

УДК 539.22:541.1:620.1

**А. П. Карпинец, канд. хим. наук****Автомобильно-дорожный институт****ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ И В ЕГО ИНФРАСТРУКТУРЕ**

*Обобщен зарубежный опыт использования нанотехнологий и наноматериалов в автомобилестроении, на транспорте и в его инфраструктуре. Проанализированы проблемы и перспективы применения наноструктур в производстве конструкционных материалов, катализаторов топлив для двигателей, безразборного сервиса автомобилей. Обсуждены принципы конструирования наномашин, топливных элементов электромобилей, сенсоров для мониторинга токсикантов.*

**Ключевые слова:** нанотехнологии, автомобильный транспорт, наноматериалы, наноустройства

### **Введение**

Развитие нанотехнологий мировым сообществом ученых признано самым перспективным направлением XXI века. Сущность нанотехнологии состоит в способности работать на атомном, молекулярном и надмолекулярном уровнях (в интервале размеров 1–100 нм) для того, чтобы создавать, обрабатывать и использовать материалы, устройства и системы, которые обладают новыми свойствами и функциональными возможностями благодаря малому размеру элементов их структуры [1]. В результате нанотехнология стимулирует развитие принципиально новой концепции производственной деятельности, а именно «снизу-вверх» от отдельных атомов к изделию, а не «сверху-вниз», как традиционные технологии, в которых изделия получают путем отсечения излишнего материала от более массивной заготовки.

В настоящее время развитие нанотехнологий осуществляется по следующим основным направлениям [2]:

- элементы наноэлектроники и нанофотоники (полупроводниковые транзисторы и лазеры, солнечные элементы, фотодетекторы, различные сенсоры);
- устройства сверхплотной записи информации;
- телекоммуникационные, информационные и вычислительные технологии, суперкомпьютеры;
- молекулярные электронные устройства и нанолитография;
- видеотехника (плоские экраны, видеопроекторы, мониторы);
- устройства микро- и наномеханики (молекулярные мониторы, наномоторы и нанороботы);
- топливные элементы и устройства хранения энергии;
- устройства аэрокосмического и оборонного назначения;
- нанохимия и катализ (в том числе управление процессом горения, нанесение покрытий, фармацевтика);
- устройства мониторинга, а в перспективе и защиты окружающей среды;
- клиническая и медицинская диагностика;
- создание искусственных органов и тканей, имплантация живых органов.

В итоге нанотехнологии объединяют наноразмерные структуры и создают материалы, которые можно эффективно использовать в большинстве отраслей промышленности и транспорта. Если в электронике, аэрокосмической технике и оборонной промышленности

нанотехнологии уже нашли реальное применение [3, 4], то в сфере автомобильного транспорта (АТР) и его инфраструктуры довольно значимые научные и инженерные разработки для оценки их технического инновационного потенциала начаты лишь в последние годы. Информация о них, как правило, фрагментарна и разрознена, не всегда открыта, что в определенной мере затрудняет систематизацию и обобщение полученных результатов.

**Цель данной работы** – анализ современных достижений, тенденций, проблем и перспектив применения нанотехнологий и наноматериалов на АТР и его инфраструктуре.

### **Основной материал исследования**

В настоящее время нанотехнологии определяют темпы развития научно-технического прогресса на АТР и в его инфраструктуре в следующих основных сферах:

- новые конструкционные материалы автомобилестроения с заранее заданным комплексом физико-химических и эксплуатационных свойств;
- нанокompозитные покрытия для снижения трения и защиты от коррозии различных систем, деталей, узлов и агрегатов автомобилей;
- нанокатализаторы в производстве и применении моторных топлив и масел;
- безразборный сервис автомобилей;
- сенсоры для анализа токсикантов в отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС);
- топливные элементы электромобилей;
- современная наносенсорика для обеспечения безопасности движения автомобилей;
- теоретические основы создания нанодвигателей и наномашин.

В данной статье рассматриваются теоретические и прикладные аспекты указанных проблем, причем основное внимание уделено анализу тех направлений, где наиболее четко выявились результаты и перспективы, основанные на достижениях нанотехнологий.

### **Механическое упрочнение композитов армированием наночастицами и наноструктурами**

#### **1. Высокопрочные материалы на основе углеродных нанотрубок и наноструктур**

Интересно отметить, что катализатором развития нанотехнологий стали два фундаментальных достижения науки XXI столетия – открытие низкоразмерных углеродных наночастиц (фуллеренов и трубок), а также создание сканирующего электронного микроскопа [5].

Выявлена специфическая особенность этих наночастиц – способность к глубоким качественным изменениям всего спектра физико-химических свойств при минимальных вариациях их атомно-структурных параметров. Открылись широкие возможности синтеза новых, нередко не известных ранее материалов – химически чистых, структурно упорядоченных, ориентированных, легированных и композитных с рекордными характеристиками и уникальными свойствами, перспективными для инновационных приложений в самых различных областях науки и техники, в том числе в автомобилестроении.

На основе фуллеренов созданы соединения, по объемному модулю упругости и твердости превосходящие алмазы [6]. Сверхтвердые материалы синтезировали из фуллеренов  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  при давлении до 13 ГПа и температуре до 1600° С. Перспективные в автомобилестроении композиты получают также при заполнении фуллеренами  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  углеродных нанотрубок [7].

Важное прикладное значение, кроме фуллеренов, приобретают наноразмерные углеродные трубки (УНТ), которым присущи аномально высокие показатели прочностных и упругих свойств. Предел прочности на разрыв УНТ в 22,5 раза выше, чем у стали, а модуль упругости Юнга в 6–8 раз больше, чем у сплава [1]. Подразумевается, что нанотрубка очень

жесткая и трудно сгибаемая. Однако, это не совсем так из-за того, что трубка очень тонкая – толщина стенки примерно 0,34 нм [5]. УНТ очень упруга при изгибе, она гнется, как соломинка, но при этом не ломается и распрямляется без повреждений. Большинство материалов, как известно [8], ломаются при изгибе из-за наличия дефектов – таких как дислокация и границы зерен. Поскольку стенки УНТ имеют мало структурных дефектов, этого не происходит. Кроме того, углеродные кольца стенок в виде почти правильных шестиугольников при деформации меняют свою структуру и не разрываются [5].

## **2. Армирование металлов и полимеров УНТ**

Вследствие высокой прочности на разрыв и большого отношения длина/диаметр УНТ оказались перспективным материалом для упрочнения композитов [9]. В исследовательском центре корпорации General Motors обнаружено [1], что добавка 11,5 % масс многослойных УНТ к полипропилену, который широко используется как конструкционный материал в автомобилестроении, приводит к удвоению его прочности на разрыв.

Ученые Токийского университета установили [2], что введение 5 % нанотрубок в алюминий увеличивает прочность материала на разрыв вдвое. При оптимальном содержании трубок в компаунде 10 % этот показатель возрастает в 6 раз.

Обнаружено [9], что УНТ образуют прочные химические связи с железом; при введении в сталь 30 % однослойных УНТ диаметром 10 нм и длиной 100 микрон ее прочность увеличивается в 7 раз.

Компаунд УНТ с нейлоном, синтезированный в компании Hyperion Catalysis, эффективно используется в топливной системе автомобиля для защиты от статического электричества [2]. Для изготовления уплотнительных колец этой системы специалисты концерна Toyota разработали композит фторполимера с УНТ [10].

Несмотря на то, что эти результаты выглядят многообещающими, предстоит решить ряд проблем экспериментального характера, в частности в области масштабного недорогого способа производства нанотрубок и разработки методов их введения в металлы и пластики. По прогнозам американских ученых [7], наиболее перспективным представляется армирование наночастицами и наноструктурами полимерных материалов для замены металлических элементов автомобильных конструкций. Широкое применение таких нанокompозитов приведет к снижению потребления бензина только в США на 1,5 млрд л и одновременному уменьшению выбросов диоксида углерода более чем на 5 млн т в год.

В России разработан новый вид покрытия – «жидкая броня», который используется для усиления защиты автомобилей [11]. Покрытие представляет собой гель из твердых наночастиц и жидкого наполнителя. Резкий удар, попадание осколка или пули заставляет частицы мгновенно связываться друг с другом, превращая гель в твердый композит и препятствуя проникновению инородного тела в глубь структуры.

## **3. Графен: его реализованные и потенциальные возможности**

Открытие графена (А. К. Гейм, К. С. Новоселов, школа физики и астрономии университета Манчестера, Нобелевская премия по физике 2010 года), несомненно является нанотехнологическим прорывом.

Графен – это первый представитель двумерных атомных кристаллов, свойства которых в термодинамическом плане существенно отличаются от свойств трехмерных объектов [12]. Его можно рассматривать как гигантскую молекулу, пригодную для химической модификации и перспективную с точки зрения инновационных приложений, использующихся от электроники до композитных материалов, в том числе в автомобилестроении.

Графену присущи уникальные свойства, каждое из которых превосходит таковые у материалов-конкурентов. На сегодняшний день это самый прочный материал на Земле (его прочность в 200 раз выше, чем у стали [13]), очень упругий, непроницаемый для других молекул. Графен очень хорошо проводит электрический ток и тепло, прозрачен, эластичен.

Будучи прочнейшим и одновременно одним из самых жестких известных материалов (с модулем Юнга 1 ТПа), графен является идеальным кандидатом для армирования высококачественных композитов [12]. Его одноатомная толщина дает огромное преимущество: он не может расколоться, что придает ему максимально возможную прочность на изгиб. Высокое аспектное отношение (отношение поперечного размера к толщине) графена позволяет ему быть идеальным ограничителем распространения трещин [13].

Что же касается взаимодействия со связующим материалом – главной проблемой всех нанокompозитных наполнителей типа УНТ – то химическая модификация поверхности или краев графена может значительно усилить его адгезию к полимеру [12].

С участием графена удастся решать и проблему синтеза сверхлегких материалов. Ученые университета Цжэцзя (Китай) создали самый легкий материал – аэрогель плотностью 0,16 мг/см<sup>3</sup> [10]. При этом 1 г графенового аэрогеля способен сорбировать до 68,8 г вещества, нерастворимого в воде. Последнее обстоятельство актуально для связывания и дезактивации различных токсикантов, в том числе обусловленных АТР.

### ***Нанокатализаторы в производстве и применении автомобильных топлив***

Нанокатализаторы, как известно [14], сочетают в себе преимущества традиционных иницирующих систем и наноматериалов и отличаются высокими показателями активности, селективности и стабильности. При этом рекордная эффективность катализаторов обусловлена уникальностью процессов переноса и распределения полей, энергии, массы и информации, которые происходят при наноструктурировании и химических реакциях в наносистемах, а также спецификой морфологии и энергии развитых поверхностей наночастиц [5].

Несмотря на то, что наночастицы сами могут использоваться как наноскопические катализаторы, нанотехнология предлагает совершенно новые средства и системы. Так, начиная с работ Mobil Corporation, возник огромный интерес к применению для направленного катализа в нефтепереработке структур, названных цеолитами [15]. Цеолиты часто называют молекулярными ситами, поскольку их физические размеры позволяют им просеивать молекулы. По своей структуре они похожи на наноскопические галереи или залы, которые связаны нанотуннелями или порами, образованными в твердом теле. При этом частицы инициатора находятся в галереях кристалла цеолита. Комбинация контролируемой химической активности частиц-катализаторов с физическими ограничениями размеров галерей и пор обеспечивает выделение углеводородов строго определенного строения и состава [16]. Синтезированные материалы для цеолитных катализаторов с размером пор в диапазоне 1 нм. Годовой оборот с их применением только в нефтепереработке США превышает 30 млрд долларов [1].

Рассмотрим специфику применения нанокатализаторов в автомобильных топливах. По оценкам российских ученых, наличие нанокаталитических аддитивов (присадок) в бензинах и дизельных топливах существенно снижает образование различных загрязнений и отложений в системах подачи топлива, впускных и выпускных устройствах, в камерах сгорания, в каталитических нейтрализаторах ОГ и в целом благоприятствует улучшению экологических, энергетических и ресурсных характеристик двигателей [17].

Специалисты компании ЗАО «Институт прикладной нанотехнологии» (Россия) предложили новый оригинальный метод снижения эмиссии токсикантов с ОГ ДВС [17]. Эффект достигается за счет использования растворимых в моторном топливе производных карбамида вместе с наноразмерными (13–43 нм) частицами диоксида церия ( $\text{CeO}_2$ ). Технология, получившая название Urea & NanoCatalyst in Fuel Technology, не требует модернизации конструкции системы подачи топлива двигателя и изменений в технологии заправки им на АЗС.

Разработанный авторами [17] нанокаталитический аддитив FaberOx<sup>TM</sup> вводится непосредственно в моторное топливо любого типа и обеспечивает понижение температуры оптимального сгорания. Аддитив повышает энергетическую и эксплуатационную эффективность

работы ДВС, снижает образование отложений в камере сгорания и выпускной системе, сокращает расход топлива, уменьшает эмиссию вредных веществ с ОГ.

На основе FaberOx<sup>TM</sup> и других химических композиций разработаны [18] препараты автомобильной химии – функциональные добавки к бензинам и дизельным топливам:

– нанотюнинг топлива – добавка к бензину для любителей спортивного стиля езды – способствует увеличению мощности двигателя, снижению расхода топлива и токсичности выхлопа, очищает топливную систему и стабилизирует ее работу в целом;

– наноочиститель инжекторов бензинового двигателя – очищает систему подачи топлива от отложений и нагара, способствует удалению губчатых образований с впускных клапанов и нагара со стенок камеры сгорания; облегчает запуск и хорошую приемистость двигателя, снижает износ и коррозию деталей, обеспечивает более «чистое» горение бензина – уменьшает его расход и токсичность выхлопа;

– наноочиститель форсунок дизеля – обеспечивает очистку распылителей, топливной аппаратуры и стенок камеры сгорания от углеродистых отложений и нагара; способствует легкому запуску двигателя, восстановлению распыла топлива и мощности дизеля, снижению износа, уменьшению расхода топлива и токсичности выхлопа;

– наноочиститель каталитического нейтрализатора – очищает нейтрализаторы выхлопных газов бензиновых двигателей, электроды кислородного датчика ( $\lambda$ -зонда); способствует улучшению приемистости двигателя, снижению расхода топлива и токсичности ОГ, увеличению срока службы нейтрализатора.

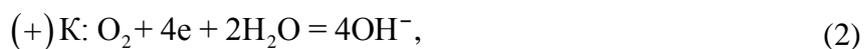
### ***Применение нанотехнологий в устройствах топливных элементов электромобилей***

#### **1. Устройство и принцип работы топливного элемента (ТЭ)**

Схема наиболее изученного и распространенного водородно-кислородного ТЭ со щелочным электролитом такова [19]:



Оба электрода (катод и анод) изготовлены из мелкодисперсных порошков угля и катализатора – металла платиновой группы. Для увеличения поверхности им придают пористую структуру. К аноду подается топливо – водород (восстановитель), окисляющийся до воды, а к катоду подводится окислитель – кислород, который восстанавливается до  $OH^-$ -ионов. Электродные и токообразующие процессы описываются уравнениями:



По внешней цепи от анода к катоду перемещаются электроны, по внутренней (30–40 %-ный раствор KOH) – в противоположном направлении  $OH^-$ -ионы. В итоге в рассматриваемом ТЭ химическая энергия реакции окисления водорода (3) непосредственно превращается в электрическую. Однако, если химическая реакция сгорания  $H_2$  с образованием воды протекает крайне медленно из-за высокой энергии активации [15], то в ТЭ этот барьер снижается катализаторами, которые наносятся на электроды (явление электрокатализа).

Для увеличения напряжения и тока ТЭ соединяют в батареи. Установки, состоящие из батарей ТЭ, емкостей для хранения и обработки топлива и окислителя, систем подвода – отвода реагентов, поддержания и регулирования температуры в элементах, а также преобразования тока и напряжения называют электрохимическими энергоустановками. Они имеют высокий КПД (60–70 %), не загрязняют окружающую среду, обеспечивают космический корабль и орбитальные космические станции не только электроэнергией, но и водой – продук-

том реакции (3). ТЭ широко используются также в оборонной промышленности. Масштабное применение их на автомобильном транспорте позволило бы кардинально решать его экологические проблемы.

## 2. Проблемы и перспективы

Характерно, что в настоящее время разработкой и производством электромобилей активно занимаются ведущие автомобильные концерны США, Китая, Японии и Южной Кореи. Общеввропейская стратегия автомобилестроения также нацелена на расширение выпуска электромобилей [3].

Для широкого использования батарей ТЭ на автомобильном транспорте необходимо решить две основные проблемы: а) произвести замену дорогостоящих материалов – катализаторов электродов на более дешевые; б) обеспечить безопасное хранение водорода.

Принцип действия автомобильных двигателей, работающих на водороде, известен давно [2]:  $H_2$  смешивается с  $O_2$  в специальных камерах – батареях, содержащих другие вещества. В результате реакции (3) генерируется электрическая энергия, которая и питает двигатель. Данная технология применяется в промышленности, но ее основной недостаток – дороговизна (обязательный элемент нынешних водородных батарей – платина). Попытки использовать другие металлы и сплавы не давали результата. Батареи оказывались недолговечными и нуждались в быстрой замене, что делало эксплуатацию таких двигателей крайне неудобной [11].

С применением платиновых электродов крупнейшие автомобилестроительные компании ведут собственные разработки водородных двигателей. Концерн Hyundai объявил о том, что вскоре начнет пробные продажи своей популярной модели ix35 с двигателем на  $H_2$ . Toyota представила на Международном салоне в Токио концепт-кар с водородным двигателем, Daimler и Volkswagen планируют это сделать в 2016–2017 гг. Но даже руководство этих компаний признает, что такие автомобили будут очень дорогими и не уверенно в их коммерческом успехе.

В конце 2013 года небольшая британская фирма Acal Energy заявила об изобретении, способном произвести прорыв в мировой автомобилестроительной промышленности. Платину удалось заменить жидким раствором солей металлов. Это значительно удешевляет двигатели от Acal Energy. Замену батарей нужно проводить ненамного чаще, чем смену обычных аккумуляторов. На одной водородной заправке автомобиль в зависимости от мощности двигателя способен проехать от 450 до 650 километров [20]. Фирма Acal Energy намерена запатентовать изобретение и продать его крупным автомобильным компаниям. По прогнозам специалистов фирмы, массовая продажа машин с водородными двигателями начнется с 2020 года, когда будет внедрена разработанная ими технология и создана сеть специальных заправочных станций.

Вторую важную проблему применения ТЭ на АТР – обеспечение безопасного хранения  $H_2$  – удастся решить с помощью нанотехнологий. Один из способов эффективного и надежного хранения  $H_2$  – заполнение им УНТ. Для этой цели используется несложная электрохимическая ячейка проведения электролиза водных растворов [1]. Катод состоит из листа одностенных нанотрубок, в качестве анода используют  $Ni(OH)_2$ ; электролит – 6М раствор КОН. На катоде протекает разряд молекул воды по уравнению



а выделяющийся электролитически чистый водород заполняет УНТ. Концентрацию связанного в трубках газа оценивают по уменьшению интенсивности спектра комбинационного рассеяния света нанотрубок с максимумом  $\tilde{\nu} = 2667 \text{ см}^{-1}$  [3].

При изучении адсорбционных явлений, протекающих на границе раздела УНТ- $H_2$ , установлено [21], что адсорбция газа при комнатной температуре и его давлении 100 атм достигает 4,2 % масс., что отвечает атомному соотношению Н/С 0,52, причем в течение перво-

го часа поглощается до 70 %  $H_2$ . В процессе десорбции около 80 % адсорбированного газа освобождается воспроизводимым образом при атмосферном давлении и комнатной температуре. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности применения одностенных УНТ в качестве емкой накопительной среды для водорода.

Более значимые результаты получены при использовании жгутов одностенных нанотрубок [21]. Диаметр жгутов составляет 6–12 нм. Для разрыхления плотной структуры, их в течение 10 часов подвергали ультразвуковой обработке. Полученный таким методом материал обладал удельной поверхностью 285 м<sup>2</sup>/г. Максимальная степень заполнения достигалась при 80 К и давлении 0,5 атм и составила 8,5 % масс. Это рекордный результат для всех углеродных материалов, применяющихся в настоящее время для хранения  $H_2$ .

### ***Нанотехнологии в развитии безразборного сервиса автомобилей***

Известно [11], что потери энергии на автомобильном транспорте вследствие трения деталей двигателей составляют до 15 % от всех потерь, а поскольку только в странах ЕС 30 % энергетических затрат приходится на автотранспорт, важность решения трибологических проблем становится очевидной.

Совместное использование теоретических исследований и практических достижений трибологии и нанотехнологии позволяет применять трение не как разрушительное явление природы, а как самоорганизующийся созидательный процесс, в том числе для безразборного восстановления агрегатов и узлов автомобильной техники в процессе их непрерывной эксплуатации [18]. Теоретическими предпосылками безразборного сервиса явились исследования в теории самоорганизации и диссипативных структур И. Р. Пригожина [22]. В прикладном плане он базируется на научных открытиях российских ученых – явление избирательно-переноса при трении: эффект безызносности (Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский), эффект пластифицирования поверхностей трения в присутствии поверхностно-активных веществ (П. А. Ребиндер и его ученики) и др. [18].

В настоящее время к нанотехнологическим препаратам автохимии для применения в качестве присадок и добавок к смазочным материалам автомобильной техники относятся следующие разработки [23]:

1. Приработочные препараты на основе наноалмазов (Lubrifilm Diamond Run In, Fenom Nanodiamond Green Run и др.). Входящие в состав присадок наноалмазы диаметром 4–6 нм и кластерный углерод структурируют масляную пленку, увеличивают ее динамическую прочность, упрочняют кристаллическую решетку металла, формируют новые поверхности трения, уменьшая граничное трение и износ, в особенности при больших нагрузках и дефиците смазочного материала. В итоге сокращается время обкатки и оптимизируется качество трущихся соединений, улучшается работа двигателя, снижается расход топлива и масла, а также концентрация токсикантов в ОГ.

2. Кондиционеры металла (Energy Release, SMT2 и др.) в результате трибохимических реакций образуют защитный граничный слой толщиной 20–40 нм, который приобретает пластичные и упругие свойства, антифрикционные качества и одновременно стойкость к высоким нагрузкам.

3. Рекондиционеры (Oil Chap, Tensai), созданные с применением золь-гель технологии. Полимолекулярная система препаратов, включающая в себя наноразмерные кластеры органических соединений, структурирует граничную масляную пленку и увеличивает адгезию масла к металлу.

4. Реметаллизанты или восстановительные присадки (Return Metal, Renom Engine NanoGuard и др.) содержат маслорастворимые или порошкообразные металлоорганические соединения, реализуют трибохимический «ионный» механизм металлоплакирования поверхностей трения вследствие образования (восстановления) на них металлосодержащей, нано-

структурированной защитной пленки. Присадки способствуют «лечению» нано- и микродефектов поверхностей трения и восстановлению их работоспособности.

5. Геомодификаторы («геоактиваторы»), ремонтно-восстановительные составы (PBC-технология) или «ревитализанты») (FENOM nanotechnology, RVS, Forsan, XADO и др.) – препараты автохимии на основе минералов естественного и искусственного происхождения (нано- и микроуровня). Попадая на поверхность трения вместе с маслом или пластичной смазкой, они инициируют процесс формирования металлокерамической наноразмерной структуры с высокой износостойкостью и малым коэффициентом трения.

Рассмотренные нанотехнологические препараты автохимии обеспечивают целый комплекс самых разнообразных положительных характеристик. Они позволяют в 1,5–2 раза повысить износо- и задиростойкость деталей двигателей, трансмиссии и рулевого управления; на 5 % поднять мощность двигателя за счет повышения компрессии и снижения потерь на трение; сократить время и улучшить качество приработки поверхностей трения; повысить их межремонтный ресурс до 2 раз; снизить на 5–10 % расход топлива и смазочных материалов, уменьшить вдвое вредные выбросы в атмосферу [23].

### *Сенсоры в мониторинге отработавших газов ДВС*

Сенсор, как известно [19], представляет собой физическое устройство для идентификации и количественного определения нейтральных и ионизированных частиц органических и неорганических соединений. Основная составляющая сенсора – чувствительный слой, нанесенный на твердую подложку, который при контакте с определяемыми частицами субстрата подвергается изменению, т. е. сопровождается генерированием сигнала. Компонентами активного слоя служат оксиды и сульфиды металлов, электропроводящие полимеры, а также наноструктуры.

Аналитические возможности для конструирования химических и электрохимических сенсорных (ЭХС) устройств с использованием наночастиц подробно описаны в работах [1, 14]. Нанокристаллы металлоорганических соединений платины проявляют высокую сенсорную активность на  $SO_2$  [24], а именно сернистый газ в основном образуется при сгорании неактивных соединений серы, содержащихся в бензинах. Суммарная концентрация сульфидов  $R-S-R$ , дисульфидов  $R-S-S-R$  и полисульфидов  $R-S_n-R$  (где  $R$  – углеводородный радикал) согласно требований Евро-4 не должна превышать 30 ppm ( $млн^{-1}$ ) [11], и каждый последующий стандарт снижает ее на целый порядок. В качестве лигандов комплексов указанных нанокристаллов используются и другие токсиканты:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CL_2$  [24].

Эффективны газовые сенсоры на основе углеродных нанотрубок (УНТ) [3]: при их использовании происходит увеличение электропроводности на три порядка при экспонировании чувствительного слоя  $NO_2$  и уменьшение ее в 100 раз в присутствии паров  $NH_3$  [19]. УНТ применяют в качестве катода для создания сенсоров, основанных на ионизации определяемого газа [14]. Газ ионизируется в электрическом поле и идентифицируется по напряжению пробоя. Характерно, что сенсорные материалы на нанотрубках миниатюрны, имеют размеры в несколько квадратных микрометров, относительно недороги и могут использоваться для экомониторинга при комнатных температурах.

Проблема селективности при идентификации компонентов сложных газовых смесей (а ОГ ДВС именно таковы) может быть успешно решена с участием графена – уже сейчас зафиксирована его высокая чувствительность и избирательность по отношению к  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$  [12]. Перспективны предельно чувствительные газовые детекторы: графен, будучи поверхностью без объема, может обнаруживать присоединившиеся к нему единичные молекулы. Кроме того, исключительная механическая прочность и высокое кристаллическое совершенство позволяют использовать графен для создания идеальных газовых барьеров, в том числе для токсикантов, обусловленных АТР [13].

### ***Принципы конструирования наноустройств и наномашин***

В настоящее время проводятся интенсивные исследования наноэлектромеханических систем (NEMSs) – хотя многие из них находятся на ранних стадиях разработки, а отдельные все еще пребывают на этапах выработки концепции [2]. И хотя уже сейчас предложены многочисленные компьютерные модели возможных принципов конструирования и самих наномашин [25], приходится констатировать, что природа пока заметно опережает нас по своей способности создавать машины наноразмеров. Нанодвигатели (например, жгутиковый двигатель бактерий и др.) давно существуют в биологических системах [26]. Скорее всего изучение биологических наномашин подскажет ученым идеи, которые помогут улучшить конструкцию их механических аналогов.

Недавно на основе многослойных УНТ создан наномотор с наибольшим размером этого устройства 500 нм, длиной ротора 100–300 нм, а нанотрубки в роли оси – 5–10 нм [1]. Предложен метод изготовления шестеренок путем прикрепления молекул бензола к внешней стороне УНТ [25]. Ключевой частью любой наномашин является способ приведения ведущей шестеренки в движение. Так, для перекачивания на поверхности кристалла NaCl адсорбированной молекулы фуллерена C<sub>60</sub> предложено использовать электрическое поле, которое не требует контакта с наноструктурой [1].

Детально рассмотрены потенциальные возможности молекулярной наномашин, которая преобразует энергию света в физическую работу в результате изомерных превращений азобензольного полимера в [1].

Исследователи из Центра разработки материалов CEMES-CNRS (Франция) и их коллеги из Берлинского университета предложили способ управления вращением молекулярного колеса [27]. Удивительная молекула, состоящая из колеса диаметром 0,7 нм, прикрепленного к оси длиной 0,6 нм, по сути является первой молекулярной машиной. В 2005 году ученые из CEMES-CNRS представили научному сообществу первый молекулярный двигатель.

Современная молекулярная наномашин состоит из двух рабочих колес из молекул триптицена, соединенных осью. Вся эта химическая конструкция располагается на медной подложке. Вращение колес осуществляется с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа [27]. Результаты работ ученых впечатляют нанотехнологов, занимающихся созданием молекулярных наномашин. По их мнению, молекулы-колеса смогут занять свое место в сложных наномашин будущего – молекулярных грузовиках и нанороботах.

На создание наноавтомобиля с наномотором ушло целых 10 лет [26]. За разработку наноавтомобиля – первой движущейся управляемой наносистемы ее автор, профессор Д. Тур, был назван в 2006 году «Исследователем года» по версии авторитетного в области микро- и нанотехнологий издания Small Times Magazine [27].

В настоящее время созданы первые модели наноавтомобилей размером всего 3–4 нм каждый. На площади всего в 1 мм<sup>2</sup> могут припарковаться 10 млрд таких наномашин [26].

Характерно, что самым первым наноавтомобилем была большая молекула, которая состояла из почти 300 атомов углерода [27]. Колесами служили фуллерены, а ездил наноавтомобиль по золотой пластинке. При нагревании подложки до 200° С фуллерены начинали вращаться, и автомобиль двигался. Однако он оказался неуправляемым: если на одной пластинке находится много наноавтомобилей, то при нагревании все они приходят в движение, начинают сталкиваться, образуют своеобразные пробки [26]. Тогда ученые предложили поставить на каждый автомобиль наномотор и назвали его наноактюатором.

Наноактюатор работает под действием света, и таким автомобилем можно управлять – при освещении наноавтомобиля он перемещается, в отсутствие света – останавливается. Неожиданно оказалось, что мотор не работает в присутствии фуллеренов. Пришлось менять материал колес – им оказались карбораны, содержащие атомы углерода, водорода и бора. И наноавтомобиль с наномотором, наконец, пришел в движение. Компьютерные модели указанных наноавтомобилей приведены в [26] и на рисунках 1, 2.

Интенсивная работа по созданию наноавтомобилей продолжается в различных лабораториях мира. Удалось сконструировать наноавтомобиль на фуллереновых колесах, который ездит и при комнатной температуре со скоростью более 4 нм/с [26].

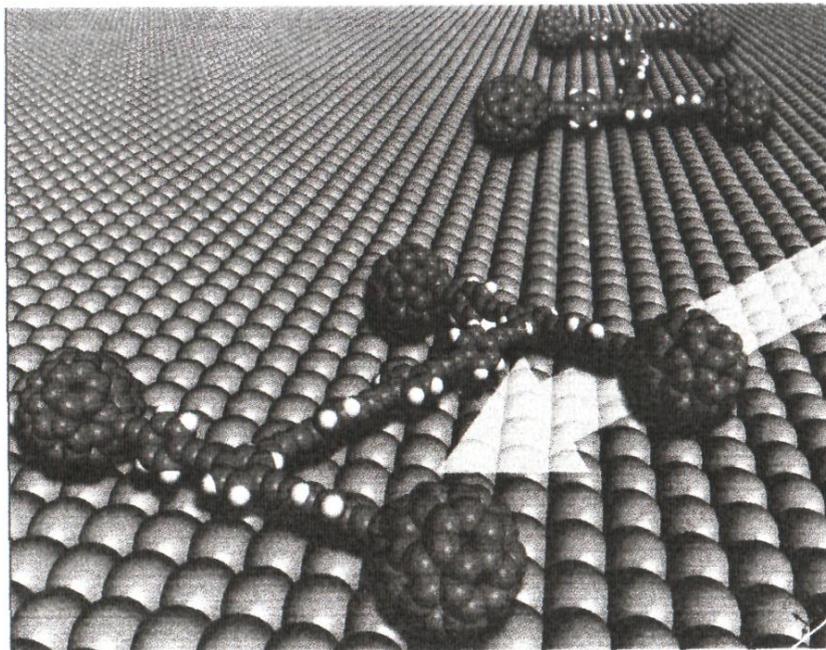


Рисунок 1 – Компьютерная модель наноавтомобиля на колесах-фуллеренах [26]

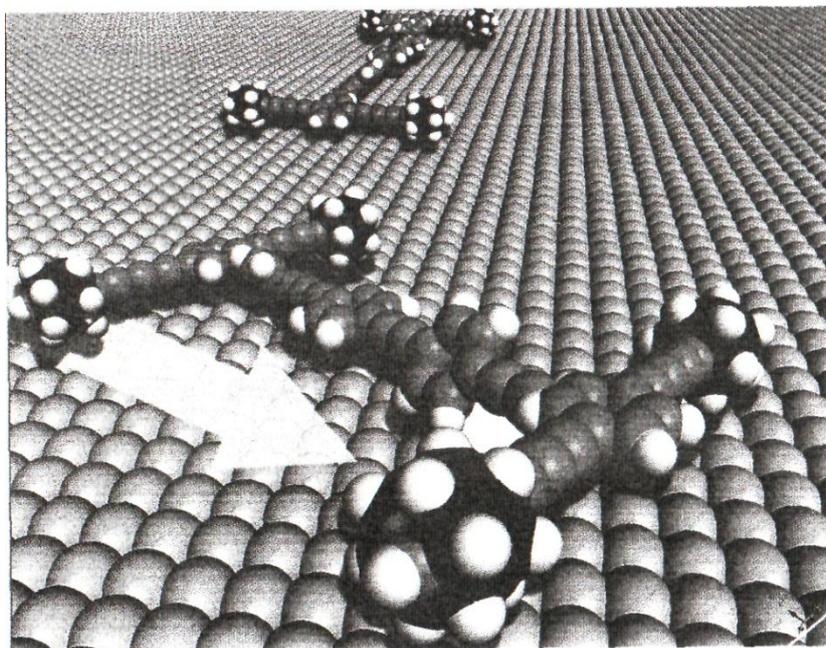


Рисунок 2 – Компьютерная модель наноавтомобиля на колесах-карборанах [26]

Volkswagen представил оригинальный проект машины, получивший название Nanospyder. Каркас автомобиля предлагается изготавливать из миллиардов блоков наночастиц. Благодаря им, в случае столкновения, кузов автомобиля деформируется, надежно защищая находящихся в салоне пассажиров [27]. Проблему безопасности современных автомобилей удастся успешно решать, используя датчики нанометровых размеров для активации подушек безопасности в транспортных средствах [1].

Перспективы автомобилей будущего: концепт-кары ведущих мировых автодизайнеров поражают футуристичностью своих форм и инновациями технических решений, воплощение которых возможно лишь с широким применением нанотехнологий.

Концептуальный суперкар *Giugiaro Vadho* компании *HaldeSign Giugiaro* способен не только ездить, но и летать. Салон здесь совсем не салон, а двухместный кокпит, накрытый прозрачным фонарем. Приборная начинка – авионика, двигатель – водородный, располагается сбоку от кокпита [26].

Швейцарская компания *Rinspeed* разработала подводный автомобиль *Rinspeed sQuba*, элементы которого выполнены на основе углеродных нанотрубок [10]. Концепт представляет собой первый в мире двухместный родстер, способный передвигаться под водой. Движение осуществляется за счет двух водоструйных двигателей, расположенных в «кормовой» части. Для удобства водителя и пассажира, которые с головой окунутся в воду (верх автомобиля – открытый), предусмотрено специальное устройство для дыхания, похожее на кислородную маску акваланга.

С помощью нанотехнологий привычный автомобиль можно преобразовать до неузнаваемости. К примеру, концепт «автомобиля будущего» от *Audi – Virtuea Quattro*, разработанный в центре дизайна *Audi/VW* в Калифорнии. Этот автомобиль работает, естественно, на водороде и рассчитан на одного человека. *Virtuea Quattro* будет формировать свой внешний облик при помощи голографических изображений, программировать которые сможет сам водитель через многофункциональный интерфейс. Миллионы схем, заложенных в память бортового компьютера концепта, позволяют выбрать для машины любой «наряд» – от средневековой кареты до имитации облика соковыжималки [27].

В недалеком будущем на смену целой гаммы типов кузовов придет один, способный менять свою форму в зависимости от конкретного запроса водителя. Корпус *Mercedes-Benz Silver Flow* – это магнитное соединение (металлические наночастицы удерживаются вместе магнитными полями), которое может восстанавливать свою форму по одному клику на брелке сигнализации или внутри автомобиля. Водитель сможет выбирать тип и цвет корпуса автомобиля из нескольких возможных «предустановленных» скинов. Передача механической энергии к колесам, по замыслу конструкторов, осуществляется специальной жидкостью, молекулы которой приводятся в движение электростатическими наномоторами. Четыре поворотных колеса позволят автомобилю разворачиваться на месте и парковаться боком [25].

### **Выводы**

1. Обобщен зарубежный опыт применения нанотехнологий и наноструктурированных материалов в автомобилестроении, на транспорте и его инфраструктуре. Установлен различный уровень теоретических и прикладных исследований отдельных аспектов этой проблемы – от стадии выработки концепции до внедрения в промышленное производство.

2. Обсуждены тенденции развития, проблемы и перспективы в создании и использовании наночастиц и наноструктур в производстве конструкционных материалов с заданным спектром эксплуатационных свойств. Наиболее эффективные армирующие компоненты нанокompозитов получены на основе УНТ, фуллеренов и графена.

3. Проанализированы особенности применения нанокатализаторов в производстве и использовании автомобильных топлив. Приведена характеристика состава и физико-химических свойств нанотехнологических препаратов автохимии для безразборного сервиса транспортных средств.

4. Выявлена специфическая роль нанотехнологий и наноматериалов в разработке и внедрении топливных элементов электромобилей, химических и электрохимических сенсоров для мониторинга токсикантов в ОГ ДВС.

5. Рассмотрены имеющиеся большие потенциальные возможности, принципы моделирования и конструирования наноустройств, нанодвигателей и наноавтомобилей.

### Список литературы

1. Пул, Ч.-мл. Нанотехнологии / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. – М. : Техносфера, 2010. – 330 с.
2. Roco, M. C. Nanotechnology Research Directions / M. C. Roco, R. S. Williams, A. P. Alivisatos. – Dordrecht : Kluwer Academic Publication, 2000. – 360 p.
3. Bushan, Ed. V. Springer Handbook of Nanotechnology / Ed. V. Bushan. – Heidelberg ; Berlin : Springer, 2004. – 1500 p.
4. Рахман, Ф. Наноструктуры в электронике и фотонике / Ф. Рахман. – М. : Техносфера, 2010. – 344 с.
5. Gusev, A. I. Nanocrystalline Materials / A. I. Gusev, A. A. Rempel. – Cambridge : Cambridge International Science Publication, 2004. – 351 p.
6. Костюк, Г. И. Фуллерены: физика, химия, техника и применение : учеб. пособие / Г. И. Костюк, Е. В. Набока, О. О. Бруяка. – Х. : Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2012. – 188 с.
7. Yi-Ru, Ying G. Nanostructured Materials / G. Yi-Ru Ying. – New York : Academic Press, 2001. – 350 p.
8. Кавалейро, А. Наноструктурные покрытия / А. Кавалейро, Д. Хоссон. – М. : Техносфера, 2011. – 752 с.
9. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы / Г. И. Костюк. – К. : Издательский центр Международной академии наук и инновационных технологий, 2012. – 648 с.
10. Ю-Винг, Май. Полимерные нанокомпозиты / Май Ю-Винг, Ю. Жонг-Жен. – М. : Техносфера, 2011. – 688 с.
11. Балабанов, В. И. Нанотехнологии. Наука будущего / В. И. Балабанов. – М. : Эксмо, 2009. – 248 с.
12. Гейм, А. К. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену / А. К. Гейм // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1284–1298.
13. Новоселов, К. С. Графен : материалы Флатландии / К. С. Новоселов // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1299–1311.
14. Сергеев, Г. В. Нанохимия : учеб. пособие / Г. В. Сергеев. – М. : КДУ, 2006. – 336 с.
15. Колесников, И. М. Катализ и производство катализаторов / И. М. Колесников. – М. : Техника, 2004. – 400 с.
16. Гребенников, Е. П. Проблемы разработки промышленных нанотехнологий / Е. П. Гребенников // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2010. – № 5. – С. 84–87.
17. Нанокатализаторы в топливе для транспорта. Нано без границ / А. Абрамян [и др.] // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 26–28.
18. Балабанов, В. И. Безразборный сервис автомобиля / В. И. Балабанов, В. И. Беклемшев, А. Г. Гамидов. – М. : Известия, 2007. – 272 с.
19. Гульгай, В. П. Электрохимия органических соединений в начале XXI века / В. П. Гульгай, А. Г. Кривенко, А. П. Томилов. – М. : Компания Спутник, 2008. – 578 с.
20. Беззубцева, М. М. Нанотехнологии в энергетике / М. М. Беззубцева, В. С. Волков. – СПб. : СПбГАУ, 2013. – 206 с.
21. Солнцев, Ю. П. Нанотехнологии и специальные материалы : учеб. пособие для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2007. – 176 с.
22. Пригожин, И. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М. : Мир, 2002. – 461 с.
23. Балабанов, В. И. Нанотехнологические препараты автохимии для безразборного сервиса автомобиля / В. И. Балабанов, В. Ю. Болгов, В. В. Лехтер // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 2. – С. 130–133.
24. Organoplatinum Crystals for Gas-Triggered Switches / M. Albrecht, M. Lutz, A. Spek, G. van Koten // Nature. – London. – 2000. – Vol. 406, № 3. – P. 970–974.
25. Bolzani, V. Molecular Devices and Machines. A Journey into the Nanoworld / V. Bolzani, M. Venturi, A. Credi. – New York : Wiley VCH, 2003. – 494 p.
26. Алфимова, М. М. Занимательные нанотехнологии / М. М. Алфимова. – М. : Парк-медиа : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 96 с.
27. Ковшов, А. Н. Основы нанотехнологий в технике : учеб. пособие для студентов вузов / А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, И. М. Ибрагимов. – М. : Издательский центр «Академия», 2009. – 240 с.

*А. П. Карпинец*

*Автомобильно-дорожный институт*

*ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка*

**Перспективы применения наноматериалов и нанотехнологий на автомобильном транспорте и в его инфраструктуре**

Обобщен зарубежный опыт использования нанотехнологий и наноструктурированных материалов в автомобилестроении, на транспорте и в его инфраструктуре.

Армирование углеродными нанотрубками (УНТ) полипропилена, который широко применяется как конструкционный материал автомобильной техники, приводит к удвоению его прочности на разрыв. Введение 10 % нанотрубок в алюминий обеспечивает возрастание этого показателя в 6 раз, а добавка 30 % УНТ в сталь – в 7 раз. Высокопрочные композиты созданы на основе фуллеренов  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  и графена. При технологическом использовании наночастиц следует решить проблемы их масштабирования и разработать эффективные методы их введения в металлы и пластики.

Нанокаталитический аддитив FaberOx™ и его аналоги вводятся непосредственно в моторное топливо и повышают энергетическую и эксплуатационную эффективность работы ДВС, снижают образование отложений в камере сгорания и выпускной системе, сокращают расход топлива, уменьшают эмиссию токсикантов с отработавшими газами (ОГ).

С помощью нанотехнологий удастся решить одну из основных проблем применения топливных элементов в электромобилях – обеспечение безопасного хранения водорода ( $H_2$ ). Экспериментально установлено, что наиболее эффективный и надежный способ – заполнение  $H_2$  жгутов УНТ (максимальная степень заполнения 8,5 % масс). Вторую проблему – замену дорогостоящих платиновых электродов на соли металлов решили специалисты британской фирмы ACAL Energy.

Совместное использование теоретических исследований и практических достижений трибологии и нанотехнологии позволяет применять трение не как разрушительное явление природы, а как самоорганизующийся созидательный процесс, в том числе для безразборного сервиса автомобилей. Проанализированы составы и эксплуатационные свойства нанопрепаратов автохимии.

Обсуждены аналитические возможности химических и электрохимических сенсоров для экомониторинга токсикантов ( $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CO_2$ ), обусловленных автомобильным транспортом. Графен перспективен как сенсор, так и идеальный газовый барьер для токсикантов ОГ.

Рассмотрены, имеющие большие потенциальные возможности, принципы моделирования и конструирования наноустройств, нанодвигателей и наноавтомобилей. В настоящее время созданы первые модели наноавтомобилей размером всего 3–4 нм.

НАНОТЕХНОЛОГИИ, АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ, НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОУСТРОЙСТВА

*A. P. Karpinets*

*Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka*

**Perspectives of Nanomaterials and Nanotechnologies Application in Automobile Transport and its Infrastructure**

Foreign experience of nanotechnologies and nanostructured materials application in the automobile production, on transport and its infrastructure is summarized.

Reinforcement by carbon nanotubes (CNT) of the polypropylene widely used as a constructive material of the automotive engineering leads to its tensile strength doubling. Introduction of 10 % of nanotubes in aluminum provides an increase of this indicator in 6 times and CNT addition of 30 % in steel – in 7 times. High-strength composites are made on the base of fullerenes  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  and graphene. At the manufacturing application of nanoparticles, problems of their scaling must be solved and effective methods of their introduction in metals and plastics must be developed.

Nanocatalytic additive FaberOx™ and its analogs are introduced directly in automobile fuel and increase power and operational efficiency of the internal combustion engine, reduce sediment formation in the combustion chamber and exhaust system, fuel consumption, decrease emission of toxicants with exhaust gases (EG).

With the help of nanotechnologies, one of the main problems of fuel cell application in electric vehicles can be solved – to provide safekeeping of hydrogen ( $H_2$ ). It has been found experimentally that the most effective and reliable method is to fill  $H_2$  bundles by CNT (maximum degree of fill is 8,5 % mass.) The second problem is the substitution of expensive platinum electrodes for metal salt. It was solved by specialists of the British firm ACAL Energy.

Sharing of theoretical researches and practical achievements in tribology and nanotechnology allows to apply friction not as destructive natural phenomenon but as self-organizing creative process for automobiles without dismountable service as well. Compositions and service properties of automobile chemistry nanopreparations are analyzed.

Analytical abilities of chemical and electrochemical sensors for ecomonitoring of toxicants (SO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) caused by automobile transport are discussed. Graphene is perspective both as a sensor and as an ideal gas barrier for EG toxicants.

Existing large modelling and designing potentialities of nanodevices, nanoengines, nanoautomobiles are considered. At present, the first models of nanoautomobiles with the size of 3–4 nm are made.

NANOTECHNOLOGIES, AUTOMOBILE TRANSPORT, NANOMATERIALS, NANODEVICES

**Сведения об авторе:**

**А. П. Карпинец**

SPIN-код: 7644-1653  
SCOPUS ORCID ID: 0000-0003-0424-7791  
Телефон: +380(50)-53-57-640  
Эл. почта: kaf\_OND@mail.ru

*Статья поступила 08.11.2016*

*© А. П. Карпинец, 2017*

*Рецензент: С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, проф. АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»*