

УДК 539.2 + 620.1 + 629.113

А. П. Карпинец, канд. хим. наук, доц.

**Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ «Донецкий национальный
технический университет», г. Горловка**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ. ЧАСТЬ 2. НАНОКАТАЛИЗАТОРЫ, НАНОУСТРОЙСТВА И НАНОМАШИНЫ

Обобщен зарубежный опыт использования нанотехнологий на автомобильном транспорте. Проанализированы специфические особенности применения наноструктурированных материалов при разработке и внедрении катализаторов в топливах для двигателей, химических и электрохимических сенсоров для экомониторинга токсикантов в отработавших газах ДВС.

Обсуждены принципы конструирования нового поколения устройств, приборов и машин, имеющих элементы наномасштабных размеров.

Введение

В предыдущем сообщении [1] рассмотрены современные достижения, тенденции, проблемы и перспективы применения наноструктур и функциональных материалов в автомобилестроении, а также роль нанотехнологий в развитии безразборного сервиса автомобилей.

В данной статье обсуждаются теоретические и прикладные аспекты использования нанотехнологий в процессах производства и применения моторных топлив, химических и электрохимических сенсоров (ЭХС) для идентификации и количественного определения токсикантов в отработавших газах (ОГ) ДВС. Кроме того, освещаются принципы создания нового поколения устройств, двигателей и машин, имеющих элементы наномасштабных размеров, а также другие инновационные приложения достижений нанотехнологий на транспорте и его инфраструктуре.

Изложение основного материала исследований

Нанокатализаторы в производстве и применении автомобильных топлив

Интересно отметить, что в нанонауке и нанотехнологиях катализ играет две основные роли [2]: с одной стороны, катализаторы используются в различных методиках получения квантовых точек, нанотрубок и множества других наноструктур, а с другой, отдельные наноструктуры сами могут служить инициаторами для многих химических реакций.

Нанокатализаторы сочетают в себе преимущества традиционных каталитических 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, которая происходит при наноструктурировании и химических процессах в наносистемах, а также спецификой морфологии и энергетики развитых поверхностей наночастиц [3].

Хотя 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 [4]. Цеолиты часто называют молекулярными ситами, поскольку их физические размеры позволяют им просеивать молекулы. По структуре они похожи на наноскопические галереи или залы, которые связаны нанотуннелями или порами, образованными в твердом теле.

© Карпинец А. П., 2013

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 определенного строения и состава [2].

Такие пористые структуры позволяют осуществлять более эффективную переработку нефти, их можно использовать для селективного отбора определенных соединений из множества нефтепродуктов. Синтезированы материалы для цеолитных катализаторов с размером пор в диапазоне 1 нм. Годовой оборот с их применением только в химической промышленности США превышает 30 млрд долларов [2].

Специалисты Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук разработали технологию производства процесса нанокаталитического крекинга высокомолекулярного нефтяного сырья и образования бензиновых фракций [5]. На ОАО «Сибнефть-Омский НПЗ» освоен промышленный выпуск таких катализаторов крекинга мощностью до 3000 т/год. Нанокатализаторы обеспечивают получение крекинг-бензина с октановым числом до 92 и выходом топлива 55–56 %, что является одним из лучших показателей в мировой практике нефтепереработки.

Создание дизайна новых каталитических наносистем на поверхности цеолитов позволило усовершенствовать технологию синтеза топливных изоалканов, отличающихся высокой устойчивостью к детонации [6].

Технологические решения, используемые при создании систем нанокатализаторов нефтепереработки, вскоре начнут применяться и в нефтегазовой nanoиндустрии. Важную роль в процессах добычи нефти уже в ближайшие годы станут играть нанокolleкторы с размером пор менее 100 нм и для их разработки потребуются технологии, которые учитывают наноразмер порогового пространства [7].

Нанокolleктором метана является каменный уголь: в нем преобладают поры диаметром менее 10 нм и поэтому добыча природного газа и борьба с его выбросами должны ориентироваться на работу с наноразмерными порами [7]. Характерно, что в недрах угольных бассейнов сосредоточены значительные ресурсы спутника угля – метана, соизмеримые с запасами газа традиционных месторождений мира [8]. В связи с этим угольные бассейны должны рассматриваться как метаноугольные, подлежащие комплексному поэтапному освоению с опережающей широкомасштабной добычей метана. Для Украины, которая добывает всего 20 % природного газа и 15 % нефти от необходимого количества, внедрение nanoинноваций в нефтегазовую промышленность особенно актуально.

В настоящее время в качестве моторного топлива используют природный газ более 1 млн транспортных средств [8]. Лидируют в этой сфере Аргентина, Италия, США и Российская Федерация.

Производством автомобилей, работающих на природном газе, сегодня занимаются около 50 крупных моторостроительных компаний, в том числе BMW, Honda, General Motors, Volvo [8]. Исследования токсичности газобаллонных автомобилей показывают, что при замене бензина природным газом выброс токсических составляющих в атмосферу снижается в 3–5 раз. Кроме того, использование сжатого природного газа экономически выгодно вследствие увеличения ресурса двигателя, долговечности цилиндрико-поршневой группы в 1,5 раза, уменьшения расхода моторных масел на 30–40 % [8]. Во многих странах на законодательном уровне закреплена стоимость природного газа на уровне 30–50 % стоимости эквивалентного количества светлых нефтепродуктов [7].

Кратко остановимся на специфике применения нанокатализаторов в топливах для двигателей. Прежде всего наличие нанокаталитических аддитивов (присадок) в бензинах и дизельных топливах заметно снижает образование различных загрязнений и отложений в устройствах подачи топлива, впускных и выпускных системах, камерах сгорания, каталитических нейтрализаторах ОГ и в целом способствует улучшению энергетических, ресурсных и экологических характеристик двигателей [9].

Эффективно внедряется нанокаталитический аддитив FaberOx™ на основе растворимых в моторных топливах производных карбамида и наноразмерных частиц диоксида церия CeO₂ [9]. Введение его в топливо любого типа обеспечивает: понижение температуры оптимального сгорания, повышение энергетической и эксплуатационной эффективности работы ДВС, снижение образования отложений в камере сгорания и выпускной системе, сокращение расхода топлива, уменьшение эмиссии токсикантов с ОГ.

На основе FaberOx™ и других химических композиций разработаны и нашли практическое применение функциональные добавки к автомобильным топливам [10]: нанотюнинг топлива, наноочистители инжекторов бензинового двигателя и форсунок дизеля, наноочиститель каталитического нейтрализатора. В нейтрализаторе происходит эффективная очистка ОГ бензинового двигателя от оксида углерода CO, оксидов азота и серы, углеводородов.

Характерно, что каталитическое окисление CO довольно широко используется не только для конверсии автомобильных выхлопов, но и при очистке воздуха, в технологии новых топливных элементов, которые основаны на окислении метанола и других органических соединений [2].

Для электрохимического окисления оксида углерода в качестве катализаторов применены наночастицы золота размером 2 и 5 нм, окруженные молекулами декантиолов [3].

Каталитическое окисление CO ($CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$) активно изучается на металлах платиновой группы [2]. Японская Mazda Corporation объявила о завершении еще в 2007 году разработки первого в мире автомобильного каталитического конвертера, использующего нанотехнологические компоненты [10]. Такая инновация позволяет сократить содержание в катализаторе драгоценных металлов – платины и палладия на 70–90 % при неизменном КПД устройства. Каталитический конвертер (нейтрализатор) встраивается в выпускную систему современных автомобилей для очистки ОГ от вредных веществ CO, NO_x, C_nH_m, которые на поверхности инициатора превращаются в нетоксичные соединения.

В связи с резким ростом цен на металлы платиновой группы автопроизводители заняты поиском методов снижения затрат на очистку выхлопных газов. О разработке нанотехнологического катализатора ранее заявлял и Nissan, однако компании удалось уменьшить содержание ценных металлов в нейтрализаторе лишь наполовину [10].

Сенсоры в мониторинге токсикантов отработавших газов ДВС

Сенсор, как известно [3], 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 изменениям, т. е. сопровождается генерированием сигнала. При этом компонентами активного слоя служат оксиды и сульфиды металлов, электропроводящие полимеры, а также наноструктуры.

В нашей предыдущей публикации [11] детально обсуждены аналитические возможности химических и электрохимических сенсоров (ЭХС) для определения концентраций токсикантов, обусловленных автомобильным транспортом (АТР).

В данной статье приводятся результаты исследований по указанной проблеме, полученные специалистами в этой области в самые последние годы.

Возможности для конструирования сенсорных устройств с использованием наночастиц подробно описаны в работах [2]. Нанокристаллы металлоорганических соединений платины проявляют высокую сенсорную активность на SO₂ [3], 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) [8], и каждый последующий стандарт снижает ее на целый

порядок. Отсюда интерес к разработке высокочувствительных сенсоров на SO_2 и другие токсиканты, обусловленные эксплуатацией автомобильной техники.

Кристаллы металлоорганических соединений платины, лишённые пор нанометровых размеров, могут обратимо присоединять и выделять SO_2 без разрушения самих кристаллов – образно говоря, кристаллы «дышат» [3].

При взаимодействии с SO_2 кристалл в течение минуты приобретает оранжевую окраску, которая обусловлена переходом исходного вещества в комплексы, содержащие диоксид серы в качестве лиганда [12]. В этом случае весь объем кристалла увеличивается на 25 % с сохранением упорядоченной структуры решетки. Еще более удивительно то, что, если увеличенный в объеме кристалл подвергнуть воздействию воздуха, он «выдыхает» SO_2 и релаксирует его в исходное, бесцветное и свободное от SO_2 состояние. Процесс можно повторять многократно без нарушения кристалличности. По мнению авторов [12], подобные кристаллы вскоре найдут применение в качестве сенсоров, чувствительных к SO_2 . Возможно, что другие аналогичные соединения будут обратимо взаимодействовать с CO_2 , CO , NH_3 , H_2S , NO , NO_2 , Cl_2 и другими газами. Есть также веские аргументы полагать, что вещества, которые связывают газы в растворе, смогут соединять их и в твердом состоянии.

Полипиррольные нанопроволоки предложено применять в качестве рН-сенсоров [2].

В настоящее время много внимания уделяется созданию чувствительных элементов сенсорных материалов на основе полупроводниковых оксидов и гетероструктур. На основе нанокристаллов SnO_2 , нанесенных на монокристаллический кремний, изготовлен чувствительный детектор на диоксид азота [3]. Адсорбция молекул газов оказывает влияние на вольт-амперные характеристики гетероструктур, что открывает перспективы для создания чувствительных ЭХС.

Новое поколение химических сенсоров можно синтезировать, используя неоднородные наносистемы и необычные свойства металлов, входящих в них [2]. Сенсорную активность одновременно на несколько веществ: водород, влажный воздух и аммиак, которую оценивают по изменению проводимости, проявляет система: оксид – оксид ($\text{SnO}_2 - \text{TiO}_2$), металл – оксид ($\text{Cu} - \text{SiO}_2$), металл – полимер ($\text{Cu} - \text{поли} - \text{n} - \text{ксилилен}$) [3].

Наноструктурные пленки SnO_2 чувствительные к NO_2 даже при его концентрации 5 ppm (млн^{-1}) [3].

Продолжаются исследования газовых сенсоров на основе углеродных нанотрубок (УНТ) [2]. Установлено, что при использовании одностенных УНТ происходит увеличение электропроводности на три порядка при экспонировании чувствительного слоя NO_2 и уменьшение ее в 100 раз в присутствии паров NH_3 [11].

УНТ применяют в качестве катода для создания сенсоров, основанных на ионизации определяемого газа [3]. 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 при комнатных температурах. В сенсорах на основе УНТ, как и в таковых на основе наночастиц металлов, возникает проблема селективности при анализе сложных смесей газов.

Существенно подчеркнуть, что на проводимость и чувствительность газовых сенсоров, применяемых для анализа окружающей среды, большое воздействие оказывает влажность. При этом в присутствии паров воды чувствительность, например, к CO возрастает, а к углеводородам снижается [3].

Среди тенденций в газовой-сенсорной технологии и создании сенсорных анализаторов особый интерес представляет так называемый электронный нос. Подобные

многокомпонентные системы могут быть созданы путем объединения отдельных сенсоров, чувствительных к различным газам, летучим органическим соединениям и запахам. Важным компонентом таких систем является метод сравнения со стандартом, обычно реализуемый через искусственную нейронную сеть [2].

Нанотехнология с ее возможностями создания чистых, структурно упорядоченных и ориентированных материалов относится к ключевым направлениям в изготовлении новых газовых сенсоров с требуемыми характеристиками. Их получение поможет исследователям глубже понять механизм сенсорного отклика на атомном уровне, что в свою очередь, несомненно, обеспечит активное развитие работ в этой области.

Принципы конструирования наноустройств и наномашин

Продолжаются довольно интенсивные исследования наноэлектромеханических систем (NEMS), хотя многие из них находятся на ранних стадиях разработки, а отдельные все еще пребывают на этапах выработки концепции [2]. И хотя в настоящее время предложены многочисленные компьютерные модели возможных принципов конструирования и самих наномашин [13], приходится признать, что природа пока сильно опережает нас по своей способности создавать машины наноразмеров.

Нанодвигатели (например, жгутиковый двигатель бактерий и др.) давно существуют в биологических системах [2]. 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 [2].

Предложен метод изготовления шестеренок путем прикрепления молекул бензола к внешней стороне УНТ [13]. Ключевой частью любой наномашин является способ приведения ведущей шестеренки в движение. Так, для перекачивания на поверхности кристалла NaCl адсорбированной молекулы фуллерена C_{60} предложено использовать электрическое поле, которое не требует контакта с наноструктурой [2].

В работах [2, 11] детально рассмотрены потенциальные возможности молекулярной наномашин, которая преобразует энергию света в физическую работу в результате изомерных превращений азобензольного полимера.

Исследователи из Центра разработки материалов CEMES – CNRS (Франция) и их коллеги из Берлинского университета предложили способ управления вращением молекулярного колеса [14]. 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 [14].

Результаты работ ученых впечатляют нанотехнологов, занимающихся созданием молекулярных наномашин. По мнению специалистов, молекулы-колеса смогут занять свое место в сложных наномашин будущего – молекулярных грузовиках и нанороботах.

На создание наноавтомобиля с наномотором ушло целых 10 лет [14]. Профессор Д. Тур, автор разработки наноавтомобиля – первой движущейся управляемой наносистемы, был назван в 2006 году «Исследователем года» по версии авторитетного в области микро- и нанотехнологий издания Small Times Magazine [14].

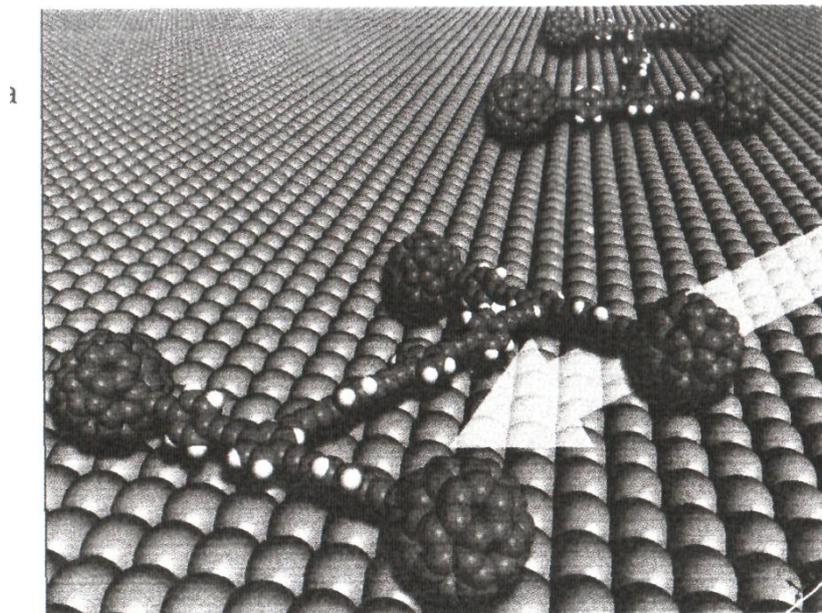


Рисунок 1 – Компьютерная модель наноавтомобиля на колесах-фуллеренах [15]

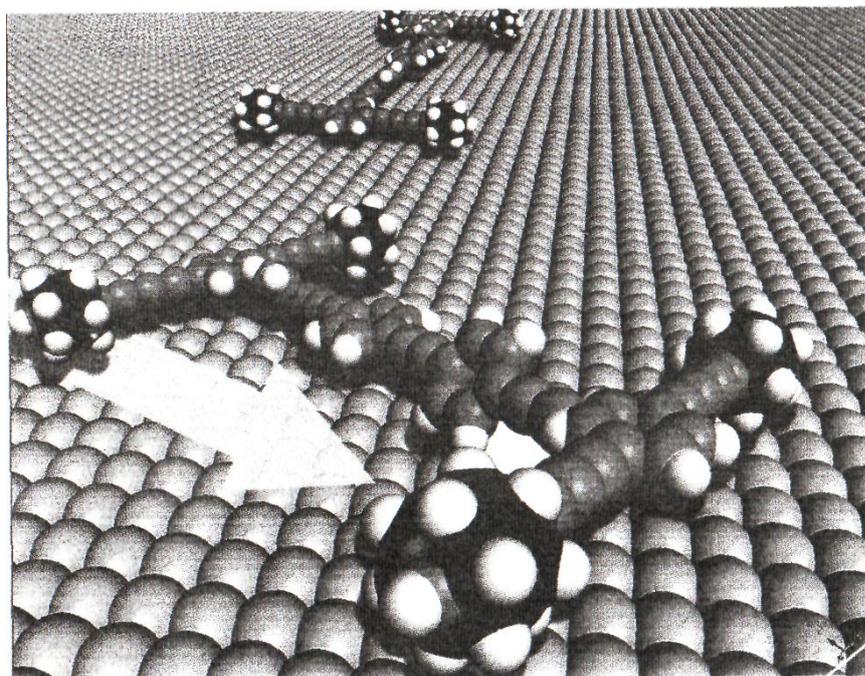


Рисунок 2 – Компьютерная модель наноавтомобиля на колесах-карборанах [15]

В настоящее время созданы первые модели наноавтомобилей размером всего 3–4 нм каждый. 10 млрд таких наномашин могут припарковаться на площади всего в 1 мм² [15].

Характерно, что самым первым наноавтомобилем была большая молекула, которая состояла из почти 300 атомов углерода [14]. Колесами служили фуллерены, а ездил наноавтомобиль по золотой пластинке. При нагревании подложки до 200⁰ С фуллерены начинали вращаться, и автомобиль двигался.

Однако, такой автомобиль оказался неуправляемым: если на одной пластинке находится много наноавтомобилей, то при нагревании все они приходят в движение, начинают сталкиваться, образуют своеобразные наноавтомобильные пробки [15]. Тогда ученые предложили поставить на каждый автомобиль наномотор и назвали его наноактюатором.

Наноактюатор работает под действием света, и таким автомобилем можно управлять – при освещении наноавтомобиль перемещается, а при отсутствии 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 работе [15] 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. Скорость последней модели наноавтомобиля – чуть более 4 нм/с [15].

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 [14].

По нашему мнению, уже в ближайшие годы в наноавтомобилестроении могут быть реализованы большие потенциальные возможности и уникальные свойства графена: его рекордные прочность и жесткость, высокие тепло- и электропроводность, упругость, прозрачность, эластичность, непроницаемость для других молекул и др. [1].

Другие перспективные приложения нанотехнологий в АТР и его инфраструктуре

1. «Эффект лотоса» в автомобильной промышленности

Нанопокрытие из наночастиц диоксида кремния (SiO_2) для кузовов автомобилей, по данным разработчиков, на 53 % более стойкое к появлению царапин, и за счет самоочистки («эффекта лотоса») на 60 % – к образованию на нем различного рода загрязнений (грязь, пыль, масло, вода и лед) [16].

Сохранить лакокрасочное покрытие кузова автомобиля позволяют нанолаки, нанокраски, нанополироли и другие средства защиты. Начиная с 2003 года легковые автомобили Mercedes-Benz серий E, S, CL, SL и SLK покрывают прозрачным лаком с керамическими наночастицами, которые образуют на поверхности пленки очень плотную сетчатую структуру [10].

Защита автомобильных стекол – актуальная проблема для современного водителя: в пути ему необходимо постоянно следить за дорожной разметкой, знаками, движением транспорта. Для обеспечения хорошей видимости необходимо защитить стекла специальным химическим составом. Автомобильные концерны Audi, BMW, Citroen, Lexus, VW и Volvo постоянно используют для защиты стекол нанопокрытия [10]. Гидрофобные покрытия для остекления автомобилей в виде нанопленок наносятся также на стекла Nissan Terrano II в их серийном производстве [16]. В результате водоотталкивающего эффекта и более прозрачного стекла повышается активная безопасность на дороге.

В АТР находят применение и другие разработки на основе «эффекта лотоса»: препараты для защиты шин, Nanolux – покрытия для колесных дисков, антивандальные краски для общественного транспорта, незапотевающие стекла и зеркала, ненамокающие тентовые покрытия, малозагрязняющийся бактерицидный текстиль для салона автомобиля [16].

2. Безводная автомобильная мойка

Австралийская компания «Ecowash Mobile CIS ltd» разработала и внедрила во многих странах мира экологически чистый процесс безводной мойки и полировки автомобиля [10]. Используемый при этом уникальный нанополимер polyslick 3™ отделяет от автомобиля и заключает в капсулы поверхностную грязь, которая снимается с помощью мягкой ткани, совершенно не оставляя царапин. После обработки на корпусе автомобиля остается тончайший слой полимера, обуславливающий эффективную защиту от вредного воздействия окружающей среды и первоначальный блеск [10]. Полный ассортимент продукции компании, созданный с применением нанотехнологий, обеспечивает комплексный уход за автомобилем, включая обработку стекол, кожи, ткани и пластика, шин и колесных дисков.

3. Топливные элементы электромобилей

В настоящее время продолжают исследования адсорбционной активности УНТ и жгутов на их основе: максимальная степень заполнения водородом достигается при 80 К и давлении 0,5 атм и составляет 8,5 % масс [14]. Это рекордный результат для всех углеродных материалов, которые используются для хранения H_2 . При этом конструкция накопительных систем может быть значительно упрощена из-за способности УНТ отдавать адсорбированный H_2 при давлениях, близких к тем, при которых они заполнялись. Этот результат важен как для разработки и внедрения топливных элементов (ТЭ) электромобилей, так и для применения водорода как альтернативного и экологически чистого топлива в ДВС. Преимущества аккумуляции H_2 в УНТ по сравнению с гидридами металлов очевидны.

В прямых метанольных топливных элементах используются электрокатализаторы (металлы Pt группы) на углеродных носителях [3]. В качестве носителей инициатора применяют, как правило, сажу или технический углерод. Экспериментально установлено, что их замена на УНТ или нановолокна позволит повысить активность катализаторов и эффективность работы ТЭ. Так, китайские исследователи синтезировали инициатор из наночастиц Pt на УНТ (10 масс. % платины) и использовали его в качестве катодного электрокатализатора для метанольных ТЭ [14]. Обнаружена высокая активность восстановления кислорода и более эффективная работа всего ТЭ.

Российские ученые разработали эффективные электрокатализаторы на основе УНТ и нановолокон, в том числе в виде нанобумаги с нанесенными наночастицами платины и палладия [14]. Есть все основания предполагать, что уже в ближайшие годы УНТ и нановолокна будут применяться в реальных ТЭ.

Выводы

В результате анализа зарубежного опыта применения нанотехнологий в АТР и его инфраструктуре установлен различный уровень теоретических и прикладных исследований различных аспектов этой проблемы – от стадии выработки концепции до внедрения в промышленное производство.

Обсуждены тенденции развития, проблемы и перспективы использования наноматериалов в производстве и применении автомобильных топлив, нефтегазовой индустрии, при разработке топливных элементов электромобилей, химических и электрохимических сенсоров для анализа токсикантов в ОГ ДВС, комплекса антикоррозионных покрытий.

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

Список литературы

1. Карпинец А. П. Перспективы применения наноматериалов и нанотехнологий на автомобильном транспорте. Часть 1. Наноструктуры и функциональные материалы / А. П. Карпинец // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник. – Горлівка: АДІ «ДВНЗ» ДонНТУ, 2013. – № 1.
Karpinets A. P. Perspektivy primeneniya nanomaterialov i nanotekhnologiy na avtomobilnom transporte. Chast 1. Nanostrukturny i funktsionalnyye materialy (The Problems of Using Nanomaterials and Nanotechnologies in Motor Transport. Part 1. Nanostructures and Functional Materials) / A. P. Karpinets // Visti Avtomobilno-dorozhnogo instytutu: naukovy-vyrobnychiy zbirnyk. – Horlivka: ADI DVNZ "DonNTU", 2013. – № 1
2. Пул Ч.-мл. Нанотехнологии / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2009. – 336 с.
Pul Ch.-ml. Nanotekhnologii (Nanotechnologies) / Ch. Pul-ml., F. Ouens. – M.: Tekhnosfera, 2009. – 336 s.
3. Сергеев Г. Б. Нанохимия: учебн. пособие / Г. Б. Сергеев. – М.: КДУ, 2006. – 336 с.
Sergeyev G. B. Nanokhimiya: uchebn. posobiye (Nanotechnology: Study Guide) / G. B. Sergeyev. – M.: KDU, 2006. – 336 s.
4. Колесников И. М. Катализ и производство катализаторов / И. М. Колесников. – М.: Техника, 2004. – 400 с.
Kolesnikov I. M. Kataliz i proizvodstvo katalizatorov (Catalysis and Catalysts Production) / I. M. Kolesnikov. – M.: Tekhnika, 2004. – 400 s.
5. Гребенников Е. П. Проблемы разработки промышленных нанотехнологий / Е. П. Гребенников // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2010. – № 5. – С. 84–87.
Grebennikov Ye. P. Problemy razrabotki promyshlennykh nanotekhnologiy (The Problems of Development of Industrial Nanotechnologies) / Ye. P. Grebennikov // Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo. – 2010. – № 5. – S. 84–87.

6. Шириязданов Р. Р. Наноразмерные каталитические системы синтеза топливных изопарафинов / Р. Р. Шириязданов, А. Р. Давлетшин // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2011. – № 3 (10). – С. 118–119.
Shiriyazdanov R. R. Nanorazmernyye kataliticheskiye sistemy sinteza toplivnykh izoparaffinov (Nanoscale Catalyst Systems of Synthesis of Fuel Isoparaffins) / R. R. Shiriyazdanov, A. R. Davletshin // Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo. – 2011. – № 3 (10). – S. 118–119.
7. Хавкин А. Я. Нанотехнологии в добыче нефти и газа / А. Я. Хавкин. – М.: Нефть и газ, 2008. – 171 с.
Khavkin A. Ya. Nanotekhnologii v dobyche nefiti i gaza (Nanotechnologies in Oil and Gas Extraction) / A. Ya. Khavkin. – M.: Neft i gaz, 2008. – 171 s.
8. Бойченко С. В. Моторные топлива и масла для современной техники / С. В. Бойченко, С. В. Иванов, В. Г. Бурлака. – К.: НАУ, 2005. – 216 с.
Boychenko S. V. Motornyye topliva i masla dlya sovremennoy tekhniki (Motor Fuels and Oils For Modern Technology) / S. V. Boychenko, S. V. Ivanov, V. G. Burlaka. – K.: NAU, 2005. – 216 s.
9. Нанокатализаторы в топливе для транспорта. Нано без границ / А. Абрамян, В. Беклемышев, Р. Варганов и др. // Наноиндустрия. – 2007. – № 4. – С. 26–28.
Nanokatalizatory v toplive dlya transporta. Nano bez granits (Nanocatalysts in Transport Fuel. Unlimited Nano) / A. Abramyan, V. Beklemyshev, R. Vartanov i dr. // Nanoindustriya. – 2007. – № 4. – S. 26–28.
10. Безразборный сервис автомобиля / В. И. Балабанов, В. И. Беклемышев, А. Г. Гамидов и др. – М.: Известия, 2007. – 272 с.
Bezrazbornyy servis avtomobilya (Uncollapsible Car Service) / V. I. Balabanov, V. I. Beklemyshev, A. G. Gamidov i dr. – M.: Izvestiya, 2007. – 272 s.
11. Карпинец А. П. Перспективы применения нанотехнологий на автомобильном транспорте. Часть 2. Наностройства и наномашин / А. П. Карпинец // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник. – Горлівка: АДІ ДВНЗ ДонНТУ, 2010. – № 1 (10). – С. 40–46.
Karpinets A. P. Perspektivy primeneniya nanotekhnologiy na avtomobilnom transporte. Chast 2. Nanoustroystva i nanomashiny (The Problems of Using Nanotechnologies in Motor Transport. Part 2. Nanodevices and Nanomachines) / A. P. Karpinets // Visti Avtomobilno-dorozhnogo instytutu: naukovo-vyrobnychiy zbirnyk. – Horlivka: ADI DVNZ “DonNTU”, 2010. – № 1 (10). – S. 40–46.
12. Organoplatinum Crystals for Gas – Triggered Switches / M. Albrecht, M. Lutz, A. Spek, G. van Koten // Nature. – London, 2000. – V. 406. – № 3. – Pp. 970–974.
13. Bolzani V. Molecular Devices and Machines. A Journey into the Nanoworld / V. Bolzani, M. Venturi, A. Credi. – New York: Wiley VCH, 2003. – 494 p.
14. Ковшов А. Н. Основы нанотехнологии в технике: учебн. пособие для студентов вузов / А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, И. М. Ибрагимов. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 240 с.
Kovshov A. N. Osnovy nanotekhnologii v tekhnike: uchebn. posobiye dlya studentov vuzov (Fundamentals of Nanotechnology in Engineering: Study Guide for College Students) / A. N. Kovshov, Yu. F. Nazarov, I. M. Ibragimov. – M.: Izdatelskiy tsentr “Akademiya”, 2009. – 240 s.
15. Алфимова М. М. Занимательные нанотехнологии / М. М. Алфимова. – М.: Парк-медиа: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 96 с.
Alfimova M. M. Zanimatelnyye nanotekhnologii (Interesting Nanotechnologies) / M. M. Alfimova. – M.: Park-media: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011. – 96 s.
16. Балабанов В. И. «Эффект лотоса» в автомобильной промышленности / В. И. Балабанов // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 1. – С. 103–107.
Balabanov V. I. “Effekt lotosa” v avtomobilnoy promyshlennosti (Lotus Effect in Automobile Industry) / V. I. Balabanov // Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo. – 2009. – № 1. – S. 103–107.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. В. Базаянц, АДІ ДонНТУ
Стаття надійшла до редакції: 07.08.2013