

УДК 563.24+541.16

Халатов А.А., Долинский А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ

У статті представлено огляд робіт по використанню нанотехнологій в енергетиці. Розглянуто проблеми теплофізики, направлені на вдосконалення нанотехнологій.

В статье представлен обзор работ по использованию нанотехнологий в энергетике. Рассмотрены проблемы теплофизики, направленные на совершенствование нанотехнологий.

The review is given considering nanotechnologies in the energetics. The associated thermal physics problems are for nanotechnologies improvement analysed.

Введение

Человечество стоит на пороге, когда потребление углеводородных энергоносителей быстро снижается вследствие уменьшения добычи, истощения освоенных и сокращения открытий новых месторождений. В 1983 г. мировое потребление нефти впервые превысило открытие новых запасов, в 2004...2006 г.г. мировые цены на нефть поднялись почти в два раза, а экспортные цены на газ с 2003 по 2006 г.г. возросли более, чем в два раза. Стоимость природного газа в США только за последние несколько лет выросла в восемь раз. Хотя по расчетам [1] падение мирового производства природного газа начнется с 2040 г., но прогнозы Геологической службы США показывают, что падение суммарной добычи нефти и газа произойдет уже в 2013 году.

Рост мировых цен на углеводородное сырье, снижение его добычи, быстрый рост потребления нефти в Азиатско-Тихоокеанском регионе окажут влияние на все стороны мировой экономики. Для снижения «нефтегазового» удара в ближайший период большое развитие получат экологически чистые энергетические технологии на основе органических топлив и атомная энергетика. Однако только совершенствование традиционных энергетических технологий уже не способно восполнить предстоящий рост мирового энергопотребления. В соответствии с данными Всероссийского Теплофизического Института (Москва) возможности дальнейшего повышения КПД наиболее

востребованных энергоблоков мощностью 300 МВт практически исчерпаны и составляют только 2...3 % для угольных электростанций и 6...8 % – для газовых. Поэтому на данном этапе будут развиваться новые энергетические технологии, в том числе на основе нанотехнологий.

Сегодня объем мирового рынка нанотехнологий составляет около 300 млрд. долларов США, как предполагается, к 2015 г. он вырастет до 2...3 триллионов долларов США, что сопоставимо с рынком всех энергоносителей. Наиболее крупные направления мировых разработок в области нанотехнологий – материаловедение, биотехнология, фотоника, электроника, приборостроение, программное обеспечение. Наиболее крупные потребители товаров нанорынка – охрана окружающей среды (56 % общего рынка), электроника (20,8 %) и энергетика (14,1 %).

В области научных публикаций лидерство принадлежит США (15000 статей в 2007 г.), европейским странам (чуть менее 12000 ст. в 2007 г.) и Китаю (более 10000 ст. в 2007 г.). США принадлежат около 40 % всех выданных в мире патентов в области нанотехнологий. Россия в области нанотехнологий отстает от западных стран на 7...10 лет, ее доля в общемировом технологическом секторе составляет только 0,3 %, а на рынке нанотехнологий – 0,04 %. Однако до 2015 г. Россия предполагает вложить в область нанотехнологий большие финансовые средства с отдачей в самое ближайшее время.

Теплофизика является теоретическим фундаментом как современных, так и новых энергетических технологий. В настоящей статье рассмотрены некоторые перспективные для энергетики нанотехнологии и показана роль теплофизики как науки в изучении и совершенствовании этих технологий.

Нанотрубки и фуллерены. Нанотехнологии открывают перед человечеством необозримые перспективы в энергетике, авиации, космической технике, солнечной энергетике, криогенике и других отраслях техники. Измельчение вещества до наноразмеров кардинально изменяет его физические и химические свойства. Атомы вещества, находящиеся на поверхности наночастицы, имеют необычные свойства, они отличаются высокой химической активностью, что делает их отличными от «просто маленьких частиц». Именно химически активные поверхностные атомы определяют принципиально новые свойства наноструктур, а нанотехнологии в самом ближайшем будущем обеспечат совершенствование многих технологических процессов.

Появление нанотехнологий связано с открытием нанотрубок, которое было сделано в 1991 г. Они представляют собой свернутые в цилиндр протяженные структуры из гексагональных сеток с атомами углерода в узлах

размером от одного до десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров (рис. 1, а). В зависимости от размера и формы нанотрубка может обладать проводящими или полупроводниковыми свойствами. Нанотрубки широко используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности (рис. 1, б), электронике и оптоэлектронике, при производстве сверхпрочных нитей, композитных материалов, топливных элементов, светодиодов, микродатчиков.

Фуллерены представляют собой молекулярные соединения в форме выпуклых замкнутых многогранников (рис. 1, в), состоящие из четного числа трехкоординированных атомов углерода, которые расположены в вершинах правильных шести- или пятиугольных, из которых составлена поверхность сферы или эллипсоида. Они широко используются в полупроводниковой технике, в оптических затворах и фоторезисторах, при производстве наносмазочных материалов.

Первые нанотрубки были получены путём распыления графита в электрической дуге. В дальнейшем для получения наночастиц и нанокластеров были разработаны более совершенные технологии, среди которых газофазный синтез, плазменное испарение материалов, твердотельные химические реакторы, механохимический синтез, ударно-волновой синтез,

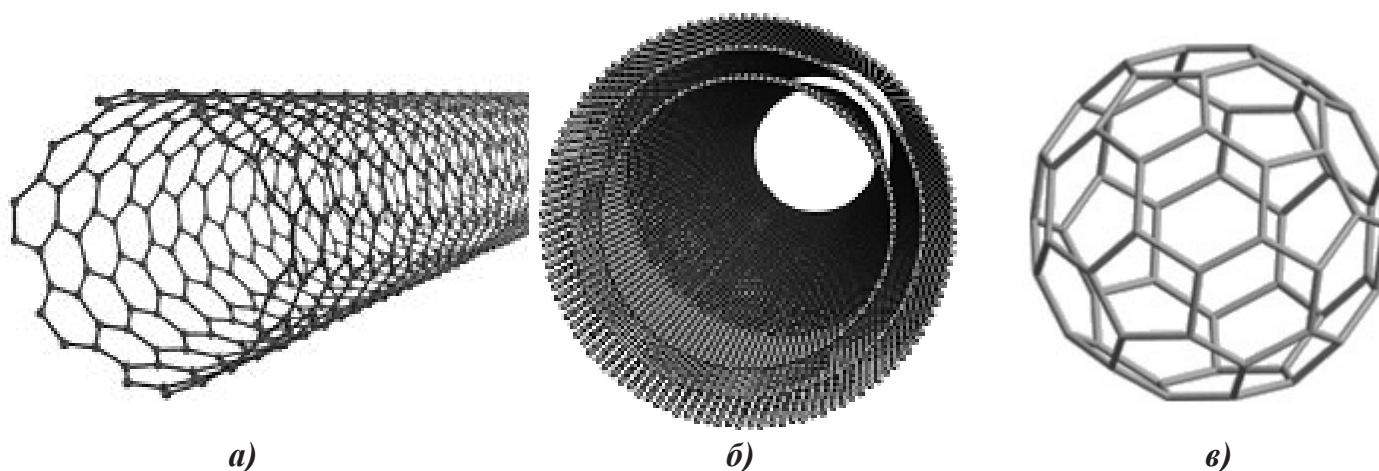


Рис. 1. Схематичный вид нанотрубки (а), изделия из нанотрубок (б) и фуллеренов (в).

электровзрывной метод (нанокластеры), кристаллизация аморфных структур (нанокластеры).

В последние годы в Китае разработана промышленная технология получения нанопорошков (нанокластеров) CaCO_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZnO , ZnS , SrCO_3 в сильном поле центробежных сил (сотни и тысячи оборотов ротора в минуту), где интенсивность массопереноса во много раз больше, чем в гравитационном поле. Высокая степень перенасыщения раствора, равномерная концентрация и примерно одинаковое время роста кристаллов обеспечивают достаточно «узкую» кривую распределения нанокластеров по размерам.

Наножидкости и микроканалы. Уже первые исследования показали, что даже очень малые добавки наночастиц к жидкости (доли процента по объему) приводят к росту теплопроводности наносuspензии до 60 %, теплоотдачи – до 60 %, критического теплового потока – до 300 %. При этом дополнительные потери давления практически отсутствуют. В качестве материалов наночастиц в настоящее время используются керамика (SiN), оксиды (Al_2O_3 , Fe_3O_4 , CuO), карбиды (SiC , TiC), металлы (Ag , Au , Cu , Fe), полупроводники (TiO_2), углеродные нанотрубки. Области потенциально привлекательного применения наножидкостей – теплоэнергетика, ядерная энергетика, радиоэлектроника, транспорт, электроника, оборонная техника, медицина, химический анализ.

В наножидкости дополнительный перенос теплоты осуществляется за счет движения наночастиц под действием силы Ван-дер-Ваальса за счет малых расстояний между наночастицами, электростатической силы (малые размеры наночастиц), стохастической силы (броуновское движение частиц) и гидродинамических сил. Фотографии наножидкостей различной природы представлены на рис. 2.

Вязкость наножидкости незначительно изменяется с температурой и концентрацией наночастиц [3], что является основным фактором, который обуславливает отсутствие дополнительных гидравлических потерь. На *тепло-*

проводность наножидкости влияют объемная концентрация, природа жидкости и наночастиц, размер и форма наночастиц, температура жидкости, а также добавки инородных материалов к наносuspензии (например, кислоты). Аномально высокий (до 260 %) рост теплопроводности наножидкости на основе органического масла и углеродных нанотрубок [3] обусловлен очень высокой теплопроводностью нанотрубок (~ 3000 Вт/м·К) и большим отношением их длины к диаметру (~ 2000).

Как указывалось выше, интенсификация конвективного теплообмена по сравнению с «чистой» жидкостью может составлять до 60 % при том же гидравлическом сопротивлении. На теплообмен при течении наножидкости в каналах влияет большое количество факторов – скорость движения, теплопроводность, теплоемкость, концентрация, природа, размер и форма наночастиц. Несмотря на увеличение теплопроводности наножидкости, при ее кипении происходит ухудшение теплообмена по сравнению с кипением «чистой» жидкости [3]. Это происходит потому, что наночастицы заполняют элементы шероховатости поверхности кипения и ухудшают условия для формирования отрывных пузырьков жидкости. На шероховатой поверхности этот эффект проявляется еще сильнее. Что касается критического теплового потока, то при определенных условиях он увеличивается до 300 %, причем наиболее заметно в области высоких значений массового расхода наножидкости [3].

Теплообмен и гидродинамика в микроканалах (диаметром менее 100 микрон) представляют большой интерес для новых отраслей техники (космическая техника, микроэнергетика, радиоэлектроника, медицина). Для прокачки жидкости в таких каналах необходимо приложить значительное давление, поэтому более предпочтительным является движение потока за счет совместного действия градиента давления и внешнего электрического поля, которое может как «помогать» продольному градиенту давления, так и противодействовать ему. Как показано в работе [4], распределение

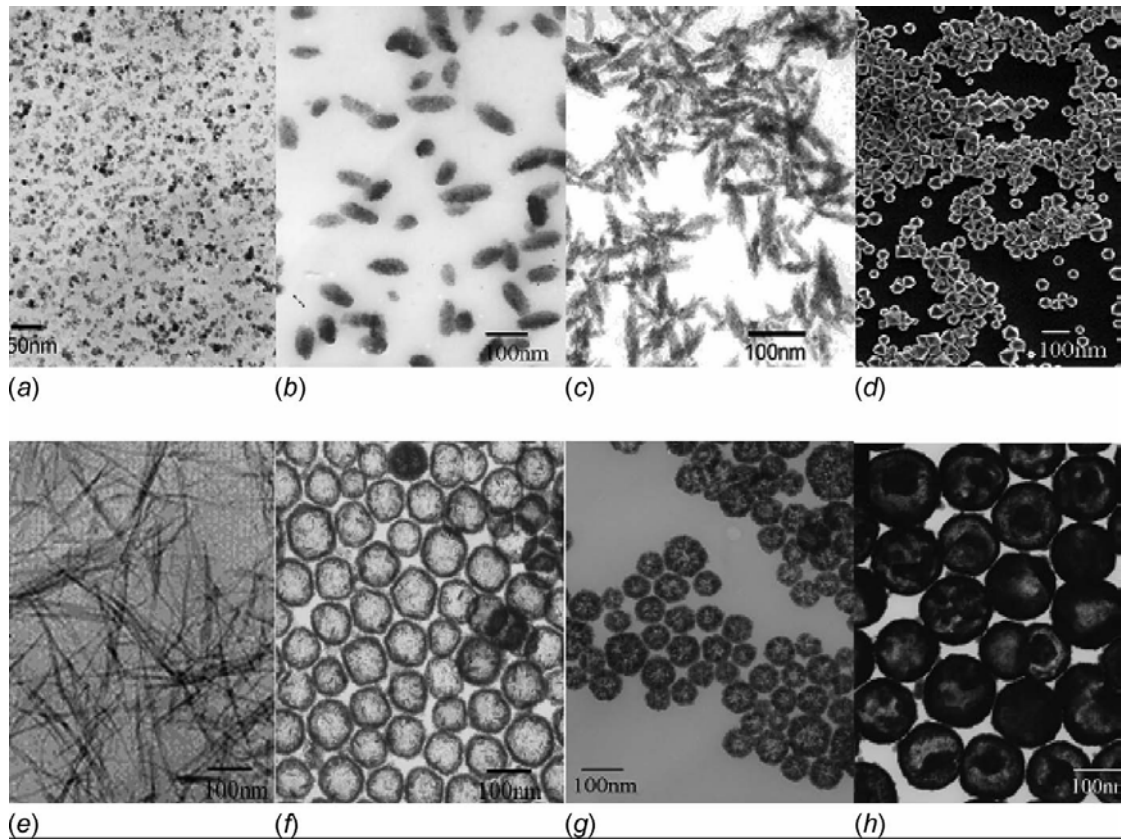


Рис. 2. Суспензии наночастиц [2]:

a) сферические Fe_3O_4 -наночастицы; b) эллиптические Si-наночастицы; c) нитевидные SiO-наночастицы; d) октаэдральные Si_2O -наночастицы. e. $CePO_4$ - нанонити; f) полые SiS-наночастицы; g) полые и «сморщенные» Si_2O наночастицы; h) Si_2O (ядро)/SiS (оболочка) наночастицы.

температуры и скорости при движении жидкости в микроканале определяется отношением радиуса канала к длине Дебая, мощностью внешнего источника электрического поля Φ и параметром, который пропорционален отношению движущих сил – $(dP/dx)/(d\Phi/dx)$.

В целом, процессы теплообмена и гидродинамики при течении наножидкостей в каналах только начинают изучаться, поэтому в ряде случаев опубликованные результаты являются противоречивыми. Поэтому особое внимание в ближайшем будущем следует обратить на дальнейшее изучение теплофизических свойств наносуспензий, закономерностей тепло- и массопереноса при кипении, вынужденной и свободной конвекции, кинетики и

термодинамики фазовых переходов в наноструктурных материалах и объектах, в микроканалах.

Нанотехнологии в энергетике. Применение угля микронного помола представляет собой одно из перспективных направлений теплоэнергетики ближайшего будущего, поскольку угольные частицы диаметром 5...20 микрон обладают свойствами близкими к свойствам наночастиц. Малый размер и большая поверхность микроугольной пыли способствуют высокой интенсивности горения, а повышение химической активности малых частиц угля (эффект механоактивации) приводит к снижению температуры воспламенения. По реакционным свойствам микроуголь приближается к мазуту и при-

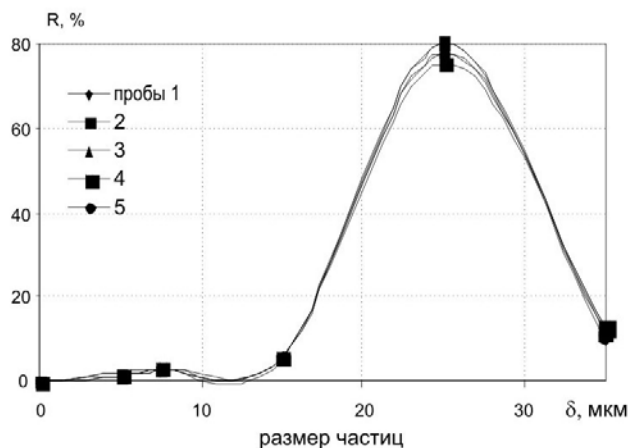
родному газу, причем механохими-ческие реакции способствуют возникновению соединений, появление которых невозможно в реакциях, стимулированных только температурой.

Высокая реакционная способность микроугля позволяет использовать его в качестве основного топлива в малых котлах, при розжиге пылеугольных блоков и прямом сжигании в газовых турбинах при размоле угля до 5...10 мкм. Использование микроугля позволяет достичь высоких значений КПД газотурбинной установки, который приближается к КПД парогазовой установки. Механохимический синтез может осуществляться в различных мельницах, причем виброцентробежные и дезинтеграционные мельницы характеризуются малыми энергозатратами (около 25 кВт на тонну угля), которые сравнимы с затратами в шаровых и барабанных мельницах.

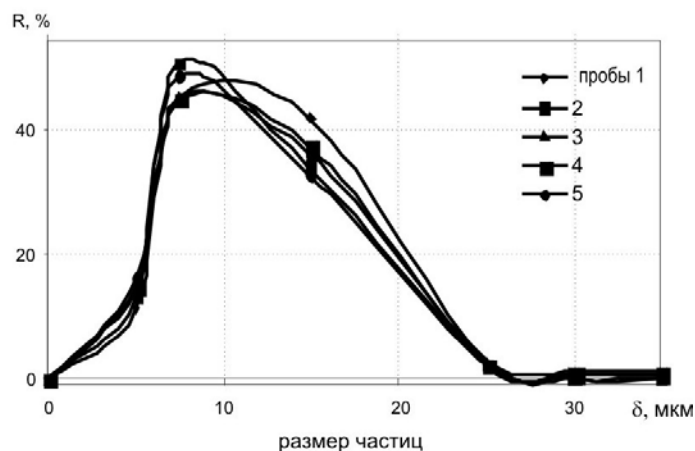
Изучение механизма горения микроугля представляет собой важную теплофизическую проблему. Такие работы проводились ранее в США и Германии, в течение последних лет они активно проводятся в Сибирском отделении Российской академии наук (ИТФ СО РАН). В ИТТФ НАН Украины разработана вихревая технология микроизмельчения украинских углей (рис. 3),

защищенная патентами Украины и России. На основе коммерческого пакета «PHOENICS» (Великобритания) с использованием модифицированных моделей горения изучаются термогазодинамика, формирование окислов азота, серы и углерода при сжигании угля микронного помола в котлах различной мощности [6].

Водоугольное топливо (ВУТ) на основе угля микронного помола является перспективным топливом для тепловых электростанций, промышленных котлов, а также объектов малой энергетики [7]. Сегодня ВУТ получил большое развитие в Китае, который не только производит его для собственных целей (до 100 млн. т в год в ближайшей перспективе), но и экспортирует его в Японию. ВУТ представляет собой дисперсную систему (вода – 30...40 %, уголь микронного помола – 60...70 %, химические добавки – 1 %), в которой в качестве горючей основы используется как энергетический, так и неэнергетический уголь. ВУТ может производиться из антрацитов, каменных и бурых углей различных марок и зольности, воды любого качества, включая шахтные и промышленные воды, нефтяные «стоки». Для исключения замерзания водоугольного топлива в зимнее время часть воды может быть заменена спиртами или смесью спиртов с углеводородами.



а)



б)

Рис. 3. Диспергированный уголь ГСШ при давлении воздуха 0,05 (а) и 0,07 (б) МПа.

Важными преимуществами ВУТ являются низкая температура воспламенения (450...650 °С) и горения (950...1050 °С), высокая степень выгорания (до 99,5 %). Это существенно снижает содержание окислов азота (в 1,5...2 раза), окиси углерода (в 2 раза) и бенз(а)пирена (в 5 раз) в продуктах сгорания [7]. Другим преимуществом ВУТ является отсутствие загрязнения поверхностей нагрева – тепловая эффективность экранов почти в 1,5 раза выше, чем при сжигании пылеугольного топлива [7]. Увеличение содержания трехатомных газов в продуктах сгорания (прежде всего молекул H_2O) приводит к увеличению интенсивности излучения трехатомными газами, что практически полностью компенсирует снижение температуры продуктов сгорания, связанное с затратами теплоты на испарение влаги [7].

Важными теплофизическими проблемами, которые следует решить для широкого внедрения ВУТ, являются обеспечение высокой стабильности водоугольных смесей (до нескольких месяцев), низкой вязкости и малых гидравлических потерь. Предстоит также более подробно изучить особенности горения ВУТ, при механоактивации угля и воды в процессе ее кавитационной обработки.

При сжигании пылеугольного топлива частицы угля и минеральных компонентов отделены друг от друга и условия подвода окислителя к топливу в этом случае играют главную роль. Выгорание капли ВУТ, каждая из которых содержит 300...400 пылинок микроугля, характеризуется несколькими стадиями термической подготовки, воспламенения и горения [7]. Кавитационное воздействие на воду приводит к изменению ее физических свойств: экспериментальные данные подтверждают снижение индекса рН, появление продуктов деструкции, таких как H , OH , O_2 , O_3 , а также синтез химически активной перекиси водорода H_2O_2 . Взаимодействие перегретого пара воды с углеродом топлива и термическая диссоциация воды способствуют образованию водорода и кислорода.

Украина богата углем, поэтому раз-

витие инфраструктуры производства водоугольного топлива на основе различных углей для его использования в котлах промышленной теплоэнергетики и жилищно-коммунального сектора взамен природного газа является актуальной проблемой, особенно в регионах богатых месторождениями угля.

Квантовая полирезонансная активация (КПРА) позволяет управлять энтропией системы на молекулярном уровне и интенсифицировать процессы горения. Для возникновения КПРА необходимо, чтобы средняя энергия движения частиц окружающей среды была выше псевдостабильного уровня возбужденного состояния частиц, вызывающих КПРА. Для этого используется теплота сгорания топлива, в качестве инициаторов КПРА применяются наночастицы с низким уровнем возбуждения, и поэтому система непрерывно получает накачку за счет теплоты сгорания. Для инициации КПРА требуется очень малое количество квантовых наноактиваторов, обычно для перевода в состояние с пониженной энтропией хватает одной частицы наноактиватора на миллиард молекул пассивной среды.

При использовании жидких углеводородов применяются хорошо растворимые наноактиваторы. Добавление к дизельному топливу малого количества наноактиватора (около 100 мг на тонну) вызывает снижение удельного расхода топлива на 10...15%. Применение активаторов мазута снижает его вязкость, а при его горении происходит активация топочных газов, которая приводит к увеличению температуры факела на 100..150 °С и снижению вредных выбросов. На электростанциях, использующих газ и уголь, можно применять водный раствор наноактиватора, который инжектируется в топку или вторичный воздух. Расход наноактиватора в этом случае составляет 0,5 г на тонну угля или на 1000 м³ газа. Возможно также использование наноактиваторов в котловой воде агрегата.

Снижение вредных выбросов в окружающую среду является одним из важных направлений энергетических технологий и автомобилестроения. Фирма Hydrocarbon Technologies

(США) разработала методику предварительной обработки угля с помощью нанотехнологий (на молекулярном уровне) так, чтобы создавать из него экологически чистое топливо. Нанотехнология, разработанная американской фирмой Nanokinetix, позволяет за счет использования катализаторов улавливать летучие органические остатки выхлопных газов автомобиля. Экологически чистая технология сжигания некондиционных топлив с использованием каталитических свойств наночастиц сажи создана в России.

Будущее энергетики тесно связывают с твердоокисными топливными элементами на основе нано-керамических электролитов с ионной проводимостью, которые могут явиться основой промышленных энергетических установок *прямого преобразования химической энергии в электрическую*. Такие топливные элементы, работают при температуре 800...1000 °С, они используют водород, природный газ, а также синтез-газ, полученный из природного газа или при газификации и конверсии угля.

Конверсия углеводородного сырья в водород является сложным многостадийным процессом, поэтому традиционные химические реакторы имеют большие размеры и сложны в управлении. Принципиальным решением проблемы является использование мини-генераторов водорода с каналами микронного размера, которые покрыты *наноструктурными катализаторами*. Нанотехнологии позволяют создавать катализаторы с оптимальными характеристиками с целью повышения активности, селективности и производительности генераторов. В Институте теплофизики СО РАН (Россия) созданы нанокатализаторы на основе благородных металлов размером около 10 микрон, которые характеризуются повышенной поверхностной энергией и большой абсорбционной емкостью. Они использованы при получении синтез-газа при неполном окислении и паровой конверсии метана. Определены условия получения синтез-газа с высокой селективностью по водороду и окиси углерода. Значительные перспективы для прямого синтеза углеводоро-

дов из синтез-газа, а также для очистки нефти имеет использование нанокатализаторов на основе нанопорошков Fe, Ni, Fe-CO.

Несмотря на высокую стоимость (до 3000 долл. США за киловатт установленной мощности), мировой рынок *солнечной энергетики* растет ежегодно на 40 % в год, при этом стоимость солнечной энергии становится дешевле примерно на 20 % в год. Предполагается, что мировой объем рынка солнечных батарей и солнечных панелей к 2013 г. составит около 70 млрд. долл. США. В настоящее время для изготовления тонкопленочных солнечных элементов широко используется микрокристаллический кремний. Но экономически выгодное соотношение стоимости и КПД является пока трудно достижимым для производителей систем фотовольтоники. Использование нанотехнологий позволит создать более производительные, чем кремниевые, солнечные элементы, которые отличаются более низкой стоимостью и более высоким КПД. Например, применение пленок медь-индий-диселенид галлия (CIGS-пленки) позволит осуществлять «самосборку» жидкости, состоящей из наночастиц, покрывающих поверхность. Такие солнечные элементы могут быть нанесены даже на гибкую основу.

Решение проблемы *прямого преобразования теплоты ядерной реакции в электричество* позволит радикально изменить облик атомных электростанций. В лаборатории США с использованием нанотехнологий разработан новый материал, в несколько раз повышающий эффективность преобразования радиоактивного излучения в электричество. Новый материал представляет собой множество слоев углеродных нанотрубок, наполненных золотом и окруженных гидридом лития. Радиоактивное излучение воздействует на электроны в атомах золота и заставляет их покидать свои орбиты. Электроны проходят через нанотрубки, попадают в гидрид лития, а затем движутся к электроду, создавая электрический ток. Соответствующая ориентация нанотрубок позволяет наиболее эффективно использовать энергию радиационного излучения.

Другим важным направлением прямого преобразования *теплоты в электричество* является термоэлектричество. Недавно в Калифорнийском университете (США) удалось преобразовать теплоту в электрический ток, используя металлические наночастицы, соединённые с органической молекулой. На каждый градус разности температур получены 8,7 мкВ разности потенциалов для бензолдителиола и 14,2 мкВ – для трибензолдителиола. Это направление может положить начало развитию принципиально новых типов наногенераторов электроэнергии.

Большие перспективы связываются с применением *нанодобавок и наноприсадок* к смазочным материалам в теплоэнергетике и энергомашиностроении. Металлоплакирующие и полимерные присадки при температуре 150...200 °С формируют на рабочей поверхности наноструктурные пленки с оптимальной шероховатостью. Антифрикционные и противоизносные слоистые добавки включают элементы и соединения с низким усилием сдвига между слоями. Смазки с ультрадисперсным наноразмерным графитом резко снижают трение и износ трущихся соединений. При вводе сферических фуллеренов в смазочные масла повышается износостойкость и ресурс оборудования, а введение неабразивных наноалмазов (4...6 мкм) и кластерного углерода в смеси с диэфирами и антиоксидантами позволяет «прирабатывать» трущиеся соединения агрегатов.

Недавно, группа ученых из США разработала технологию, позволяющую изготавливать нанотрубки толщиной 50 микрон и практически неограниченной длины. Из углеродных нанотрубок можно создавать *линии передачи электроэнергии будущего*, которые обладают значительно меньшими потерями, чем ЛЭП, используемые в настоящее время.

Как известно, в обычном состоянии поведение бактерий является хаотичным. Ученые из Национальной лаборатории Аргона при Министерстве энергетики США научились создавать условия, при которых колония бактерий движется упорядоченно, в нужном направлении

и с нужной скоростью, приводя во вращение микрошестерни диаметром 380 микрон, масса которых в миллионы раз больше массы отдельной бактерии. Это может явиться основой принципиально новой технологии получения электрической энергии за счет направленного движения микроорганизмов.

Большой интерес представляет создание *аккумуляторов тепловой и электрической энергии* большой емкости. Компания Altair Nanotechnologies (США) недавно объявила о создании инновационного нанотехнологического материала для электродов литий-ионных аккумуляторов. Аккумуляторы с $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ -электродами имеют время зарядки всего 10...15 минут. В 2006 г. эта компания уже начала производство аккумуляторов на своём заводе в Индиане. Малогабаритные аккумуляторы теплоты большой емкости представляют интерес в жилищно-коммунальном секторе при их использовании в ночное время, когда действует пониженный тариф (с 23:00 до 7:00). Особенно актуально создание аккумуляторов изотермического типа, использующих фазовый переход, химические реакции, капиллярно-пористые эффекты, которые в течение долгого промежутка времени не теряют теплоту в окружающее пространство.

Измерительные системы. Создание нано- и микродатчиков приведет в ближайшее время к революционным изменениям в системе контроля и управления работой энергетических установок. Это позволит осуществлять постоянный мониторинг сложных технических систем – определять локальные параметры, детектировать появление трещин, контролировать текущее состояние и своевременно реагировать на возникновение опасных режимов. Сегодня в США создан и испытывается датчик температуры размером 100 микрон, работающий в потоке с температурой до 870 °С. В стадии испытаний датчик температуры до 1200 °С и датчик давления, работающий в потоке с температурой до 500 °С.

Одностенные нанотрубки обладают свойством ультравысокой чувствительности и мо-

гут использоваться для обнаружения определенных молекул в газовой среде или растворах. Нанодатчик для обнаружения молекул NO_2 , CO , CO_2 , H_2 и гидрокарбонатов создан в Университете г. Олбани (США); в нем используются оптические свойства наночастиц золота, встроенных в нанокompозит оксида металла.

Нанотехнологии и здоровье человека. Наночастицы обладают высокой проникающей способностью, это означает, что наночастицы (молекулы) тяжелых металлов или других токсичных веществ могут беспрепятственно попадать в организм человека, животных и биологических объектов (рис. 4). Они могут долгое время накапливаться в живых тканях, образовывать прочные связи с биомолекулами (белками или ДНК), повреждая или «выключая» их, а также способствуя их повышенной активности. Наночастицы могут также приводить к катализу вредных для организма химических реакций.

Углеродные нанотрубки длиннее определенного размера опасны для здоровья, т.к. могут провоцировать заболевания дыхательных путей, аналогичные тем, что возникают при воздействии асбеста. В Великобритании не подлежат сертификации продукты, содержащие искусственно созданные наночастицы,



Рис. 4. Взаимодействие наночастицы с биологическим объектом: нанотрубка (отмечена черным цветом) в водяной блохе.

запрещены к использованию материалы с размером частиц менее 125 микрон, а также, если средний размер наночастиц в изделиях составляет менее 200 микрон.

Развитие нанотехнологий может пойти и по нежелательному для цивилизации направлению. Если будут созданы микроскопические нанобомбы и нановзрывные устройства, то их будет трудно обнаружить и легко доставить в любое место, они могут быть легко использованы для террористических актов.

«Прорывные» нанотехнологии в энергетике. Выполненный анализ показывает, что серьезный «прорыв» в энергетике могут обеспечить следующие направления в области нанотехнологий.

- *Наноматериалы и нанопокрyтия* с повышенной прочностью, термо- и коррозионной стойкостью, нано-структурные керамические и металлокерамические изделия для парогенераторов, пароперегревателей, камер сгорания, лопаток и сопловых аппаратов паровых и газовых турбин.

- *Наножидкости* – новые теплоносители с высокой интенсификацией теплообмена в каналах энергетических машин и установок, новые системы охлаждения в ядерной энергетике и газотурбостроении.

- *Наносмазочные материалы и наноприсадки*, снижающие интенсивность износа деталей машин, потери на трение и вибрации, обеспечивающие безразборный ремонт и восстановление деталей по технологии «Smart self» (интеллектуальное восстановление).

- *Наноактиваторы горения*, нанотехнология обработки угля на молекулярном уровне, обеспечивающая экологически чистое сжигание топлива.

- *Селективные нанокатализаторы и разделительные наномембраны* для защиты окружающей среды, создания новых технологий связывания CO_2 , новых методов очистки воды и воздуха.

- *Реформеры* с селективной производительностью по водороду и окиси углерода.

- *Термоэлектрические и ядерные батареи*

для прямого преобразования радиоактивного излучения и теплоты в электричество.

- *Нано- и микродатчики* для измерения давления, температуры, концентрации и других параметров, обеспечивающих непрерывный мониторинг и оптимизацию рабочего процесса многих энергетических машин и установок.

Задачи ближайшего будущего. Сформулированные выше наиболее важные направления развития нанотехнологий в интересах энергетики охватывают достаточно большой промежуток времени. Что касается задач ближайшего периода, то следует отметить следующие.

1. Изучение теплофизических свойств наноматериалов, кинетики и термодинамики фазовых переходов в наноструктурных материалах и объектах, закономерностей тепло-массопереноса в наножидкостях и миниканалах.

2. Освоение промышленного производства стабильных наножидкостей с неагломерирующими наночастицами, промышленное производство углеродных нанотрубок и нановолокон, синтез углеродных нанотрубок с узкой фракцией распределения по размерам.

Однослойные нанотрубки пока выпускаются только 10 фирмами мира в количествах, не превышающих несколько десятков граммов в сутки при стоимости 500...750 долларов США за грамм. Несколько фирм осуществляют крупномасштабное производство нановолокон. Россия, Украина и Беларусь пока синтезируют углеродные нанотрубки и нановолокна в лабораторных масштабах.

3. Обеспечение минимального риска при производстве нанопродуктов и практическом применении нанотехнологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматуллин Р.Г.* Как обустроить экономику и власть России.– М.: ЗАО «Издательство «Экономика» (Россия). – 462 с.

2. *Wang L., Wei X.* Nanofluids: synthesis, heat conduction, and extension // *Journal of Heat Transfer.*– March 2009.– 131.– 2006.– p.1-7.(2)

3. *Das S., Choi U., Patel H.* Heat transfer in nanofluids - A Review // *Heat Transfer Engineering.*– 2006.– 27.– №10.– p.1-19.

4. *Maynes D., Webb B.* Fully-developed thermal transport in combined pressure and electro-osmotically driven flow in microchannels // *Journal Heat Transfer.*– 125/–October 2003.– p.889-915.

5. *Алексеев С.В.* Теплофизические основы новых энергетических технологий.-<http://www.sibai.ru/content/view/1498/1653/>. (5)

6. *Халатов А.А., Кобзар С.Г., Головатюк П.М., Березницький О.О.* Застосування методів комп'ютерного моделювання при розробці заходів з реконструкції енергоблоків теплоелектростанцій // *Енергетика та електрифікація.*– 2008.– №6. – С.48-55.

7. *Халатов А.А., Костенко Н.В., Шихабуттинова О.В.* Водовугільне паливо в енергетиці України. Сучасний стан і проблеми розвитку // *Вісник Академії митної служби України.*– Сер. техн. науки.– 2009.– №2. – С.33-43.

Получено 22.03.2010 г.