

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗВИВАЕМЫЕ В ГНЦ РФ-ФЭИ

В.И. Рачков, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, В.В. Григоров,
Н.А. Денисова, Н.И. Логинов, В.П. Мельников, А.С. Михеев,
А.Г. Портяной, Е.Н. Сердунь, А.П. Сорокин, А.Н. Стороженко,
В.В. Ульянов, В.И. Ягодкин

ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлены результаты выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ исследований и разработок с использованием тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинца, эвтектического сплава 44,5% Pb – 55,5% Bi, галлия) в области прямоконтактных жидкометаллических технологий получения водяного пара, пресной воды, сингаза и водорода, жидкометаллической технологии синтеза наноструктурных оксидов и аэрогелей, технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий (мембран) на пористых подложках фильтрующих элементов для очистки питьевой воды, переработки технических жидкостей на АЭС и предприятиях атомной промышленности (очистка воды от радионуклидов), в химических производствах (очистка промышленных стоков), гальванических производствах (очистка и частичное восстановление электролитов), в горнодобывающей промышленности при выделении из растворов ценных примесей (золото, никель, серебро и др.), металлургической промышленности для чистки оборотной воды от механических примесей. Изложены результаты разработок в области жидкометаллических тепловых труб, в том числе для создания химического реактора для конверсии исходного углеводородного сырья в смесь ароматических углеводородов, результаты выполненных исследований научно-технических основ энерготехнологии лиофобных капиллярно-пористых систем и разработки устройств с их использованием (аккумуляторы и преобразователи энергии, компенсаторы давления жидкости, демпферы, пассивные защитные устройства для тепловой, космической и атомной энергетики). Представлено описание разработанных систем контроля кислорода и водорода в газовых и жидких средах, в том числе для раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов.

Ключевые слова: инновационные технологии, жидкометаллические теплоносители, свинец, галлий, натрий, водяной пар, пресная вода, сингаз, водород, прямоконтактная технология, наноструктурные оксиды и аэрогели, плазмохимический синтез полифункциональных наноструктурных покрытий, тепловые трубы, лиофобные капиллярно-пористые системы, атомная промышленность, химическое производство, металлургия.

© *В.И. Рачков, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, В.В. Григоров, Н.А. Денисова, Н.И. Логинов, В.П. Мельников, А.С. Михеев, А.Г. Портяной, Е.Н. Сердунь, А.П. Сорокин, А.Н. Стороженко, В.В. Ульянов, В.И. Ягодкин, 2014*

ВВЕДЕНИЕ

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр Российской Федерации Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (далее ГНЦ РФ-ФЭИ) создан в соответствии с постановлением СНК СССР от 19.12.45 №3117-937сс как Лаборатория «В». Неоценимый вклад в развитие института внесли академик АН УССР А.И. Лейпунский, член-корреспондент АН СССР Д.И. Блохинцев и многие другие известные в стране и за рубежом ученые и специалисты. В 1951 г. Лаборатории «В» было поручено сооружение в Обнинске атомной электростанции, создание которой впервые продемонстрировало возможность мирного использования атомной энергии. Первая в мире АЭС была введена в эксплуатацию в ФЭИ 27 июня 1954 г. (рис. 1).



Рис. 1. Первая в мире АЭС

В 2002 г. после 48-ми лет безаварийной работы реактор первой в мире атомной электростанции был остановлен. Первенец ядерной энергетики доказал полную безопасность нахождения АЭС в самой густонаселенной части России. Первая АЭС была той экспериментальной базой, на которой отработывались модели атомных станций новых поколений, а теперь она стала полигоном для разработки технологий вывода других АЭС из эксплуатации.

В настоящее время ГНЦ РФ-ФЭИ является многопрофильной научной организацией, ведущей комплексные исследования физико-технических проблем ядерной энергетики, в том числе инновационные разработки для атомной промышленности и гражданского назначения. Центр состоит из пяти институтов, насчитывающих 70 лабораторий.

Теоретические и экспериментальные работы проводятся в области ядерной физики, физики ядерных реакторов и радиационной защиты, теплофизики и гидравлики, коррозии конструкционных материалов, радиационного материаловедения, технологии жидкометаллических теплоносителей, химии и радиохимии и других разделов атомной науки и техники.

Для проведения этих исследований ГНЦ РФ-ФЭИ располагает высококвалифицированными кадрами (численность сотрудников – 3500 человек, в том числе 70 докторов и 316 кандидатов наук) и уникальной экспериментальной базой.

Практическое воплощение получили многие разработки ГНЦ РФ-ФЭИ, среди которых

- быстрые реакторы БР-1, БР-2, БР-5, БР-10 в Обнинске, БОР-60 в Дмитровграде, БН-350 в Актау (Казахстан), БН-600 – этот реактор имеет более чем 30-летний опыт успешной работы на БАЭС, завершается строительство БН-800 также на БАЭС, идет его подготовка к пусковым работам;
- реакторы для подводных лодок со свинцово-висмутовым охлаждением
- наземные прототипы, опытные образцы и серийные установки (рис. 2);
- реакторы ТОПАЗ и БУК для энергоустановок космических аппаратов, прошедшие успешные испытания на околоземных орбитах;
- под научным руководством ГНЦ РФ-ФЭИ и с его участием были созданы также реакторы первой очереди Белоярской АЭС на Урале, передвижная АЭС ТЭС-3, Билибинская АТЭЦ на Чукотке, разработано около сотни других проектов ядерных энергоустановок различного назначения.



Рис. 2. Атомные подводные лодки (проекты 705 и 705К) с теплоносителем Pb-Bi

В настоящее время ГНЦ РФ-ФЭИ является координатором и научным руководителем Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года», в рамках которой предполагается создание ряда инновационных реакторных установок, охлаждаемых жидкими металлами (БН-1200, БРЕСТ-300, СВБР-100, МБИР) [1–5].

Другими инновационными направлениями деятельности института являются использование радиации для лечения онкологических заболеваний, разработки по радиоизотопам и радиофармпрепаратам, создание медицинских приборов; создание систем очистки и контроля жидких и газовых сред; разработки прямоконтактных жидкометаллических технологий получения водяного пара, пресной воды, сингаза и водорода; разработки в области тепловых труб, исследования в области лиофобных капиллярно-пористых систем и разработка устройств на их основе; получение чистого кремния с использованием натриевой технологии; получение высокочистых галлия, свинца, эвтектического сплава 44,5% Pb – 55,5% Bi; разработка нанотехнологий и т.д.

История вовлечения ГНЦ РФ-ФЭИ в nanoиндустрию берет свое начало с 1993 г. с развития двух нанотехнологий: жидкометаллической технологии синтеза наноструктурных аэрогелей и оксидов и технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий на пористых подложках.

**ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ (ТЖМТ)
В ПРЯМОКОНТАКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА
ВОДЯНОГО ПАРА, ПРЕСНОЙ ВОДЫ, СИНГАЗА И ВОДОРОДА**

Тяжелые теплоносители свинец-висмут и свинец могут эффективно использоваться для охлаждения реакторов ядерных энергетических установок [69]. Это оказалось возможным благодаря ряду теплофизических преимуществ ТЖМТ перед другими теплоносителями при высокотемпературном переносе тепла. ТЖМТ имеют также физико-химические особенности, которые позволяют рассматривать не только принципиально новые и более эффективные схемы производства тепла и электричества в ЯЭУ, но и варианты получения при непосредственном смешении ТЖМТ с перерабатываемыми средами в контурах ЯЭУ таких ценных технологических продуктов, как водород, синтез-газ, пресная вода и водяной пар.

Разработки прямоконтактных технологий и устройств, проводимые в ГНЦ РФ-ФЭИ, можно условно разделить на два направления: 1) получение водяного пара и пресной воды [10–12]; 2) производство водорода и синтез-газа [13–15].

В рамках первого направления на сегодняшний день достигнуто следующее:

- спроектированы и изготовлены макетные образцы прямоконтактных испарителя и опреснителя;
- разработана методика расчета теплообмена при прямом смешении жидкого металла с водой;
- проведены испытания созданных макетных образцов (температура расплава, подаваемого в зону испарения воды, 150–450°C, давление в макетных образцах 1,1–3,0 бар, расход воды через зону испарения изменялся от 0,5 до 8 кг/ч, объем зоны испарения – 2,5 л).

Полученные при испытаниях данные показали преимущества испытанных макетных образцов по сравнению с прямоконтактными моделями, разработанными японскими исследователями (основными конкурентами российских разработчиков прямоконтактных систем). Определенные по результатам испытаний значения усредненного объемного коэффициента теплообмена существенно выше, чем в экспериментах, выполненных в частном институте CRIEPI, и близки к данным, полученным в Токийском технологическом институте (хотя последние были получены в условиях более благоприятных для процессов теплообмена при высоком давлении в системе – вплоть до 5,0 МПа). Указанные преимущества достигнуты за счет эффективной конструкции диспергатора пароводяной смеси (представляющего собой цилиндр с вертикальными прорезями в нижней половине) и удачной конструкции макетных образцов. Благодаря этому инжекция воды осуществлялась не только по центру зоны испарения (как это происходило у японских исследователей), а практически на весь объем расплава. Поэтому при проведении настоящих испытаний в прямоконтактном теплообмене участвовал больший, чем в японских моделях, объем металла.

Выполненный расчет кожухотрубной модели на основе режимных параметров при проведении экспериментов с макетными образцами показал существенное преимущество (уменьшение размеров и повышение эффективности теплообмена) прямоконтактных систем по сравнению с кожухотрубными.

Во всех режимах испытаний макетные образцы работали устойчиво и без «паровых взрывов». Установление и изменение режима работы макетных образцов не вызывало каких-либо затруднений и осложнений.

Полученные результаты убедительно продемонстрировали преимущества прямо-контактных технологий испарения и опреснения воды, главными из которых являются высокий объемный коэффициент теплообмена при смешении ТЖМТ с водой, простота конструкции и технологичность изготовления аппаратов для их реализации.

В рамках второго направления предлагается создание генераторов водорода и синтез-газа на основе следующих процессов: разложение водяного пара, окислительная конверсия газообразных углеводородов.

При разложении водяного пара ($t = 400\text{--}1000^\circ\text{C}$) протекает реакция



Возможная схема процесса представлена на рис. 3. Для интенсификации процесса получения водорода необходимо постоянно отводить растворенный в расплаве кислород из зоны реакции. Это можно осуществить при помощи специального кислородного насоса, разрабатываемого в ГНЦ РФ-ФЭИ.

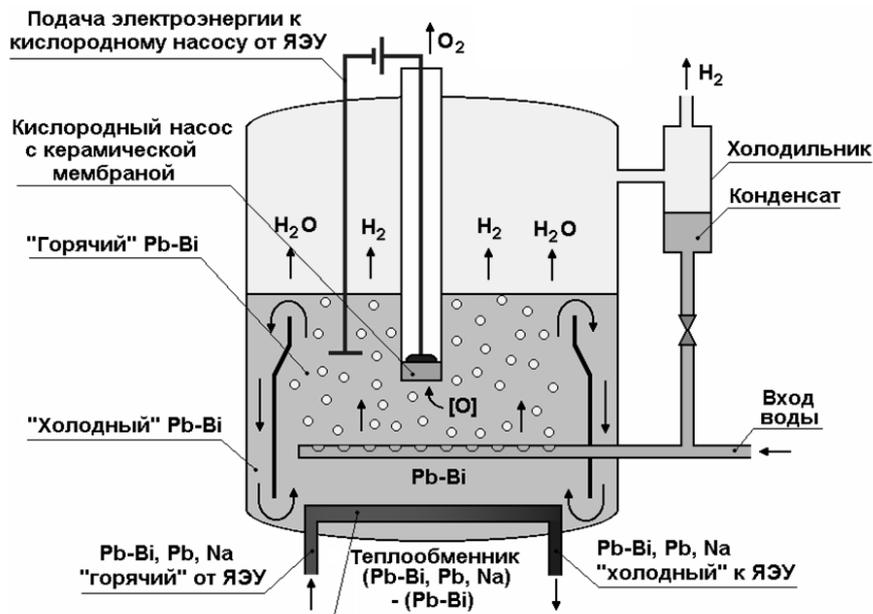


Рис. 3. Принципиальная схема процесса генерации водорода при разложении водяного пара в ТЖМТ

В ГНЦ РФ-ФЭИ получены первые экспериментальные результаты термического разложения водяного пара в расплаве Pb-Bi.

Относительно небольшие концентрации полученного водорода объясняются использованием несовершенного (с малой площадью электролита, небольшими допустимыми напряжениями на электродах) кислородного насоса. Также очевидно, что при таком способе производство водорода целесообразно проводить при повышенных температурах ($t \geq 800^\circ\text{C}$).

При окислительной конверсии (рис. 4) углеводородов (при $t \geq 500^\circ\text{C}$) возможна реакция



Оксидная конверсия может протекать при более низких температурах по сравнению с традиционной паровой конверсией. Повышение эффективности конверсии происходит за счет новых, ранее не применяемых процессов: окисление углеводородов оксидами, присутствующими в зоне реакции в растворенном в расплаве виде и (или) в виде твердой фазы.

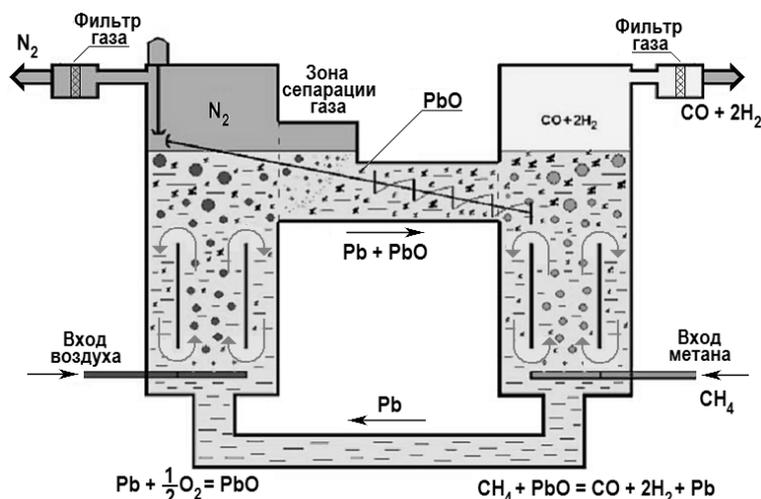


Рис. 4. Схема процесса генерации синтез-газа при оксидной конверсии углеводородов в ЖМТ

Непрерывное получение PbO возможно непосредственно в контуре циркуляции при окислении жидкого металла кислородом воздуха по реакции



При протекании реакции (3) выделяется тепло, которого достаточно для обеспечения теплом реакции (2). Таким образом, система для реализации реакций (2) и (3) может не нуждаться в непрерывном подводе тепла.

Первые экспериментальные результаты подтвердили принципиальную возможность осуществимости оксидной конверсии углеводородов (на примере пропана).

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА В ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕДАХ

На базе большого опыта ГНЦ РФ-ФЭИ по созданию различных устройств контроля для атомной энергетики разработаны датчики на твердых электролитах для контроля водорода и кислорода в жидкометаллических теплоносителях (Pb, Bi, Na), а также в газовых контурах и производственных помещениях [16–18].

Основным устройством в датчиках для контроля активности кислорода и водорода является керамический чувствительный элемент на основе твердых электролитов из оксидной керамики, обладающий способностью работать длительное время в условиях повышенных температур и термоударов в расплавах металлов, обладающий стабильностью проводящих и механических свойств, термостойкостью, низкой газопроницаемостью.

В результате проведенных исследований удалось разработать технологию изготовления высокоплотной твердоэлектролитной керамики на основе нанокристаллических порошков частично стабилизированного ZrO_2 с добавкой наноструктурного аэрогеля $AlOOH$ для применения в качестве электролита. При-

меняемые в рассматриваемой технологии получения керамики оксидные нанопорошки (аэрогель $AlOON$) синтезируются по оригинальной жидкометаллической технологии, разработанной в ГНЦ РФ-ФЭИ.

По областям применения разрабатываемые детекторы делятся на следующие виды.

Датчики термодинамической активности кислорода в свинцовосодержащих расплавах. Данные устройства предназначены для измерения термодинамической активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях АЭС.

Технические характеристики датчиков для измерения активности кислорода в жидкометаллических расплавах: диапазон измерения активности кислорода $a = 10^6 - 1$; диапазон рабочих температур $350-650^\circ C$; рабочая среда – Pb, Pb-Bi, Na; рабочее давление – $0-1,5$ МПа; скорость изменения температуры – до $100^\circ C/c$; ресурс работы – до 10000 часов.

С использованием таких датчиков для реакторных установок СВБР, БРЕСТ разрабатываются специальные автоматизированные системы контроля и управления качеством жидкометаллических теплоносителей.

Высокотемпературные датчики кислорода в газовых средах разработаны на основе датчиков активности кислорода в жидкометаллических расплавах. Датчик состоит из измерительного и электронного блоков, соединенных кабельной линией длиной до 120 метров. Сенсор, в основе которого находится твердоэлектrolитная керамическая ячейка, расположен внутри термостатированного корпуса измерительного блока, куда обеспечивается непрерывная подача исследуемого газа путем конвекции.

Основные технические характеристики: диапазон измерения содержания кислорода в анализируемой газовой смеси – от 0 до 30 кПа; параметры анализируемой газовой смеси (% об.) – воздух – от 10 до 100, CO – до 1, CO₂ – до 1, водяной пар – до 100, водород – до 0,01; предел допускаемой основной относительной погрешности – 12%; диапазон допустимых температур среды в месте установки датчика – до $700^\circ C$; диапазон допустимых давлений – от 0 до 0,7 Па.



Рис. 5. Система раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов

Система раннего обнаружения и контроля горючих и взрывоопасных газов разработана на основе датчиков кислорода в газовых средах (рис. 5). Система предназначена для обеспечения безопасной эксплуатации и контроля технологических процессов производств, связанных с получением, использованием, переработкой или хранением горючих газов (водород, кислород, метан, пропан и др.) и паров легковоспламеняющихся жидкостей

(спирт, ацетон, аммиак и др.).

Нижний порог обнаружения в воздухе (% об.) водорода – 0,01; паров ацетона, спирта и др. – 0,05; метана, пропана и др. – 0,1; кислорода в инертных газах – 10^7 .

Диапазоны допустимых давлений – до 0,7 Мпа, температур среды – до 500°C.

Датчики водорода в натриевом теплоносителе и газовых контурах АЭС на быстрых нейтронах. Устройства входят в систему аварийной защиты парогенератора и предназначены для контроля течи воды в натрий второго контура.

Диапазон измерения водорода в натрии от 0,01 до 14 ррт, рабочий диапазон температур от 350 до 500°C, инерционность – не более 20 с.

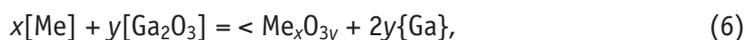
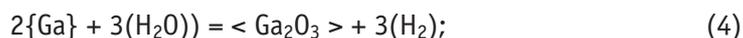
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРНЫХ ОКСИДОВ И АЭРОГЕЛЕЙ

В разработанной ГНЦ РФ-ФЭИ жидкометаллической технологии синтеза [19], в отличие от традиционной «автоклавной» золь-гель-технологии, не используются вредные и агрессивные жидкости. Также нет необходимости создавать высокие давления, что существенно снижает уровень затрат на оборудование и упрощает технологические схемы. Кроме того предлагаемая не имеющая аналогов жидкометаллическая технология отличается низким энергопотреблением и высокой производительностью.

Предложенный способ синтеза наноструктурных оксидов заключается в последовательном осуществлении двух стадий:

– растворение в галлии при 323–423 К (свинце при 653–873 К, свинце-висмуте при 453–873 К) металла, обладающего большим сродством к кислороду по сравнению с Ga (Pb) и растворимостью в конкретной жидкометаллической среде не менее 0,1% мас.;

– окисление растворенного металла в галлии (свинце, свинце-висмуте) водяным паром в соответствии с реакциями



где x и y – стехиометрические коэффициенты, а вид скобок характеризует состояние реагентов и продуктов реакции: { } – жидкое; [] – растворенное; () – газообразное; < > – твердое (аморфное).

Известные данные по растворимостям металлов в галлии, свинце и свинце-висмуте наряду с термодинамическими расчетами параметров реакций образования оксидов в перечисленных растворителях свидетельствуют о возможности получения большого количества соединений вида Me_xO_y . Так при селективном окислении системы {Ga}[Me] до 423 К следует ожидать получения Na_2O , Li_2O_3 , Al_2O_3 , MgO и CaO . Аналогичные расчеты приводят к выводу о возможности синтеза TeO , NiO , GeO_2 , SnO_2 , In_2O_3 , K_2O , ZnO , Ga_2O_3 , Na_2O , MnO , Li_2O , Al_2O_3 , BaO , SrO , Ce_2O_3 , MgO и CaO в расплавах свинца и свинца-висмута до 873 К.

На рисунке 6 представлена схема реализации рассматриваемого способа получения ультрадисперсных оксидов из расплавов галлия, свинца и эвтектики 44,5% Pb – 55,5% Bi. Рост частиц образующегося оксидного вещества с поверхности барботажного устройства, с помощью которого в расплав галлия (свинца,

свинца-висмута) подается газовая смесь с водяным паром в глубь жидкометаллической среды, ограничен и определяется соотношением величин разнонаправленных сил (архимедовой, тяжести, подъема газа, поверхностного натяжения, адгезии, инерции).

По данной (жидкометаллической) не имеющей аналогов технологии теоретически можно получить порядка 100 различных соединений. Это следует из термодинамических расчетов возможности образования оксидных (галогенидных, нитридных, гидридных) фаз металлов, растворенных в расплавах галлия или свинца, или эвтектики Pb-Bi и селективно окисляемых (галогенируемых, азотируемых, гидрируемых) в этих жидкометаллических средах-растворителях.

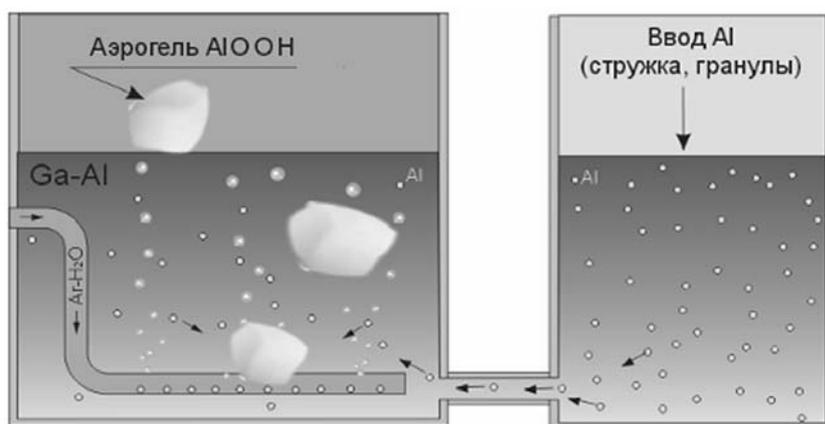


Рис. 6. Схема получения ультрадисперсных оксидов из расплавов галлия, свинца и эвтектики 44,5% Pb – 55,5% Bi

К настоящему времени по способу селективного окисления металлических примесей в расплавах галлия, свинца и свинца-висмута получены наноструктурные оксиды Al_2O_3 , $AlOOH$ (аэрогель), In_2O_3 , Fe_3O_4 , MgO , MoO_3 , SnO_2 , ZnO , Ga_2O_3 . Синтезированные вещества имеют объемный вид (порошки с макрочастицами размером до 500 мкм, аэрогели с линейными размерами образцов до 10 см). Структурные составляющие ультрадисперсных оксидов находятся в пределах от 5 до 200 нм, что зависит от химического состава полученных веществ и условий их синтеза.

Синтезированные вещества, в силу наноструктурного состояния, являются уникальными материалами для создания тепло- и электроизоляции, сенсоров, керамики, ядерного топлива, катализаторов с улучшенными технико-экономическими показателями.

Рассмотрим, например, технологию получения и некоторые свойства аэрогеля $AlOOH$. Через бинарный расплав Ga-Al продувается инертный газ, увлажненный водяным паром. Алюминий, в силу его большего сродства к кислороду по сравнению с галлием, окисляется водяным паром, что приводит к образованию легкого белого вещества (так называемого аэрогеля).

Образцы получаемого таким способом материала имеют слоисто-волокнистое строение. Минимальные структурные составляющие этого материала характеризуются размерами (диаметрами) на уровне 5–10 нм (чаще 20–50 нм) и представляют собой волокна, ориентированные в одном направлении (рис. 7 а). Расстояние между волокнами колеблется от 10 до 100 нм. Волокна в свою очередь формируют несколько наложенных друг на друга слоев (рис. 7 б).

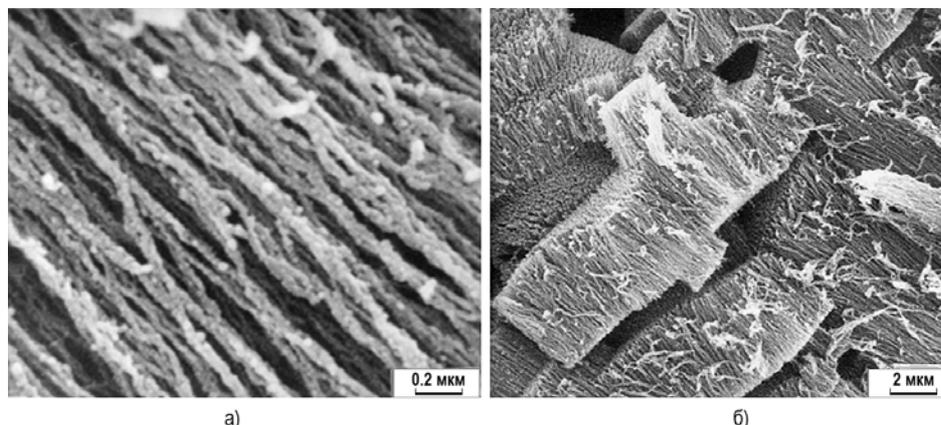


Рис. 7. Микроструктура аэрогеля AlOOH при различном увеличении

Свойства аэрогеля: плотность – 13–80 кг/м³, теплопроводность в диапазоне температур 130–1500 К – 0,02 Вт/(м·К), электрическое сопротивление – более 10¹⁰ Ом·м, пористость – до 99,5%, площадь удельной поверхности (БЭТ) – до 800 м²/г. Аэрогель AlOOH обладает способностью эффективно поглощать газы (CO, CO₂, NO, NO₂ и др.), катализировать органические реакции (ароматизации, получения синтез-газа), а также характеризуется неподверженностью к старению при многолетнем хранении и др. Свойства синтезированного в ГНЦ РФ-ФЭИ наноструктурного материала не уступают (и даже превосходят) свойствам аэрогелей, полученных по золь-гель-технологии.

ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ (МЕМБРАН) НА ПОРИСТЫХ ПОДЛОЖКАХ

Появлению фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами предшествовали многолетние научные изыскания. Правда, с самого начала они были нацелены на достижение важных практических результатов в других областях науки – это технологии, созданные для транспортных энергетических установок и очистки жидких радиоактивных отходов АЭС.

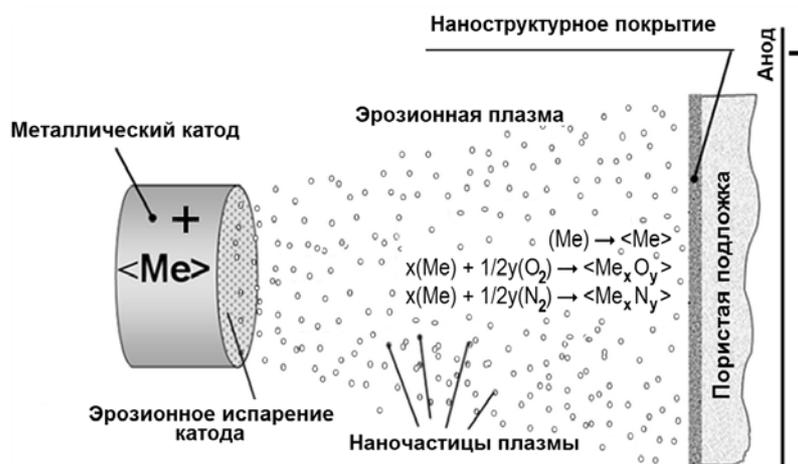


Рис. 8. Схема получения наноструктурных мембран

В ГНЦ РФ-ФЭИ разработана технология получения уникального фильтрующего

материала. Главная особенность технологии плазмохимического синтеза полифункциональных наноструктурных покрытий состоит в том [20], что переход вещества из твердого состояния в плазменное, а затем в твердое осуществляется как единый неразрывный процесс. На рисунке 8 приведена схема получения наноструктурных мембран путем осаждения частиц из эрозионной плазмы на пористую подложку. Для этого используются промышленные установки электродугового испарения.

Уникальность этого фильтрующего материала (наноструктурной мембраны) заключается в том, что его поверхность содержит миллиарды наноцелей, которые не пропускают частицы величиной больше 0,1 мкм. Толщина такой наноструктурной мембраны всего 7–12 мкм, что в 5–10 раз меньше диаметра человеческого волоса, однако ей не страшны давление, вибрация, она устойчива к истиранию абразивными материалами ее свойства не ухудшатся. Технология позволяет подбирать свойства мембраны в зависимости от состава очищаемой жидкости и условий фильтрования. Наноструктурную мембрану можно изготавливать многослойной, из разных материалов, например, есть возможность сделать каждый 5-микронный слой мембраны из различных материалов. В зависимости от назначения и условий фильтрования подложка, на которой формируется наноструктурная мембрана, может быть полимерной, керамической, металлической или композиционной. От режимов формирования и состава мембраны зависит, например, будет ли осадок прилипать к ее поверхности или, наоборот, будет легко отделяться от нее. Основным направлением использования таких наноструктурных мембран является очистка водных растворов, в том числе очистка питьевой воды.

Основные преимущества фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами:

- высокая механическая прочность в широком интервале температур (10–250°C) и диапазоне давлений фильтрации (1,0–60 атм.);
- высокая износостойкость мембран;
- слабая адгезия к осадкам взвесей фильтруемых жидкостей;
- длительный ресурс ее эксплуатации;
- высокая коррозионная стойкость;
- оптимальное сочетание тонкости очистки с гидравлическим сопротивлением потока жидкости;
- высокая удельная производительность более 600 м³/(м²·ч·атм.), что значительно выше, чем у аналогов;
- производство экологически безопасно;
- обладают свойствами гибкой керамики.

Как уже отмечалось, наноструктурные мембраны очищают воду от мельчайших частиц размером более 0,1 мкм, в том числе от взвесей железа, доводя ее до прозрачности двойного дистиллята. Кроме этого мембрана производит безреагентное (бесхлорное) обеззараживание воды от широкого класса болезнетворных микроорганизмов с размером более 0,1 мкм. В том числе обеспечивается 100%-ная очистка от кишечной палочки *E.coli*.

Полученные фильтрующие элементы не только очищают жидкости от всех механических примесей, даже мельчайших, на 99,95%, но и являются стойкими к воздействию радиоактивного излучения и могут применяться для утилизации жидких радиоактивных отходов. Такие фильтрующие элементы сохраняют прочность при температурах до 650°C, работают в условиях вибраций и больших, до 60 бар., давлений. Эти характеристики существенно превосходят

показатели фильтроматериалов, в том числе лучших зарубежных образцов, применяемых сегодня в различных отраслях промышленности, например, на атомных станциях при очистке горячей воды первого контура или турбинных масел.

И еще одно достоинство наноструктурных фильтрующих элементов – значительный ресурс работы. Мембрана специально создана с такими свойствами, чтобы к ней очень плохо прилипали любые загрязнения, а для удаления накопленных осадков конструкция разработанного фильтра предусматривает режим самоочистки, т.е. не нужны химические растворители или другие вредные вещества.

Также новые мембранные фильтроэлементы позволяют существенно повысить области применения сорбентов. Один из них трепел давно известен своими хорошими адсорбционными свойствами. Он эффективно сорбирует многие вредные примеси из растворов, но его применение для очистки воды было ограничено, так как его взвеси трудно выделить из очищаемой жидкости. Наноструктурная мембрана полностью выводит этот сорбент и тем самым резко повышает возможность его использования.

Кроме того наноструктурные мембраны можно использовать для повышения эффективности работы уже существующих методов очистки, например, всем известно, что можно обеззараживать воду ультрафиолетом. Это совершенно безопасный способ очистки воды в бассейнах. Но почему же тогда чаще применяют хлорирование? Дело в том, что для достижения наибольшей эффективности использования ультрафиолетовой лампы необходимы высокая прозрачность воды и отсутствие осадка на стекле лампы. Созданные наноструктурные мембраны помогают этого добиться. Работая практически в идеальных условиях, лампа обеспечивает длительное и эффективное обеззараживание воды, которое обходится значительно дешевле.

Основные области применения фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами.

Очистка питьевой воды:

- предприятия Министерства чрезвычайных ситуаций (мобильные системы очистки воды);
- жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) и индивидуальные пользователи (получение питьевой воды высшего качества);
- пищевая промышленность (питьевая вода, вода для производства безалкогольной продукции и др.);
- учреждения здравоохранения (получение воды для фармацевтики).

Переработка технических жидкостей:

- АЭС и предприятия атомной промышленности (очистка воды от радионуклидов);
- химические производства (очистка промышленных стоков);
- гальванические производства (очистка и частичное восстановление электролитов);
- горнодобывающая промышленность (выделение из растворов ценных примесей (золото, никель, серебро и др.);
- металлургическая промышленность (очистка оборотной воды от механических примесей).

В целом можно сказать, что учеными ГНЦ РФ-ФЭИ создан принципиально новый класс фильтрующих материалов, имеющих наноразмерную структуру и ряд важных технико-экономических преимуществ. В настоящее время проходит завершающая стадия создания производства фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами для доочистки питьевой воды в домашних условиях, которые

можно использовать как в разработанных фильтрах ГНЦ РФ-ФЭИ, так и в фильтрах других производителей.

Помимо этого планируется создание производств новых инновационных продуктов на основе фильтрующих элементов с наноструктурными мембранами – это мембранные фильтры различной производительности, а также целые комплексы систем сорбционной и мембранной очистки. Комплексные системы позволят производить очистку воды из любого источника (река, озеро, болото, лужа и т.п.) до уровня питьевой; осуществлять переработку радиоактивных отходов; выполнять очистку и регенерацию технических масел турбин, трансформаторов, двигателей, гальванических растворов; утилизировать моющие средства; производить очистку воды в отопительных системах, аквариумах и многое другое.

РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Тепловая труба представляет собой замкнутое теплопередающее устройство, в котором перенос тепла из зоны подвода тепла в зону отвода тепла осуществляется паром в результате процессов испарения и конденсации рабочего вещества, а возврат конденсата в зону подвода тепла производится действием массовых (гравитационных, центробежных) и (или) поверхностных сил (поверхностное натяжение жидкости).

В ГНЦ РФ-ФЭИ работы по тепловым трубам начались в 60-х годах прошлого века сначала применительно к системам прямого преобразования тепловой энергии в электрическую космического назначения, а затем и для других отраслей промышленности. Были разработаны методы расчета и конструирования и технологические приемы изготовления тепловых труб, практически освоено диапазон от криогенных температур до 1500°C. Результаты исследований и разработок опубликованы в двух монографиях, получивших международное признание [21, 22], в большом количестве журнальных статей, в трудах конференций и в виде патентов на изобретения. В качестве примера ниже приведен ряд разработок, выполненных в последнее десятилетие.

На рисунке 9 показана модель абсолютно черного тела для градуировки пирометров, изготовленная по заказу ОАО «Метропир». Она представляет собой коаксиальную тепловую трубу длиной ~500 мм с внутренним диаметром 69 мм. Градиент температуры на внутренней поверхности – не более 0,01°C/см.

На рисунке 10 изображен внешний вид термостата технологического для производства полупроводниковых материалов, изготовленного по заказу ООО НПФ СМILab. Термостат имеет три колодца, в которых поддерживается заданная температура с градиентом не более 0,01°C/см (глубина колодцев – 350 мм, диаметр – 60 мм). Особенностью этого термостата является то, что он устанавливается на вращающемся столе и работает в поле действия центробежных сил.

На рисунке 11 показаны тепловые трубы, разработанные и изготовленные в ГНЦ РФ-ФЭИ по заказу ООО «САПР-НЕФТЕХИМ». Эти тепловые трубы предназначены для создания изотермических условий в реакционной зоне химического реактора, в котором происходит конверсия исходного углеводородного сырья в смесь ароматических углеводородов (мощность тепловой трубы 70 кВт, общая высота – 9 метров).

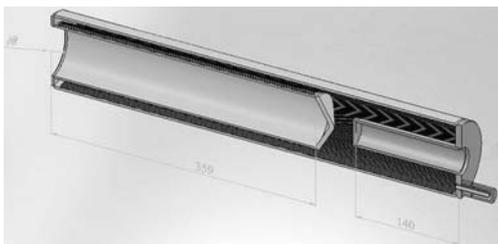


Рис. 9. Модель абсолютно черного тела (рабочее вещество – натрий, диапазон рабочих температур 480–800°C)



Рис. 10. Термостат технологический с тремя колодцами для загрузки образцов (рабочее вещество – калий, диапазон рабочих температур 350–650°C)



Рис. 11. Тепловая труба для химического реактора (рабочее вещество – калий, диапазон рабочих температур 550–600°C)

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИОФОБНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Особенностью лиофобных капиллярно-пористых систем (ЛКПС) является развитая поверхность раздела фаз и малый размер пор, что приводит к необ-

ходимости учитывать несколько различных эффектов (капиллярность, образование поверхностной энергии и др.). ЛКПС обладают ярко выраженной синергетичностью, т.е. их свойства определяются непосредственно не параметрами компонентов, а, в первую очередь, характером их взаимодействия [23].

Специфика лиофобных капиллярно-пористых систем заключается в том, что несмотря на практически несжимаемость составляющих компонентов они представляют собой системы, обладающие высокой сжимаемостью. При давлении, превышающем давление Лапласа, в начале заполнения пор изотермическая сжимаемость ЛКПС резко возрастает и ее величина становится на несколько порядков выше сжимаемости лиофобной жидкости ($k_T \sim 10^6 \text{ Па}^{-1}$ при $r \sim 1 \text{ мкм}$ и пористости 90%).

Традиционные вещества (газы, жидкости, твердые тела), в основном, обладают положительным температурным коэффициентом объемного расширения (ТКОР), т.е. расширяются при нагревании. Лиофобные системы обладают отрицательным ТКОР, по модулю в разы превышающим ТКОР традиционных веществ. Таким образом, в лиофобных системах наблюдается эффект так называемого температурного сжатия, т.е. с ростом температуры лиофобная система уменьшает свой объем.

При плавлении лиофобного рабочего вещества в матрице ЛКПС происходит значительное увеличение объема системы. Увеличение объема при плавлении, например, жидких металлов, составляет от -3 до $+6\%$, в то время как для ЛКПС в зависимости от пористости это значение может достигать 50%.

Лиофобные системы способны крайне эффективно обратимо накапливать и преобразовывать энергию за счет межфазного взаимодействия поверхности раздела капиллярно-пористой матрицы и лиофобной жидкости. Обратимый процесс образования межфазной поверхности является тепломеханическим, т.е. необходим одновременный подвод как тепловой, так и механической энергии [24].

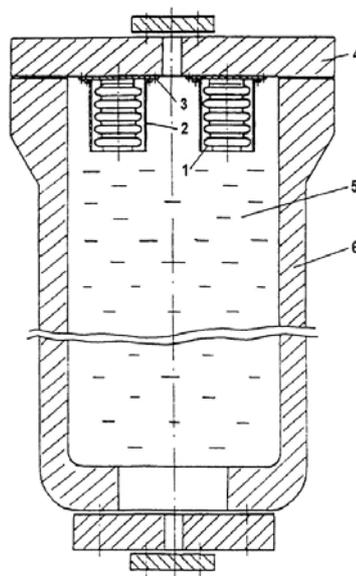


Рис. 12. Компенсатор давления герметичной емкости с жидкостью для повышения безопасности нагруженных давлением экологически опасных герметичных систем с жидкостью: 1 – сифон; 2 – направляющий перфорированный цилиндр; 3 – опорная плита; 4 – крышка герметичной емкости; 5 – жидкость; 6 – герметичная емкость

Уникальные физические и термодинамические свойства лиофобных систем позволяют рассматривать их как новый тип рабочего тела для создания ново-

го поколения энергетических установок и устройств различного функционального назначения [25–27]. Основными преимуществами энергетических устройств на основе ЛКПС перед традиционными являются высокие удельные характеристики, возможность работы в широком диапазоне температур, бесшумность, поскольку работа происходит без разрыва сплошности жидкости.

Особый интерес представляют пассивные защитные устройства различного функционального назначения: устройства аварийной остановки реактора (Патенты РФ №2096009, №2138086), демпферы пульсаций давления (Патент РФ №2084750), компенсаторы давления жидкости (Патент РФ №2187742). Один из патентов, в качестве иллюстрации, приведен на рис. 12.

Полученные данные по термодинамическим и теплофизическим характеристикам ЛКПС и предложения по их использованию для создания пассивных систем безопасности ЯЭУ были отмечены на уровне Росатома среди особых достижений за 2007 г. в области фундаментальных исследований по теплофизике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе многолетнего опыта разработок в области реакторных технологий в ГНЦ РФ-ФЭИ разработан ряд технологий, не связанных напрямую с применением в реакторных установках.

Обоснованы технологические процессы получения водорода, водяного пара, пресной воды, сингаза при прямым контактным жидкометаллическом подводе тепла к перерабатываемым средам. Выявлены преимущества «прямоконтактных» технологий по сравнению с технологиями, широко применяемыми на сегодняшний день в науке и технике.

Разработаны датчики на твердых электролитах для контроля водорода и кислорода в жидкометаллических теплоносителях (Pb, Bi, Na), а также в газовых контурах и производственных помещениях.

Разработаны технологии получения высокочистых галлия и кремния, нанотехнологии получения аэрогелей и оксидов, полифункциональных покрытий на пористых подложках.

Создан принципиально новый класс фильтрующих материалов, имеющих наноразмерную структуру и ряд важных технико-экономических преимуществ. На их основе возможно создание мембранных фильтров различной производительности и комплексных систем сорбционно-мембранной очистки. Такие системы позволят производить очистку из любого источника воды (река, озеро, болото, лужа и т.п.) до уровня питьевой, перерабатывать радиоактивные отходы, очищать технические масла турбин, трансформаторов, двигателей, гальванических растворов и многое другое.

Созданы и испытаны тепловые трубы, в том числе высокотемпературные с жидкометаллическими (натрий, калий, литий, цезий) и другими (вода, ацетон) теплоносителями, которые находят широкое применение в различных областях техники и промышленности.

С учетом свойств лиофобных капиллярно-пористых систем обоснованы технические решения для создания энергетических устройств нового поколения различного функционального назначения: аккумуляторы и преобразователи энергии, компенсаторы давления жидкости, демпферы, пассивные защитные устройства для тепловой, космической и атомной энергетике.

Результаты инновационных разработок на базе описанных в статье технологий ГНЦ РФ-ФЭИ защищены патентами, удостоены дипломов и медалей раз-

личного уровня специализированных выставок и форумов.

Литература

1. *Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И.* Тяжелые жидкометаллические теплоносители. – М.: ИздАт. – 2007.
2. *Рачков В.И., Тюрин А.В., Усанов В.И., Вошинин А.П.* Эффективность ядерной энерготехнологии. – М.: ЦНИИАИ. – 2008.
3. *Рачков В.И.* Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI веке. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – №6. – С. 2-4.
4. *Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др.* Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – №4. – С. 201-205.
5. *Адамов Е.О., Джаловян А.В., Лопаткин А.В. и др.* Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – №6. – С. 319-330.
6. *Ульянов В.В., Мартынов П.Н., Гулевский В.А. и др.* Исследование процессов и устройств водородной очистки применительно к циркуляционным контурам с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №2. – С. 33-38.
7. *Гулевский В.А., Орлов Ю.И., Ефанов А.Д. и др.* Гидродинамические проблемы технологии ТЖМТ в РУ петлевой и моноблочной конструкции // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – Вып. 4. – 2008. – С. 15-33.
8. *Zrodnikov A.V., Efanov A.D., Orlov Yu.I., Martynov P.N., Troyanov V.M., Rusanov A.E.* Heavy liquid metal coolant lead-bismuth and lead-technology // Atomic Energy. – 2004. – Vol. 97. – Issues 2. – pp. 534-537.
9. *Orlov Y.I., Martynov M.N., Gulevsky V.A., Efanov A.D., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V.* Hydrodynamic problems of heavy-liquid metal coolant technology in loop-type and monoblock-type reactor installation. // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237. Issues 15-17. P. 1829-1837.
10. *Martynov P.N., Gulevich A.V., Orlov Yu.I., Gulevsky V.A.* Water and Hydrogen in Heavy Liquid Metal Coolant Technology. // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 47. Issues 1-4. P. 604-615.
11. *Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyanov V.V.* Physical and chemical interactions of hydrogen and water with liquid lead and lead-bismuth. // Journal of physics: Conference Series. 2008. Vol. 98. P 072010.
12. *Ульянов В.В., Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Фомин А.С.* Применение теплоносителей Pb и Pb-Bi в новых технологиях переработки твердых, жидких и газообразных сред. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №4. – С. 102-109.
13. *Gulevich A.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyanov V.V.* Technologies for hydrogen production based on direct contact of gaseous hydrocarbons and evaporated water with molten Pb and Pb-Bi // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. Issue 5. pp. 1946-1950.
14. *Ефанов А.Д., Мартынов П.Н., Гулевский В.А., Ульянов В.В.* Производство водорода с использованием ядерной энергетической установки с жидкометаллическим охлаждением // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – №4. – С. 11-14.
15. *Мартынов П.Н., Лаврова О.В., Ульянов В.В., Посажеников А.М.* Тяжелые теплоносители в новых технологиях получения водорода // Новые промышленные технологии. – 2004. – №3. – С. 35-38.
16. *Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А., Проворов А.А.* Разработка электрохимического датчика капсульного типа для контроля кислорода в тяжелом теплоносителе // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – №5. – С. 360-366.
17. *Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Стороженко А.Н. и др.* Система контроля горючих и взрывоопасных газов на основе твердоэлектродных керамических чувствительных элементов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №4. – С. 33-38.
18. *Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Шелемetyев В.М. и др.* Капсульные твердоэлектро-

литные датчики для контроля кислорода в металлических расплавах и горючих газах в атмосфере // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №1. – С. 42-47.

19. *Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Юдинцев П.А., Ходан А.Н.* Жидкометаллическая технология синтеза наноструктурированных веществ. Их свойства и перспективы применения // Новые промышленные технологии. – 2008. – №4. – С. 48.

20. *Григорьев Г.В., Мартынов П.Н., Ягодкин И.В. и др.* Плазмохимическая технология получения наноструктурированных керамических мембран для фильтрации жидкостей и газов // Новые промышленные технологии. – 2004. – №3. – С. 44.

21. *Ивановский М.Н., Логинов Н.И.* Не только жидкие, но и парообразные // Сб. статей «Жидкие металлы: от первого теплофизического стенда к крупномасштабной атомной энергетике» / Под ред. А.Д. Ефанова, Ф.А. Козлова. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. – 2001. – С. 52-55.

22. *Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В.* Технологические основы тепловых труб. – М.: Атомиздат. – 1980.

23. *Сердунь Е.Н., Портяной А.Г., Сорокин А.П.* Лиофобные капиллярно-пористые системы и устройства на их основе. / XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров-2009», 29 сентября – 2 октября 2009 г. Труды конференции в 2-х т. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», – 2009. – Т. 2. – С. 177-181.

24. *Портяной А.Г., Сердунь Е.Н., Сорокин А.П., Портяной Г.А.* О некоторых свойствах лиофобных теплогидравлических аккумуляторов / Материалы II Международного совещания по использованию энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) в экологии, машиностроении, энергетике, транспорте и в космосе. – М.: ИМАШ РАН. – 2001. – С. 128-133.

25. *Сердунь Е.Н., Портяной А.Г., Сорокин А.П., Портяной Г.А.* О возможности разработки энергетических устройств на основе лиофобных капиллярно-пористых систем // Теплоэнергетика. – 2000. – №12. – С. 64-68.

26. *Вознесенский Р.М., Вьюнников Н.В., Корнилов В.П. и др.* Разработка пассивных защитных устройств аварийной защиты быстрых реакторов / Международная конференция «50 лет атомной энергетике перспективы на 50 лет», 27 июня – 2 июля 2004 г. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, Россия.

27. *Портяной А.Г., Мальцев В.Г., Портяной Г.А. и др.* Перспектива разработки космических энергетических устройств на основе лиофобной энерготехнологии / Материалы международной научно-технической конференции «Ядерная энергетика в космосе», 1-3 марта 2005 г., ФГУП «НИКИЭТ». – М.: ФГУП «НИКИЭТ». – 2005. – С. 32-33.

Поступила в редакцию 25.12.2013 г.

Авторы

Рачков Валерий Иванович, научный руководитель ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН.
E-mail: vrachkov@ipre.ru.

Мартынов Петр Никифорович, заместитель генерального директора – директор Института инновационных технологий (ИИТ), ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук, профессор.
E-mail: pmartinov@ipre.ru

Асхадуллин Радомир Шамильевич, заместитель директора, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.
E-mail: raskhadullin@ipre.ru

Григорьев Виталий Владимирович, научный сотрудник, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».
E-mail: vgrigorov@ipre.ru

Денисова Наталья Александровна, ведущий инженер, Институт ядерных реакторов и теплофизики (ИЯРиТ), ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

E-mail: vgrigorov@ippe.ru

Логинов Николай Иванович, главный научный сотрудник, ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: loginov@ippe.ru

Мельников Валерий Петрович, начальник отдела, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

E-mail: agolubev@ippe.ru

Михеев Александр Сергеевич, начальник лаборатории, ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

E-mail: mikheyev@ippe.ru

Портяной Анатолий Григорьевич, заместитель начальника отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: portyanou@ippe.ru

Сердунь Елена Николаевна, начальник отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: enserd@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора ИЯРиТ

ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: sorokin@ippe.ru

Стороженко Алексей Николаевич, начальник лаборатории, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: anstor@ippe.ru

Ульянов Владимир Владимирович, ведущий научный сотрудник, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: vulyanov@ippe.ru

Ягодкин Ягодкин Иван Васильевич, начальник лаборатории, ИИТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: ivya@ippe.ru

INNOVATIVE TECHNOLOGY DEVELOPED IN SSC RF-IPPE

Rachkov V.I., Martynov P.N., Askhadullin R.S., Grigorov V.V., Denisova N.A., Loginov N.I., Melnikov V.P., Mikheev A.S., Portjanov A.G., Serdun E.N., Sorokin A.P., Storozhenko A.N., Ulyanov V.V., Yagodkin I.V.

State Scientific Center of the Russian Federation Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

Results of researches and developments with the use of heavy liquid metal coolants (lead, lead-bismuth eutectic (an alloy of 44,5% Pb – 55,5% Bi), gallium) carried out in SSC RF IPPE in the field of direct-contact liquid metal technology for obtaining water vapour, sweet water, syngas and hydrogen, of liquid metal technology of nanostructured oxides and aerogels synthesis, of technology for plasma-chemical synthesis of multifunctional nanostructured coatings (membranes) on porous carriers of filter elements for potable waterpurification, recycling of technical liquids at a nuclear power station and nuclear industry factories (removal of radionuclides from water), in chemical enterprises (purification of industrial waste water), galvanic works (purification and partial restoration of electrolytes), in mineral resource industry (for isolating such valuable impurities as gold, nickel, silver, etc. from solutions), in iron and steel industry (for purification of circulating water from mechanical impurities) are presented. The results of developments in the area of liquid metal heat pipes, including those designed for making a chemical reactor to convert hydrocarbon feedstock into a mix of aromatic hydrocarbons, the results of the researches carried out on scientific and technical basis for lyophobic capillary-porous systems energy technology and development of devices with their use (accumulators and energy converters, liquid pressurizers, dampers, passive accident protection devices for thermal, space and atomic engineering) are stated. The description of the monitoring systems developed for monitoring oxygen and hydrogen content in gas and liquid media, including those ones developed for early detection and control of combustible and explosive gases is presented.

Key words: innovative technology, liquid metal coolants, lead, gallium, sodium, water vapour, sweet water, syngas, hydrogen, direct-contact technology, nanostructured oxides and aerogels, plasma chemical synthesis of multifunctional nanostructured coating, heat pipes, lyophobic capillary-porous systems, atomic industry, chemical manufacture, metallurgy.

REFERENCES

1. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. *Tyazhoilye zhidkometallicheskie teplonositeli* [Heavy liquid metal coolant]. Moskow, IzdAt Publ. 2007.
2. Rachkov V.I., Tyurin A.V., Usanov V.I., Voshchinin A.P. *Effektivnost' yadernoj energotekhnologii* [Efficiency of nuclear power technology]. Moskow, CNIIATOMINFORM Publ. 2008.
3. Rachkov V.I. Atomnaya energetika kak vazhnejshij faktor ustojchivogo razvitiya Rossii v XXI veke. [Nuclear energy as an important factor for sustainable development of Russia in XXI century]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2006, no. 6. pp. 2–4.
4. Rachkov V.I., Poplavskij V.M. Tsubulya A.M. e.a. *Koncepciya perspektivnogo*

energobloka s bystrym natrievym reaktorom BN-1200 [Concept of prospective of power unit with fast neutron reactor BN-1200]. *Atomnaya energiya*. 2010. vol. 108, no. 4, pp. 201–205.

5. Adamov E.O., Dzhlovyan A.V., Lopatkin A.V. e.a. Konceptual'nye polozheniya strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii v perspektive do 2100 g. [Conceptual Development Strategy of Russian nuclear power in the run up to 2100]. *Atomnaya energiya*. 2012, vol. 112, no. 6, pp. 319–330.

6. Ul'yanov V.V., Martynov P.N, Gulevskij V.A. e.a. Issledovanie processov i ustrojstv vodorodnoj ochistki primenitel'no k cirkulyacionnym konturam s tyazhelymi zhidkometallicheskimy teplonositelyami [Research processes and devices for hydrogen purification applied to the circulation loop with the heavy liquid metal coolants]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2013, no. 2, pp. 33–38.

7. Gulevskij V.A., Orlov Yu.I., Efanov A.D. e.a. Gidrodinamicheskie problemy tehnologii TZhMT v RU petlevoj i monoblochnoj konstrukcii [Hydrodynamic problems liquid heavy metal technology applied to loop reactor system and monobloc]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Ser. *Fizika yadernyh reaktorov*. 2008, no. 4. pp. 1533.

8. Zrodnikov A.V., Efanov A.D., Orlov Yu.I., Martynov P.N., Troyanov V.M., Rusanov A.E. Heavy liquid metal coolant lead-bismuth and lead technology. *Atomic Energy*. 2004, vol. 97, no. 2, pp. 534-537.

9. Orlov Y.I. Martynov M.N., Gulevsky V.A., Efanov A.D., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V. Hydrodynamic problems of heavy-liquid metal coolant technology in loop-type and monoblock-type reactor installation. *Nuclear Engineering and Design*. 2007, vol. 237, iss. 1517, pp. 1829–1837.

10. Martynov P.N., Gulevich A.V., Orlov Yu.I., Gulevsky V.A. Water and Hydrogen in Heavy Liquid Metal Coolant Technology. *Progress in Nuclear Energy*. 2005, vol. 47, iss. 14, pp. 604–615.

11. Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyanov V.V. Physical and chemical interactions of hydrogen and water with liquid lead and lead-bismuth. *Journal of physics: Conference Series*. 2008. vol. 98, paper 072010.

12. Ul'yanov V.V., Gulevskij V.A., Martynov P.N, Fomin A.S. Primenenie teplonositelej Pb i Pb-Bi v novyh tehnologiyah pererabotki tverdyh, zhidkih i gazoobraznyh sred [Application Pb and Pb-Bi coolants in the new technologies of processing of solid, liquid and gaseous media]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012, no. 4, pp. 102–109.

13. Gulevich A.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyanov V.V. Technologies for hydrogen production based on direct contact of gaseous hydrocarbons and evaporated water with molten Pb and Pb-Bi. *Energy Conversion and Management*. 2008, vol. 49, iss. 5, pp. 1946-1950.

14. Efanov A.D., Martynov P.N., Gulevskij V.A., Ul'yanov V.V. Proizvodstvo vodoroda s ispol'zovaniem yadernoj energeticheskoj ustanovki s zhidkometallicheskim ohlazhdeniem [Hydrogen production using nuclear power plant with liquid cooling]. *Nauka i tehnologii v promyshlennosti*. 2006, no. 4, pp. 11–14.

15. Martynov P.N., Lavrova O.V., Ul'yanov V.V., Posazhennikov A.M. Tyazhelye teplonositeli v novyh tehnologiyah polucheniya vodoroda [Heavy coolants in new technologies for producing hydrogen]. *Novye promyshlennye tehnologii*. 2004, no. 3, pp. 35–38.

16. Martynov P.N., Chernov M.E., Gulevskij V.A., Provorov A.A. Razrabotka elektrohimicheskogo datchika kapsul'nogo tipa dlya kontrolya kisloroda v tyazhyolom teplonositele [Development of an electrochemical sensor capsule for oxygen control in heavy coolant]. *Atomnaya energiya*. 2005, vol. 98, no. 5, pp. 360-366.

17. Martynov P.N., Chernov M.E., Storozhenko A.N. e.a. Sistema kontrolya goryuchih i vzryvoopasnyh gazov na osnove tverdoelektrolitnyh keramicheskikh chuvstvitel'nyh elementov [Control system flammable or explosive gases, based on solid electrolyte ceramic

- sensing elements]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 4, pp. 33–38.
18. Martynov P.N., Chernov M.E., Shelemt'ev V.M. e.a. Kapsul'nye tverdoelektrolitnye datchiki dlya kontrolya kisloroda v metallicheskih rasplavah i goryuchih gazov v atmosfere [Capsule solid electrolyte sensors for monitoring oxygen in metal melts and combustible gases in the atmosphere]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2007, no. 1, pp. 42–47.
19. Martynov P.N., Ashadullin R.Sh., Yudincev P.A., Hodan A.N. Zhidkometallicheskaya tehnologiya sinteza nanostrukturirovannyh veshchestv. Ih svoystva i perspektivy primeneniya [Liquid metal technology of synthesis of nanostructured materials. Their properties and application prospects]. *Novye promyshlennye tehnologii*. 2008, no. 4, pp. 48–52.
20. Grigor'ev G.V., Martynov P.N., Yagodkin I.V. e.a. Plazmohimicheskaya tehnologiya polucheniya nanostrukturirovannyh keramicheskikh membran dlya fil'tracii zhidkostej i gazov [Plasma-chemical technology for producing nanostructured ceramic membranes for filtration of liquids and gases]. *Novye promyshlennye tehnologii*. 2004, no. 3, pp. 4449.
21. Ivanovskij M.N., Loginov N.I. Ne tol'ko zhidkie, no i paroobraznye [Not only liquid but also vaporous]. Sb. statej «Zhidkie metally: ot pervogo teplofizicheskogo stenda k krupnomasshtabnoj atomnoj energetike» [Collection of articles «Liquid metals: from the first stand to teplofizicheskogo large-scale nuclear energy»]. Obninsk, SSC RF-IPPE. 2001, pp. 52–55. (in Russian)
22. Ivanovskij M.N., Sorokin V.P., Chulkov B.A., Yagodkin I.V. *Tehnologicheskie osnovy teplovyh trub* [Technological bases of heat pipes]. Moscow, Atomizdat Publ. 1980.
23. Serdun' E.N., Portyanov A.G., Sorokin A.P. Liofobnye kapillyarno-poristyje sistemy i ustrojstva na ih osnove [Lyophobic capillary-porous systems and devices based on them]. XI Mezhdunarodnaya konferenciya «Bezopasnost' AES i podgotovka kadrov-2009», [XI International Conference «NPP Safety and Training 2009»]. 29 sept. 2 oct. 2009. Proc. of the Conf., vol. 12. Obninsk, NOU «CIPK», 2009. vol. 2, pp. 177–181. (in Russian)
24. Portyanov A.G., Serdun' E.N., Sorokin A.P., Portyanov G.A. O nekotoryh svoystvah liofobnyh teplogidravlicheskih akkumulyatorov [On some properties of thermal-hydraulic accumulators lyophobic]. Materialy II Mezhdunarodnogo soveshchaniya po ispol'zovaniyu energoakkumuliruyushchih veshchestv v ekologii, mashinostroenii, energetike, transporte i v kosmose. [Proceedings of the II International Meeting on the use of energy storage materials in the ecology engineering, energy, transport and space.]. Moscow, IMASH RAN. 2001, pp. 128–133. (in Russian)
25. Serdun' E.N., Portyanov A.G., Sorokin A.P., Portyanov G.A. O vozmozhnosti razrabotki energeticheskikh ustrojstv na osnove liofobnyh kapillyarno-poristykh sistem [On the possibility of the development of energy-based devices lyophobic capillary-porous systems]. *Teploenergetika*. 2000, no. 12, pp. 64–68.
26. Voznesenskij R.M., V'yunnikov N.V., Kornilov V.P. e.a. Razrabotka passivnyh zashchitnyh ustrojstv avarijnoj zashchity bystryh reaktorov [Development of passive safety devices of emergency protection of fast reactors]. Mezhdunarodnaya konferenciya «50 let atomnoj energetiki perspektivy na 50 let» [International Conference «50 Years of Nuclear Energy Prospects for 50 years»], 27 june 2 july 2004. Obninsk, SSC RF-IPPE, Rossiya. (in Russian)
27. Portyanov A.G., Mal'cev V.G., Portyanov G.A. e.a. Perspektiva razrabotki kosmicheskikh energeticheskikh ustrojstv na osnove liofobnoj energotehnologii [The prospect of the development of space-based power devices lyophobic energy technologies]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Yadernaya energetika v kosmose» [Proceedings of International Scientific and Technical Conference «Nuclear Power in Space»], 13 march 2005. FGUP «NIKIET». Moscow, FGUP «NIKIET». 2005, pp. 32–33. (in Russian)

Authors

Rackov Valery Ivanovich, Research Supervisor of the State Scientific Center of the Russian Federation Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Science.
E-mail: vrachkov@ippe.ru

Martynov Pyotr Nikiforovich, Deputy Director, General Director of The Institute of Innovative Technologies (IIT), FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering), Professor.
E-mail: pmartinov@ippe.ru

Askhadullin Radomir Shamil'evich, Deputy Director, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: raskhadullin@ippe.ru

Grigorov Vitalij Vladimirovich, Research Associate, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: vgrigorov@ippe.ru

Denisova Natalia Alexandrovna, Leading Engineer, Institute for Nuclear Reactors and Thermal Physics (INR&T), FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: ndenisova@ippe.ru

Loginov Nikolaj Ivanovich, Main Research, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering).
E-mail: loginov@ippe.ru

Mel'nikov Valery Petrovich, Head of Department, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: agolubev@ippe.ru

Mikheev Alexandr Sergeevich, Head of Laboratory, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE».
E-mail: mikheyev@ippe.ru

Portyanov Anatolij Grigor'evich, Deputy Head of Department, IST, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: portyanov@ippe.ru

Serdun' Elena Nikolaevna, Head of Department, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: enserd@ippe.ru

Sorokin Alexandr Pavlovich, Deputy Director, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering).
E-mail: sorokin@ippe.ru.

Storozhenko Aleksej Nikolaevich, Head of Laboratory, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: anstor@ippe.ru

Ul'yanov Vladimir Vladimirovich, Leading Researcher, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: vulyanov@ippe.ru

Yagodkin Ivan Vasilievich, Head of laboratory, IIT, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).
E-mail: ivya@ippe.ru