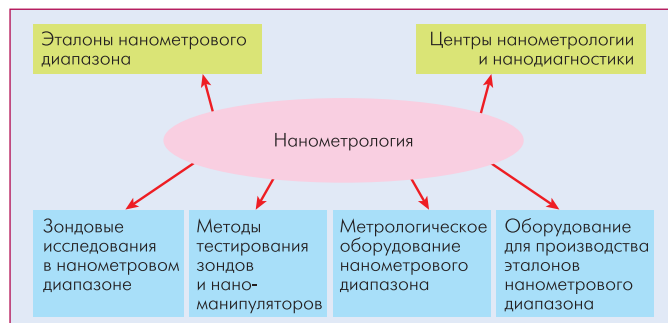


Рис. 14 Основные аспекты нанометрологии

Прикладные проблемы метрологического обеспечения НЭМС столь же очевидны. Они связаны с необходимостью создания (модернизации) измерительной базы (от эталонных комплексов до рабочих средств измерения), способной решить задачи получения, хранения, воспроизведения единиц измерения в наноразмерном диапазоне, а также разработки эффективных методик проведения измерений (рис. 14). При этом необходимо отметить, что отмеченное выше относится не только к измерению линейных размеров, но и охватывает такие параметры как температура, структура и состав наночастиц, твердость поверхности, давление среды. Общие вопросы метрологического обеспечения нанотехнологий, нанопроизводства и устройств рассмотрены в [23].

Интегральная оценка основных достижений отечественных и зарубежных нанотехнологов свидетельствует, что развитие наноматериалов и функциональных изделий нанoeлектроники в стране и за рубежом происходит во многом по схожим направлениям. Вместе с тем эксперты отмечают, что наметились предпосылки к отставанию российских разработок НЭМС от зарубежных в части их доведения до уровня промышленных технологий и последующего внедрения (в том числе в прикладных аспектах, направленных на создание перспективного высокоточного оружия, систем разведки, охраны, гидрометеорологического, навигационно-временного, топогеодезического и других видов обеспечения боевых действий).

Наличие таких предпосылок нельзя игнорировать, особенно с учетом планов широкомасштабного перевооружения армий США и НАТО на основе внедрения достижений нанотехнологий, первый этап которого должен завершиться на рубеже 2011–2015 годов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Альтман. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля. М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
2. Бочаров Л.Ю., Иванов А.А., Мальцев П.П. О зарубежных программах по военной нанотехнологии. Часть 2 // Нано- и микросистемная техника, 2007. № 1, с. 2–11.
3. Defense and Security Applications for Nanomaterials and Nanoparticles - Supplier Data by Strem Chemicals, Strem Chemicals.
4. <http://www.compuenta.ru>.
5. <http://www.computerra.ru>.
6. <http://www.smalltimes.com>.
7. <http://www.cbio.ru/v5/modules/news>.
8. <http://www.nanoproducts.com>.
9. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007>.
10. <http://www.elibrary.ru>.
11. <http://www.lib.muotr.ru>.
12. <http://nano.newage.ru>.
13. <http://www.nanomarket.ru>.
14. <http://www.3dnews.ru/news>.
15. <http://www.technovelgy.com>.
16. <http://www.nanonewsnet.ru>.
17. <http://www.modanews.ru>.
18. <http://www.defender.ru/products>.
19. И.Шеремет. Битва в сети. "Сетецентричная война": истоки и технические аспекты. Военно-промышленный курьер. 2006, № 7.
20. А.Оликевич. Нанотехнологии в технике и вооружении США. 2006 г.
21. Мальцев П.П., Телец В.А., Никифоров А.Ю. Технологии и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001, № 10.
22. <http://www.ruscore.ru>.
23. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Нанометрология в нанотехнологиях // Нано- и микросистемная техника, 2006, № 12.

Уважаемые читатели!

В статье "Возможности и особенности наноимпринт-литографии для производства интегральных микросхем" (С.Бобков, Э.Врублевский, В.Киреев, В.Недзвецкий, А.Трепалин (Россия), И.Томпсон, Г.Дойл, Н.Хуснатдинов, Д.Лабрейк (США), опубликованной в журнале "Наноиндустрия" №3/2007 в таблице 1 (стр.31) допущена опечатка.

Следует читать:

**Таблица 1. Развитие фирмой Molecular Imprints Inc. систем S-FIL наноимпринтлитографии серии Imprio**

Параметры	Модель	
	Imprio 250+	Imprio-HVM
Разрешение нанштампа*, нм	45/32/22	32/22/16
Точность воспроизведения минимального размера, нм, 3σ	5	5
Точность совмещения слоев на пластине, нм	20	7
Производительность при обработке 300-мм пластин, пластин/час	5	20
Плотность привносимой дефектности (дефект/см <sup>2</sup> ) для дефектов с размером d, нм	1 для d≥200	0,03 для d≥20
Совместимость с процессами фотолитографии	совместима	совместима

\* – лимитируется разрешением электронно-лучевой литографии