

Перспективы развития нанотехнологий в энергетике

член-корр. РАН Сон Э.Е.

ОИВТ РАН

(495) 223-05-23, доб. 1426, akhm@mami.ru

Ключевые слова: механика, энергетика, нанотехнологии.

Нанотехнологии как новое направление, объединяющее технологии микро- и наномира были объявлены Национальными инициативами развитых стран начиная с 2002 г. Начало нанотехнологиям было положено развитием электронно-вычислительной техники, в которой начиная с 60-х годов теперь уже прошлого века действует закон Мура, по которому мощность компьютеров и соответствующая ему миниатюризация развивается в геометрической прогрессии. В России развитие нанотехнологий определяется областями, в которых достигнуты наибольшие успехи, в первую очередь в материаловедении, производстве нанопорошков и технологиях, использующих контролируемые процессы на микро- и наноуровне.

Одним из новых нанотехнологических направлений, развиваемых в России, является энергетика. Современные проблемы энергетики во многом основаны на нанотехнологиях. Сюда относятся нанотехнологии в теплоэнергетике, использование углеродных наноконпозитов, в комплексном энерготехнологическом использовании природного газа. В качестве примера можно привести развиваемое в Институте теплофизики СО РАН использование метана в водородных микрореакторах с современными катализаторами производства, разработанными в Институте катализа СО РАН. В процессах конверсии метана созданы углеродные нанотрубки, являющиеся основой многих технологий.

В России в течение многих десятков лет развивались фундаментальные исследования по физике низкотемпературной плазмы и плазменные технологии, явившиеся основой многих нанотехнологий.

Одним из новых направлений в механике и энергетике являются микромашины, которые явились результатом миниатюризации приборов и машин. На этой основе появились новые направления, такие как наногидродинамика и нанотехнологии в энергетике на их основе. В традиционной гидродинамике изучается движение газов и жидкостей в макроскопических размерах. Микро- и наногидродинамика является областью механики, в которой изучается движение газа и жидкости в размерах, условно относящихся к области нанотехнологий (менее 100 нм = 0,1 мкм). К приложениям микро- и наногидродинамики относятся жесткие диски персональных компьютеров, микро- и наноэлектронные приборы (MEMS), микро- и наносепараторы, микроканалы, микронасосы, микрозатворы, микросопла, микрогироскопы, микро- и наноспутники, приложения в медицине - движение крови и жидкостей по микрососудам глаза и др., лекарственные препараты и их доставка через микро- и нанопоры, микропористые топлива, электрогидродинамические сверхвысокочувствительные сенсоры для микро- и нанообластей, микрогидродинамика пористых сред, нефтяные задачи, приводящие к повышению качества гидроразрыва пласта, реология (микро- наноструктурные свойства жидких, вязких, пластических, упругих неньютоновских сред) и другие. Особенности микро- и наногидродинамики являются очень большое отношение поверхности к объему, которое существенно изменяют гидродинамику и энергетику в микро- и нанообластях. Вследствие высокой теплопроводности и малых размеров микро- и нанотрубок течения газов являются вязкими, а в одномерном приближении, аналогичном газовой динамике течение ближе к изотермическому, чем адиабатическому, что приводит к особенностям типа существования ударных волн разрежения и другим интересным явлениям. Микро-газожидкостные среды являются интересной областью, имеющей большое количество приложений и требующей решения следующих фундаментальных задач: изучения термодинамики двухфазных систем со свободной границей в применении к микро- и нанопузырьковым средам; проведе-

ния расчетов и оценки энергетических затрат при получении микропузырьковых сред различными способами; исследования кинетики роста и разрушения микропузырьков в жидкости; гидродинамики и пределов напряжений, приводящих к разрушению микропузырьков; физики простых жидкостей в применении к микропузырьковым средам; потенциалов взаимодействия у границ, корреляционных функций, классической теории и квантовых эффектов; разработки математических моделей для описания физических свойств микро- и наноразмерных пузырьков сред; теоретических методов и численного моделирования вязкости, плотности и седиментационной стабильности микро- и нанопузырьковых сред; анализа возможностей модификации свойств жидкости в гидродинамических устройствах; проведения теоретических исследований возможных способов получения микропузырьковых наноразмерных сред; исследования зависимости поверхностного натяжения от радиуса кривизны; атомно-силовой микроскопии в нанопузырьковых средах; нанопузырьков в сонолюминесценции.

Микрогидродинамика нефти – одно из важных направлений нанотехнологий. При фильтрации нефти в пластах на глубине 1-3 км в твердых породах гидродинамика определяется законом Дарси. Для пластов с проницаемостью в милли Дарси размеры пор составляют доли микрон, т.е. течения в них относятся к области нанотехнологий. Свойства обычных и неньютоновских жидкостей определяются их микроструктурой на микро- и наноуровне. Во многих случаях жидкость меняет свои свойства вследствие необратимых процессов, происходящих на микро- и наноуровне, при этом происходит изменение реологических свойств жидкостей. В последнее время выполнены экспериментальные и теоретические исследования нанореологии гелей, используемых для различных прикладных задач, например при гидроразрыве пласта.

Микро-жидкостные молекулярные сенсоры – одно из важных направлений диагностики в энергетике и смежных областях. Работы, проведенные в НПО «Квант» и МФТИ, привели к созданию ЭГД – пентода, состоящего из керамической трубки, электродного узла; электролита, пористых керамических перегородок; анодов и катодов. При создании ускорения возникает инерциальная сила давления в жидкости, которая меняет соотношение концентрации электролита в воде у электродов, что меняет ток в цепи 'сетки' жидкого пентода, обеспечивая большой коэффициент преобразования внешнего механического сигнала в электрический ток. Отличительные особенности сенсора: высокая чувствительность и низкий уровень шума на фоне исключительно малой инерциальной массы; отсутствие прецизионных движущихся механических частей, подверженных разрушению или износу; способность измерять как линейные, так и вращательные движения в широком частотном и динамическом диапазоне; способность работать в экстремальных климатических условиях и при высокой влажности.

Новые материалы в энергетике основаны в большой степени на проведенных в ОИВТ РАН физике кластеров и кластерной плазме, на анализе фазовых переходов в кластерах, оптимизации процессов генерации металлических кластеров из магнетронной плазмы; процессах с участием кластеров, напыленных на поверхность.

К новым важным направлениям в нанотехнологиях в энергетике относятся МГД – генераторы на водородной плазме с применением нанотехнологий, СВЧ наносинтез углеводов, конверсия метана с применением нанотехнологий, материалы в энергетике для нанотехнологий.

Всем хорошо известны обычные конденсаторы и электрохимические элементы, используемые в качестве батарей или источников тока. Между обычными конденсаторами и электрохимическими элементами существует множество устройств, называемых суперконденсаторами. Наиболее эффективными оказались суперконденсаторы с двойным электрическим слоем, основанные на наноструктурных углеродных материалах, которые приводят к накоплению аномального количества энергии на углеродных наноструктурах.

Еще одним из важных направлений нанотехнологий в энергетике является алюмоводородная энергетика. На ее основе созданы альтернативные когенерационные энергоустановки и алюмоводородные генераторы водорода для источников энергии. Современной задачей является разработка энергоустановок для энергообеспечения автономных потребителей на основе энерготехнологических комплексов, использующих реакцию гидротермального окисления алюминия.

Наночастицы и наноструктуры – одно из ключевых направлений развития энергетики. Исследования наносистем можно разделить на несколько групп. Во-первых, представляют интерес свойства наночастиц (или кластеров) и их поведение в газовых системах. Поскольку при контакте наночастицы слипаются и образованные при этом агрегаты теряют свойства первоначальных наночастиц, их невозможно хранить подобно порошкам, и они используются в виде пучков. Поэтому наряду со свойствами наночастиц, процессами с их участием в газах и плазме важную роль играют методы генерации кластеров. Во-вторых, напыление кластеров на поверхность приводит к образованию тонких пленок с программируемыми свойствами, которые можно рассматривать как новые материалы. В частности, в случае напыления металлических кластеров образуемая пористая пленка аморфного металла может быть использована как катализатор для ускорения химических процессов, а также для проведения процессов в биофизике и медицине. Нанопленки соответствующих материалов могут быть получены оптическими методами и использоваться далее для оптических применений. Отметим, что представленные далее исследования не объединяются единой логической нитью и не относятся к единой концепции. Основу каждого из них составляет своя идея, и объединяет их то, что они относятся к наносистемам. Далее рассматриваемые исследования наносистем относятся к мировой науке и практически каждое из них проводится совместно с зарубежными учеными.

Значительный цикл работ проводится по материалам на основе наночастиц и применения кластеров. Проводимые фундаментальные исследования наночастиц связаны с разными прикладными аспектами кластерных пучков. В качестве примера использования кластерных пучков для получения новых материалов можно привести пример напыления на поверхность твердых металлических кластеров с образованием пористой пленки аморфного металла, которая обладает специфическими свойствами. В частности, с древних времен известно, что покрытие поверхности сосуда серебряной пленкой делает его хорошим антисептиком. Однако в последние десятилетия доказано, что микробы погибают на неоднородностях поверхности размером 1-10 нм. Именно такие размеры соответствует пленке, полученной напылением серебряных кластеров на стекло. По сути дела, представленная выше серебряная пленка на стекле является катализатором, ускоряющим химический процесс распада микробов в результате контакта с серебряной пленкой. Процессы создания металлических катализаторов для химических процессов является одним из направлений проводимых нами исследований. При этом признанным достижением ОИВТ РАН являются исследования пылевой плазмы, т.е. системы заряженных пылевых частиц микронных размеров, которые образуют стабильные структуры, будучи подвешены в газовом разряде. Планируется использовать уже опробованную методику покрытия поверхности этих частиц тонкой металлической пленкой путем напыления пучком металлических атомов или кластеров. Такая пылевая плазма является катализатором и повышает химическую реакционность газов, пропускаемых через пылевую плазму. Рассматриваемые приложения структур, создаваемых из наночастиц и используемых в качестве катализатора, являются одним из способов получения новых материалов на основе наночастиц. В ОИВТ РАН разработана оригинальная методика производства композиционных материалов путем покрытия поверхности пылевых частиц (средний размер в диапазоне 0.01-10 мкм), находящихся в плазменной ловушке, другой компонентой с толщиной покрытия ~ 10 нм. Эта методика аналогична описанной выше методике получения металлических катализаторов, однако, включая в эту методику другие компоненты, можно существен-

но расширить спектр приложений. В частности, использовался никель в качестве материала частиц и алмазные наночастицы в качестве их покрытия. Последующее спекание полученного таким способом порошка дает материал для инструмента со сверхтвердой поверхностью, где металл выполняет роль связующей компоненты. Достоинствами новых материалов на основе наночастиц, использующих описанные методики, является высокая чистота материала и регулируемость его состава. В то же время он производится в микроколичествах и его удельная цена достаточно велика. Описанные выше методы создания катализаторов и новых материалов на основе наночастиц привели к разработке экспериментальной техники, которая может быть использована в дальнейшем в качестве прототипов техники для соответствующих направлений нанотехнологии. Кластеры являются удобной мишенью для возбуждения лазером или пучками электронами или ионов. Кластерные пучки обладают низкой средней плотностью, соответствующей газам, и высокой локальной плотностью вещества. Поэтому, в отличие от конденсированных поверхностей, где энергия передается большей массе вещества, кластеры могут быть превращены в сгустки горячей плазмы, но, в отличие от газовых систем, взаимодействие электромагнитного излучения или пучков атомных частиц с кластерами столь же сильное, как с конденсированным веществом. Этот факт используется для создания генераторов рентгеновского излучения с высокой интенсивностью, которые требуются для современной литографии, а также для разработки специальных источников рентгеновского излучения. Кроме того, по этой же схеме могут быть разработаны источники нейтронов.

Наряду с вышеуказанными методами генерации металлических кластеров были проанализированы лазерный метод генерации пучков кластеров металла, а также вытекание металлического пара, созданного в печи, через сопло. Во всех случаях понимается использование кластерного пучка сразу же после выхода из источника, в наших случаях главным образом – для получения новых материалов. Анализ показывает, что оптимальный источник металлических кластеров определяется конкретной задачей использования пучка кластеров.

Углеродная оболочка защищает металл от воздействия агрессивных сред, в частности от окисления при транспортировке нанопорошков к месту их непосредственного применения, что позволяет сохранить их свойства до момента использования. Кроме того, металлоуглеродные наночастицы обладают магнитными свойствами, что позволяет управлять их перемещениями к больным органам и применять в терапии, например, для доставки прикрепленных к ним лекарств по кровеносным сосудам человека. Нанопорошки, осажденные и закрепленные на подложках, являются еще одним видом новых наноматериалов, обладающих уникальными свойствами, необходимыми для практического применения в различных областях, в частности, в оптике (металлические наночастицы на стеклах), металлообработке (упрочнение режущего инструмента), машиностроении (снижение износа движущихся деталей) и т.д. Представлен пример нанопокрyтия железных наночастиц на корундовой основе, полученных при УФ фотоллизе пентакарбонила железа.

Фемтосекундные лазеры позволяют создать новые поколения медицинских наноприборов для ионной терапии раковых заболеваний, а метод оптической ловушки при фокусировке лучей лазера позволяет создать новый медицинский прибор – пинцет для захвата раковых клеток и переноса их в локализованные области для последующей обработки.

Таким образом, результаты данных разработок позволяют подготовить условия для опытно-конструкторских работ и внедрения нанотехнологий по производству углеродных, металлических и металлоуглеродных высокочистых нанопорошков заданного размера при минимальном энергопотреблении. При дальнейшем продвижении данной технологии может быть внесен существенный вклад в решение народно-хозяйственных задач посредством повышения эффективности производства продуктов каталитического синтеза в химической промышленности путем экономии энергетических ресурсов при использовании водорода как альтернативного топлива при решении экологических проблем загрязнения окружающей

среды, путем увеличения производительности труда в сельском хозяйстве при применении нанопорошков как добавок к пище домашних животных и к удобрениям, а также в медицине для диагностики и лечения социально значимых заболеваний.

В настоящее время ведутся работы по следующим современным проблемам энергетики, основанные на нанотехнологиях.

- Нанотехнологии в теплоэнергетике.
- Углеродные нанокompозиты.
- Комплексное энерготехнологическое использование природного газа.
- Низкотемпературная плазма и плазменные технологии.
- Водородные микрореакторы.
- Наногидродинамика и нанотехнологии в энергетике на ее основе.
- Физика кластеров и кластерная плазма: анализ фазовых переходов в простых кластерах, оптимизация процессов генерации металлических кластеров из магнетронной плазмы; процессы с участием кластеров, напыленных на поверхность.
- МГД – генераторы на водородной плазме с применением нанотехнологий.
- СВЧ наносинтез углеводородов, синтез УНТ при конверсии метана с применением нанотехнологий.
- Материалы в энергетике для нанотехнологий.
- Суперконденсаторы с двойным электрическим слоем.
 1. Наноструктурные углеродные материалы суперконденсаторов.
 2. Накопление аномального количества энергии на углеродных наноструктурах.
- Алюмоводородная энергетика.

Создание альтернативных когенерационных энергоустановок и алюмоводородных генераторов водорода для источников энергии, а также новых методов исследования нанопористой структуры материалов.

Разработка энергоустановок для энергообеспечения автономных потребителей на основе энерготехнологических комплексов, использующих реакцию гидротермального окисления алюминия.

Эти направления тесно связаны с разработкой материалов, свойства которых должны изучаться в университетах, в том числе и в одном из ведущих вузов России – МГТУ «МАМИ».