© В.Н. Фатеев, В.И. Порембский, С.А. Григорьев, И.Е. Баранов, С.В. Островский, С.В. Коробцев, В.П. Денисенко, И.И. Николаев, И.А. Кириллов, С.А. Демкин, Р.В. Смирнов
(cc) BY

УДК 620.93 **DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-2-128-148**

РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НАЦИОНАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЦЕНТРЕ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

В.Н. Фатеев, В.И. Порембский, С.А. Григорьев, И.Е. Баранов, С.В. Островский, С.В. Коробцев, В.П. Денисенко, И.И. Николаев, И.А. Кириллов, С.А. Демкин, Р.В. Смирнов

Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия
iv3000@mail.ru

Резюме: *В данной публикации представлен краткий обзор материалов разработок по перспективным направлениям водородной энергетики и водородным технологиям, выполненных учеными и специалистами в Национальном исследовательском центре «Курчатовский Институт», в частности:*

- плазменных, плазмохимических, пучковых технологии, технологии водородной энергетики для обеспечения экологической безопасности и защиты окружающей среды, включая:

– методы и технологии на основе плазмохимических процессов для переработки и синтеза органических соединений, моделирование плазменных и плазмохимических процессов,

– разработки плазменно-расплавной технологий газификации твёрдого органического сырья,

– разработки плазмотронного комплекса переработки отходов;

– элементы водородной (атомно-водородной) энергетики, в том числе – плазменные, обеспечивающие повышение энергетической эффективности и экологическую безопасность в энергетике (в том числе – возобновляемой) на транспорте;

– плазмо-каталитических систем конверсии органических топлив;

– топливных элементов и электролизеров с твердым полимерным электролитом;

– мембранных и мембранно-каталитических систем получения и очистки водорода;

– наноструктурных электрокатализаторов;

– обеспечения водородной безопасности.

Курчатовский институт является основоположником и безусловным лидером и координатором исследований и разработок в нашей стране по ряду ключевых направлений водородной энергетики.

Ключевые слова*: водородная энергетика; водородная безопасность; плазмохимия; топливные элементы;электролиз.*

Для цитирования: Фатеев В.Н., Порембский В.И., С.А.Григорьев, Баранов И.Е., Островский С.А., Коробцев С.В., Денисенко В.П., Николаев И.И., Кириллов И.А., Демкин С.А. Разработки и исследования водородных энергетических систем в Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский институт» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С.128-148. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-128-148.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HYDROGEN ENERGY SYSTEMS AT THE NATIONAL RESEARCH CENTER "KURCHATOV INSTITUTE»

VN. Fateev, VI. Porembsky, SA. Grigoriev, IE. Baranov, SV. Ostrovsky, SV. Korobtsev, VP. Denisenko, II. Nikolaev, IA. Kirillov, SA. Demkin, RV. Smirnov

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

Abstract: *This publication provides a brief overview of the materials of developments in*

promising areas of hydrogen energy and hydrogen technologies carried out by scientists and specialists at the National Research Center "Kurchatov Institute", in particular: - plasma, plasma-chemical, beam technologies, hydrogen energy technologies to ensure environmental safety and environmental protection, including:

• methods and technologies based on plasma-chemical processes for the processing and synthesis of organic compounds, modeling of plasma and plasma-chemical processes;

• development of plasma-melt technologies for gasification of solid organic raw materials, • development of a plasmatron complex for waste processing;

• elements of hydrogen (atomic-hydrogen) energy, including plasma ones, which ensure an increase in energy efficiency and environmental safety in energy (including renewable energy) in transport; • plasma catalytic systems for the conversion of organic fuels;

• fuel cells and electrolytic cells with solid polymer electrolyte; • membrane and membrane catalytic systems for hydrogen production and purification;

• nanostructured electrocatalysts;

• ensuring hydrogen safety.

The Kurchatov Institute is the founder and undisputed leader and coordinator of research and development in our country in a number of key areas of hydrogen energy.

Keywords:. *hydrogen energy, hydrogen safety, plasma chemistry, fuel cells, electrolysis.*

For citation: Fateev VI, Porembsky SA, Grigorev IE, Baranov SA, Ostrovsky SV, Korobtsev VP, Denisenko VN, Nikolaev II, Kirillov IA, Demkin SA, Smirnov RV. Research and development of hydrogen energy systems at the National Research Center «Kurchatov Institute». *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2):128-148. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-128-148.

Введение

Актуальность вопросов водородной энергетики как научных основ природоподобных технологий обусловлена общепризнанной необходимостью перехода к экологически чистой энергетике, где экологически чистый энергоноситель – водород – должен занять особое место[1-3]. Высокая энергоемкость водорода и возможность реализации энергоустановок на его основе с КПД более 60% наравне с высокой экологической чистотой являются основными факторами, определяющими интенсивность развития данного направления. Исследования и разработки в этой области ведутся в подавляющем большинстве стран, но особое внимание им в последние годы уделялось в Европе, США, Японии, Китае и других индустриально развитых странах с высоким уровнем научно-исследовательского потенциала.

СССР был одним из лидеров в области водородной энергетики, но возникшие проблемы экономического характера затормозили развитие работ в данной области. Однако в последнее время ситуация изменилась. По поручению Правительства Министерство энергетики Российской Федерации готовит программу работ в области водородной энергетики в с привлечением ведущих ученых и специалистов. Существенный интерес к данному направлению проявляют такие крупнейшие компании РФ, как ГК «Росатом», ПАО «Газпром», ПАО «РусГидро» и другие. При этом развитие работ по водородной энергетике предусматривает тесное сотрудничество с зарубежными компаниями и научно-исследовательскими организациями. НИЦ «Курчатовский институт» (далее *Центр*) является координатором работ по широкому ряду направлений водородной энергетики, его партнеры – институты РАН, Ядерные центры РФ, ВУЗы, участники международных исследовательских программ.

В Курчатовском институте в 1978 года было создано специальное подразделение - Институт водородной энергетики и плазменных технологий**.** Начиная с этого времени Курчатовский институт является основоположником и безусловным лидером и координатором исследований и разработок в нашей стране по ряду ключевых направлений водородной энергетики, в частности:

- плазменных, плазмохимических, пучковых технологии, технологии водородной энергетики для обеспечения экологической безопасности и защиты окружающей среды, включая:

• методы и технологии на основе плазмохимических процессов для переработки и синтеза органических соединений, моделирование плазменных и плазмохимических процессов,

• разработки плазменно-расплавной технологий газификации твёрдого органического сырья,

• разработки плазмотронного комплекса переработки отходов;

• элементы водородной (атомно-водородной) энергетики, в том числе – плазменные, обеспечивающие повышение энергетической эффективности и экологическую безопасность в энергетике (в том числе – возобновляемой) на транспорте;

• плазмо-каталитических систем конверсии органических топлив;

• топливных элементов и электролизеров с твердым полимерным электролитом;

• мембранных и мембранно-каталитических систем получения и очистки водорода;

• наноструктурных электрокатализаторов;

• обеспечения водородной безопасности.

В данной публикации представлен краткий обзор материалов разработок по перспективным направлениям водородной энергетики и водородным технологиям, выполненных учеными и специалистами Центра.

Плазменные и плазменно-каталитические технологии переработки углеводородов с получением водорода

Плазменные и плазменно-каталитические технологии переработки углеводородов с получением водорода включают:

- Окислительная конверсия (парциальное окисление) природного газа и других углеводородов. Плазменно-каталитическая технология производства водорода в процессах окислительной конверсии природного газа и других углеводородов.

- Окислительная конверсия (паровая и углекислотная конверсия) природного газа. Плазменно-мембранная технология получения водорода и синтез газа в процессах парового и углекислотного риформинга природного газа.

- Пиролиз природного газа (метана). Плазменно-каталитическая технология пиролиза природного газа для производства водорода в составе атомно-водородного комплекса на основе ВТГР или солнечной энергетической установки.

Использование эндотермического процесса разложения природного газа на водород и углерод представляет большой интерес для крупнотоннажного производства водорода за счёт тепловой энергии от таких источников как высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы (ВГТР) [4-6] или гелиотермальные системы. Процесс обеспечивает высокую (близкую 100%) степень конверсии углеводородов уже при сравнительно невысоких рабочих температурах (600°C – 1000°C) и позволяет получать водород фактически в одну стадию. Кроме того, в этом случае значительно легче предотвратить поступление парниковых газов в атмосферу, поскольку образующийся при пиролизе углерод не только проще выделить и захоронить по сравнению с углекислым газом, получающимся в процессах конверсии, но и можно эффективно использовать при производстве новых материалов.

На практике реализации глубокого разложения исходного сырья и достижению высокого выхода целевого продукта при температурах в интересующем нас диапазоне препятствуют кинетические ограничения. При этом в отличие от парового риформинга или парокислородной конверсии[7], использование для ускорения процесса традиционного гетерогенного катализатора в условиях интенсивного образования углерода оказывается невозможным. Для преодоления указанной проблемы в конце 1990-х и 2000-х годах в Центре выполнялся цикл пионерских исследований, в результате которых было установлено, что ускорение процесса термического разложения, как метана, так и других углеводородов, входящих в состав природного газа, можно эффективно осуществить в плазме микроволновых разрядов.[8-12] Образующиеся в газе под воздействием плазмы заряженные углеродные кластеры служат активными центрами для осуществления процессов пиролиза и образования частиц углерода большего размера. Наиболее важным обстоятельством при этом является тот факт, что разложение метана идёт почти целиком за счёт тепловой энергии нагретого газа. Расход плазменной энергии относительно невелик. Плазма выступает в роли, сходной с ролью традиционного катализатора (эффект плазменного катализа), не обладая при этом такими его недостатками, как науглероживание поверхности, отравление и механический износ.

К настоящему времени по тематике плазменная конверсия углеводородных топлив в синтез-газ были разработаны несколько демонстрационных образцов, в частности был создан 6 кВт плазменный риформер жидкого моторного топлива в синтез-газ на основе плазмотрона со стационарным СВЧ-разрядом факельного типа со следующими характеристиками: производительность – до 20 м^3 синтез-газа в час; содержание синтез газа

в продуктах процесса в объемных процентах – до 43; диапазон расходов реагентов: до 7,2 кг керосина в час; до 40 м^3 воздуха в час.

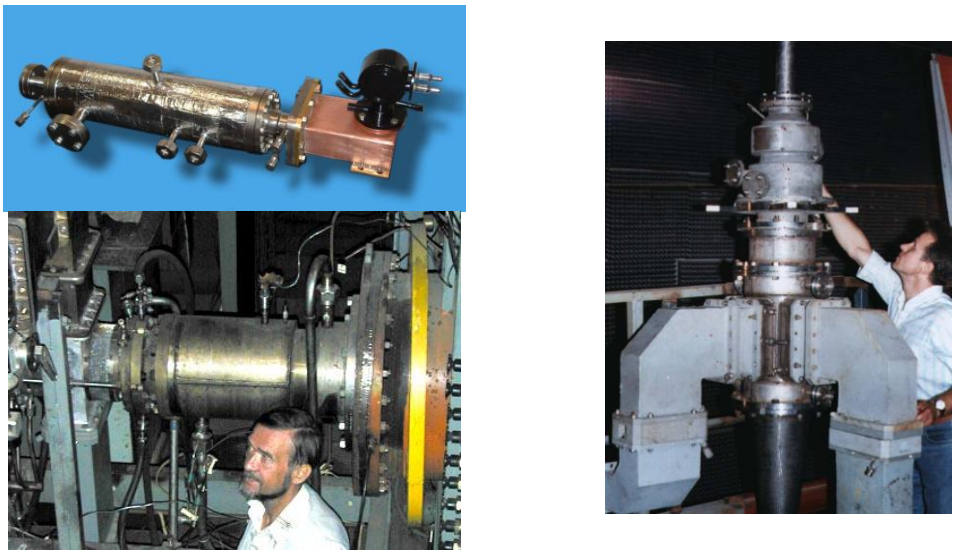


Рис. 1. СВЧ-плазмотроны различной мощности для переработки углеводородов

Fig. 1. Microwave plasma torches of various capacities for hydrocarbon processing

Создан демонстрационный плазменный риформер метана в синтез-газ. Плазмотрон основан на разряде типа «Микроволновая свеча» и конструктивно совмещен с рекуператором тепловой энергии. Проведены ресурсные испытания стабильности работы риформера.

Рис. 2. Фотографии демонстрационного образца плазменного риформера метана

Fig. 2. Photos of a demonstration sample of a methane plasma reformer

Основные параметры демонстрационного образца (рис. 2): производительность по синтез-газу 2,4 – 7 м^3 синтез-газа в час;содержание синтез-газа в продуктах процесса в объемных процентах: водород – 30%; оксид углерода – 15 %;время запуска из дежурного режима 10 сек, время запуска из режима хранения 1 минута; потребление электроэнергии от сети (220В; 50 Гц) 700 - 1100 Вт; диапазон расходов реагентов: 0,55 – 3,4 м^3 метана в час; 1,6 – 9,65 м^3 воздуха в час.

Технико-экономическое сравнение традиционного каталитического метода [7] и плазменно-каталитического подхода [8-12] показало, что последний имеет преимущества в указанном диапазоне расходов.

Плазменно-мембранная технология получения водорода из сероводорода

Плазменно-мембранная технология получения водорода из сероводорода состоит в получении водорода в процессе плазмохимической диссоциации сероводорода.

Используемая в настоящее время технология переработки сероводорода, основанная на методе Клауса, конвертирует *H2S* в серу и воду, т.е. фактически сводится к его неполному сжиганию. Новая (базовая) плазменно-мембранная технология, разработанная в Центре, позволяет переработать сероводород с получением в качестве товарного продукта не только серы, но и водорода, ценного энергетического и химического сырья, который в свою очередь может быть использован, в частности, для гидроочистки сырой нефти и нефтепродуктов от серы. В неравновесной плазме происходит эффективное разложение сероводорода на водород и серу. При необходимости, разделение газовых потоков может

быть произведено с использованием мембранного оборудования. Плазменный процесс разложения H2S вначале был всесторонне исследован на уровне НИР как экспериментально, так и теоретически в целом ряде разрядов (микроволновом, радиочастотном, низкочастотном и дуговом) в широком диапазоне плазменных параметров. Опытная установка с производительностью 50 м^3 сероводорода в час была испытана на Дрогобычском нефтеперерабатывающем заводе. Затем, было осуществлено масштабирование как собственно процесса плазменной диссоциации сероводорода, так и всех ключевых стадий (сбор серы, мембранное выделение водорода, финишная очистка водорода), входящих в состав технологии, вплоть до уровня мощности 1 МВт, что соответствует переработке 1000 нм^3/ч H2S (опытно-технологический цех на Оренбургском газоперерабатывающем заводе – ОГПЗ).

Плазменная переработка отходов

Плазменная переработка отходов заключается в получении водорода в процессе газификации углеродсодержащего топлива (сырья). Плазменно-расплавная технология переработки в водород твердого и жидкого углеродсодержащего сырья, в том числе промышленных и бытовых отходов (Рис. 3-4).

Основные стадии процесса плазменной переработки отходов: пиролиз углеводородов с образованием водорода; растворение углерода в расплаве; химическое растворение кислорода в расплаве; восстановление оксидов металла углеродом с образованием CO[13,14].

Достоинства: высокая удельная производительность; возможность производства чистого синтез газа/водородасвязывание серы и других вредных веществ; отсутствие проблем с твердым остатком; переработка любых углеводородных отходов.

Рис. 3. Установка по плазменно-расплавной переработке отходов и отбор пробы металла из расплава

Fig. 3. Plasma-melt waste treatment plant and metal sampling from the melt

Рис. 4. Проект мобильного варианта плазменной установки производительностью до 100 кг/ч

Fig. 4. Design of a mobile version of a plasma plant with a capacity of up to 100 kg / h

Созданы основы технологий получения химической продукции при переработке (газификации) различных типов углеродсодержащего сырья (техногенные отходы, промышленные и попутные газы, нефтяные отходы, гудроны, мазут, угольные отходы и т.д.). Получаемый синтез-газ может быть конвертирован в различные химические продукты, в том числе моторные топлива, ценные концентраты ароматических

углеводородов, метанол. Лабораторная установка получения синтез-газа с использованием расплава металла имеет производительность по исходному сырью до 0,5 кг/час (в угольном эквиваленте). Разработан проект ТЗ на опытный образец блока газификации углеродсодержащего сырья на основе расплава железа производительностью по исходному сырью - до 360 кг/час (в угольном эквиваленте). Выход производимого синтез газа до 1000 м3/час.

Двухстадийный углекислотный цикл производства водорода

Двухстадийный углекислотный цикл производства водорода включает плазменно-мембранную технологию получения водорода из воды.

Основы теории процесса диссоциации диоксида углерода

$$CO2 \rightarrow CO + ½\ O2 \qquad \Delta H = 2.9\ eV/mol. \qquad (1)$$

в неравновесном разряде были разработаны НИЦ «Курчатовский институт».

С помощью содержащегося в плазме монооксида углерода можно получить водород, без затрат дополнительной энергии, путём традиционного каталитического процесса - реакции термокаталитического сдвига:

$$CO + H2O \rightarrow CO2 + H2 \qquad \Delta H = -0.4\ eV/mol. \qquad (2)$$

Комбинация реакций (1) и (2) вместе с рециркуляцией CO2 приводит к двухступенчатому циклу выделения водорода из воды, что представляет особый интерес в концепции атомно-водородной энергетики. Эта концепция предполагает, в том числе использование дешёвой электроэнергии в провальные (ночные) часы.

Процесс диссоциации диоксида углерода в СВЧ-разряде изучался как в лабораторных установках (f = 2,45 ГГц, W = 1 - 2 кВт), так и в крупномасштабных демонстрационных установках (f = 0,9 ГГц, мощность W до 50 - 100 кВт).

Наивысшая энергетическая эффективность диссоциации CO2 была продемонстрирована специалистами Центра в неравновесной микроволновой плазме при умеренных давлениях 50-200 Торр. При реализации процесса в дозвуковом потоке энергетическая эффективность достигала 80%; а в сверхзвуковом потоке газа эффективность использования энергии достигала 90 %.

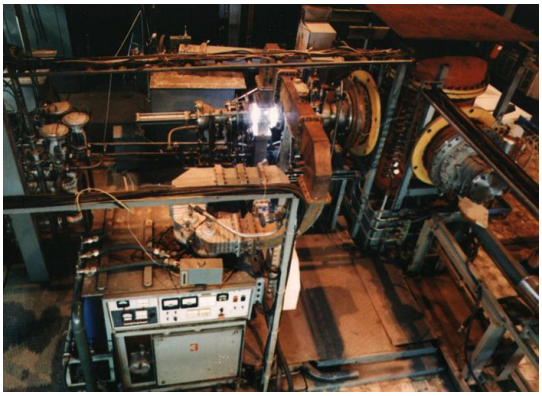


Рис. 5. Эксперименты подиссоциации CO2 проводилимые на СВЧ-установке (СВЧ мощность до 100 кВт)

Fig. 5. Experiments of CO2 subissociation were carried out on a microwave installation (MICROWAVE power up to 100 kW)

Хранение водорода в микрокапиллярах

Хранение газообразного водорода под давлением с рекордными весовыми и объемными характеристиками. Технология хранения водорода при высоких давлениях в капиллярных емкостях из высокопрочных сортов стекла и кварца, которая является практической альтернативой баллонам из стали и композитных материалов для хранения водорода и других газов. Мультикапиллярные системы хранения, способные безопасно хранить сжатый водород с весовым и объёмным содержанием водорода не менее 15% и 45 г/л и метана – не менее 60% и 300 г/л соответственно.

В Центре разработана технология и созданы экспериментальные образцы системы хранения газов (водорода) при сверхвысоких давлениях с рекордным удельным объемным и весовым содержанием газа по сравнению с существующими технологиями [15-17]. К настоящему времени достигнуты следующие параметры образцов:

- весовое содержание водорода в капиллярах - 12%;
- объемное содержание водорода в капиллярах – 65 г/л;
- внутреннее давление водорода в капилляре – до 2400 атм.

Капиллярные емкости из высокопрочных сортов стекла и кварца являются практической альтернативой баллонам из стали и композитных материалов для хранения водорода высокого давления, в особенности при их умеренном охлаждении.

Преимущества капиллярных емкостей обусловлены тем, что:

- в тонких капиллярах прочность стекла приближается к теоретической, которая в несколько раз выше прочности стали;
- стекло химически инертно по отношению к водороду;
- объем хранящегося водорода может быть разбит на множество мелких объемов, соответствующее числу капилляров в системе, что уменьшает вероятность мгновенного выброса большого количества газа при аварийном разрушении части емкости и тем самым делает хранение газа более безопасным;
- при понижении температуры прочность стекла и плотность водорода (при заданном давлении) растут, а проницаемость стенок для водорода падает, что способствует ещё более эффективному хранению водорода.

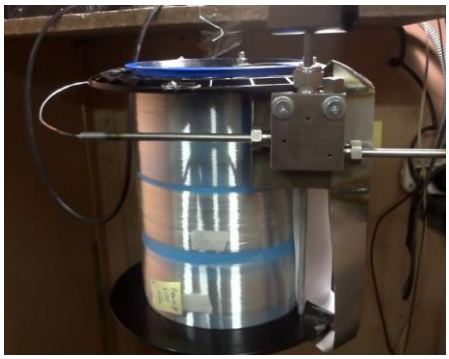


Рис. 6. Капиллярный модуль на испытательном стенде
Fig. 6. Capillary module on the test bench

Применение данной технологии возможно в экологически чистых транспортных средствах, мобильной электронике, беспилотных летательных аппаратах, автономных системах жизнеобеспечения, а также при транспортировки водорода на большие расстояния.

Применение данных систем для хранения топливных газов в наземном и водном транспорте позволит снизить его вредное воздействие на окружающую среду. Может быть повышен пробег автомобилей без дозаправки топливом при объёмах и весе газообразного топлива, сравнимых с таковыми для традиционного топлива (бензина, дизельного топлива). Их использование, вместе с топливными элементами, в мобильной электронике, малых беспилотных летательных аппаратах позволит в несколько раз увеличить время их полёта без подзарядки по сравнению с традиционными литий-ионными батареями.

Водородная безопасность

Работы по водородной безопасности включают разработку пассивных каталитических рекомбинаторов водорода, экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование норм и правил водородной безопасности [18-29].

Для того чтобы сформировать и развивать водородную энергетику в качестве технологически эффективной и конкурентоспособной части будущего без- или мало-углеродного экономического уклада, необходимо преодолеть большое число препятствий, связанных не только со зрелостью и доступностью технологий, их экономической эффективностью, но и с планируемым (целевым) уровнем безопасности водородной энергетики [18-29].

Даже при решении большинства технологических и экономических проблем, скорость промышленного и коммерческого освоения научно-технических разработок в области водородной энергетики может лимитироваться:

- уровнем комплексного обеспечения безопасности технологических систем, объектов и сетей водородной энергетики на всем жизненном цикле (от проектирования до вывода из эксплуатации);
- качеством и уровнем норм и стандартов как для самих водородных технологий и технических систем, так и для систем безопасности.

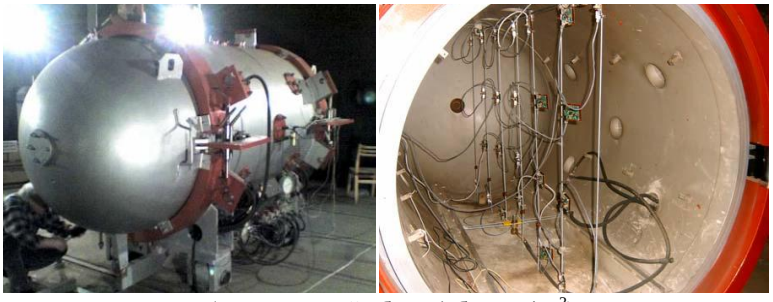
В конце 1980-х – начале 1990-ых годах были проведены исследования и разработки, направленные на обеспечение водородной взрывобезопасности защитных оболочек АЭС с

ВВЭР в условиях тяжелой (запроектной) аварии. В Центре были предложены следующие инновации для контролируемой беспламенной рекомбинации водорода:

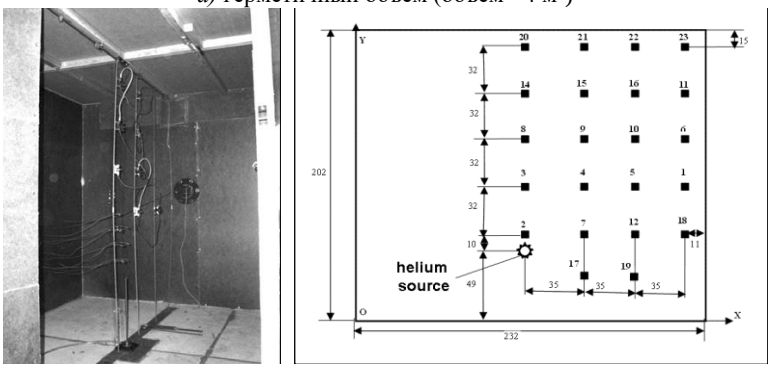
- высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) в качестве носителя катализатора для рекомбинаторов водорода на основе «каминного эффекта»;
- магнетронное напыление катализаторов на поверхность ВПЯМ.

Для обоснования и уточнения норм и правил водородной пожаро- и взрывобезопасности исследовались:

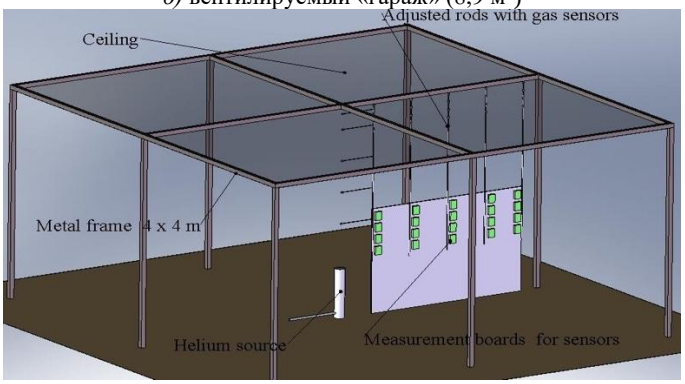
- феноменология и количественные характеристики струйных и шлейфовых истечений водорода в замкнутое и полуограниченное пространство;
- влияние химически активных добавок (моноксид углерода, озон, перекись водорода) на чувствительность к детонации паро-водородо-воздушных смесей в условиях тяжелой аварии на АЭС;
- особенности формирования детонационных волн на градиенте периода индукции (механизм Зельдовича).



а) герметичный объем (объем - 4 м^3)



б) вентилируемый «гараж» (8,9 м^3)



в) «навес» (объем - 33,8 м3, площадь «потолка» - 4,4 м^2)

Рис.7. Стенды для исследования струйного и шлейфового истечения водорода в замкнутое (а и б) и полуограниченное пространство (в)

Fig. 7. Stands for studying the jet and plume outflow of hydrogen into a closed (a and b) and semi-bounded space (v)

Центр совместно с рядом организаций участвует в проекте «Комплексное обеспечение функционирования и безопасности водородной энергетики». В рамках проекта проводятся исследования по следующим направлениям:

- экспериментальное обеспечение (первичные экспериментальные данные по опасным факторам горения и взрыва водорода в аварийных условиях);

• расчетное обеспечение (модели опасных явлений, значимых технологических объектов и процессов, программное обеспечение по газодинамическим и прочностным расчетам различных гипотетических сценариев аварий);

• аналитическое обеспечение (концептуальные подходы, модели аварий, научные методы и инженерные методики и реализующие их программные средства (ПС), предназначенные анализа и проектирования безопасности, и лучшие эмпирические практики обеспечения водородной безопасности;

• нормативное обеспечение (технические нормативные документы - государственные и отраслевые стандарты, своды правил, руководства по безопасности);

• аппаратное обеспечение (технические системы и средства водородной пожаро- и взрывозащиты - системы мониторинга взрывоопасных смесей, системы беспламенного удаления водорода (пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ)), системы инертизации объектов и устройств инертными газами, химическими флегматизаторами, водяным паром, системы вентиляции, системы вентилирования взрывов и т.д.;

• информационно-коммуникационное обеспечение (электронные сети и протоколы для мониторинга, контроля и управления технологическими процессами и системами защиты как на уровне отдельных установок и объектов, так и водородных сетей, взаимодействующих с системами электроснабжения, транспорта и т.д.);

• организационное обеспечение (методические документы и мероприятия, направленные на создание и поддержания культуры безопасности как на промышленных объектах, так и у массового пользователя водорода как коммерческого продукта).

В настоящее время проводятся исследования процессов горения водород-содержащий газовых смесей, в частности исследуются морфология и динамика горения ультра-бедных паро-водородо-воздушных газовых смесей (рис. 8), понимание и точная количественная характеристика которых необходимы для обеспечения взрывобезопасности АЭС с ВВЭР, пожарной безопасности обитаемых космических аппаратов, пожарной и взрывобезопасности водородных топливных элементов и электролизеров.

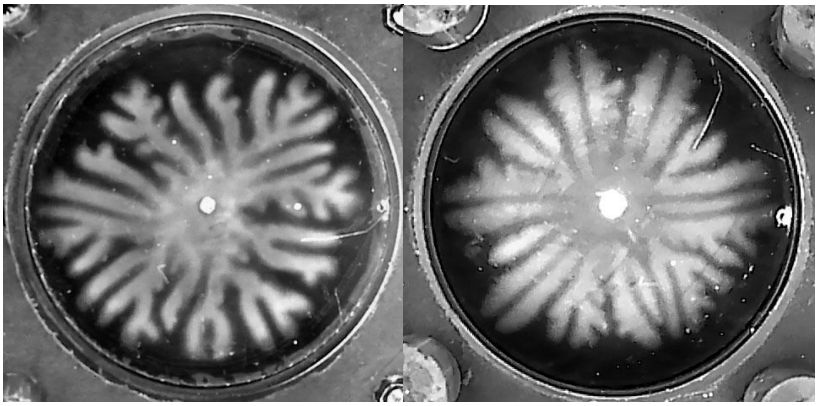


Рис. 8. Фрагментация водородного пламени в узком плоском канале
Fig. 8. Fragmentation of a hydrogen flame in a narrow flat channel

Исследуются каталитические, термохимические и газодинамические характеристики каталитических элементов – ключевых компонентов Пассивных Каталитических Рекомбинаторов Водорода (ПКРВ) для АЭС с ВВЭР.

Разрабатывается новый концептуальный подход - «риск-информированное управление безопасностью и стойкостью объектов и сетей водородной энергетики».

Предложенная концептуальная схема нацелена на достижение в ближайшее время:

- более высокого уровня безопасности водородной энергетики по сравнению с достигнутым сегодня уровнем безопасности в промышленности (в частности, в химической и газовой) и в атомной энергетике,

- конкурентоспособности и экономической эффективности водородной энергетики на основе АЭТС на формирующихся рынках «безуглеродной» энергетики, транспорта и промышленности.

Разработки электрохимических систем: водородных топливных элементов и электролизеров для получения чистого водорода.

В Центре имеется определенный задел по электрохимическим системам с твердым полимерным электролитом, в частности, выполненные ранее исследования и разработки по электрокатализаторам, мембранам, мембранно-электродным блокам, батареям

электролизеров и топливных элементов, электролизным и энергоустановкам на их основе, имеется значительный практический и теоретический опыт в результате исследований и разработок в области наноструктурных электрокатализаторов на различных типах наноуглеродных и оксидных носителях для низкотемпературных электролизеров воды и топливных элементов [30-59]. Наиболее детально рассмотрены графены и графеноподобные материалы, а также методы их модифицирования. Наряду с этим существенное внимание уделено моделированию процессов в этих электрохимических системах с целью обеспечения их пуска при низких температурах и поддержанию оптимального водного баланса в системах. Это представляет большой интерес для использования электрохимических систем аккумулирования и генерации электроэнергии в Арктическом регионе.

При разработке электрохимических систем на основе перспективных наноразмерных материалов использованы :

- результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокотемпературных электролизеров и топливных элементов, в частности наноструктурированных анодов;
- разработки дизайна наноструктурных катализаторов для конверсии ископаемых и возобновляемых топлив;
- результаты исследований по новым гидридообразующим материалам и их композитам с углеродными нановолокнами, что обеспечивает существенное повышение теплопроводности. Наряду с этим выполнен анализ данных по возможности использования графенов и графеноподобных материалов для очистки и аккумулирования водорода;
- применение электрохимических и каталитических технологий для смежных процессов водородного изотопного обмена и концентрирования атмосферного кислорода, что весьма актуально для решения экологических и медицинских проблем.

Создан задел в области элементной базы электрохимических систем, изготовлены и испытаны лабораторные образцы электрохимических модулей в составе лабораторных стендов.

За последние пять лет коллективом был успешно проведен ряд работ и исследований, в числе которых:

- разработка физико-химических моделей функционирования электрохимических систем с ТПЭ[40-44] и их отдельных элементов (протонообменых мембран, электрокаталитических и газодиффузионных слоев электролитических и топливных ячеек, батарей электролизеров и топливных элементов, рис.9);

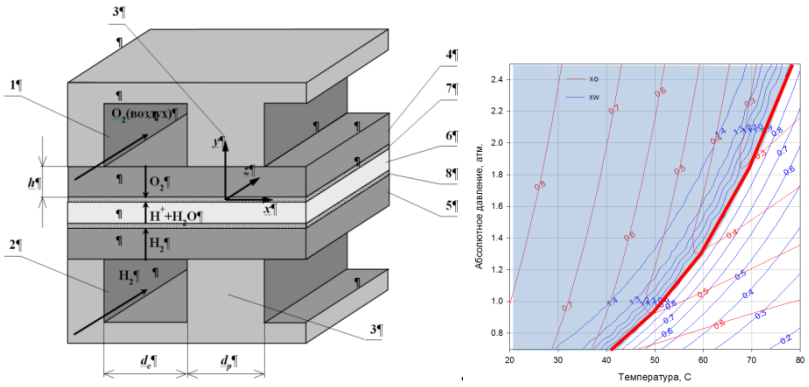


Рис. 9. Трехмерная модель обратимого топливного элемента с ТПЭ и результат расчета модели

Fig. 9. Three-dimensional model of a reversible fuel cell with TPE and the result of the model calculation

- разработка каталитических материалов на основе модифицированных носителей для электрохимических систем с твердым полимерным электролитом;
- разработка бифункциональных топливных элементов с твердым полимерным электролитом, создание и испытание лабораторных образцов модулей;
- разработка электрохимического генератора водорода высокого давления на основе протонно-обменной мембраны.

В рамках выполненных проектов, в частности, были разработаны:

- методика синтеза наноструктурных электрокатализаторов на основе металлов платиновой группы с уменьшенным содержанием благородных металлов для электрохимических систем (рис.10);

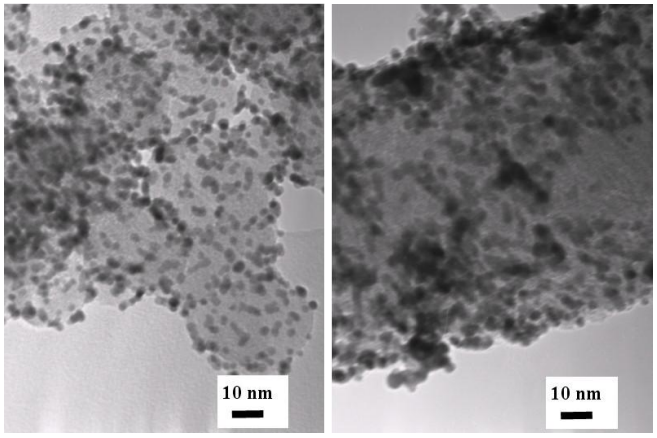


Рис. 10. Наноструктурная платина на углеродном носителе Vulcan XC-72 и графитовых нановолокнах
Fig. 10. Nanostructured platinum on a Vulcan XC-72 carbon carrier and graphite nanofibers

- метод импульсной ионной имплантации для обработки катализаторов, обеспечивающий гомогенизацию и аморфизацию поверхности катализатора, увеличение прочности связи с носителем;
- программа для оптимизации каталитических слоев топливных элементов с учетом использования модифицированных углеродных носителей;
- технология изготовления интегрированных мембранно-электродных блоков МЭБ (Рис. 11), позволяющая получать однородную и равнотолщинную структуру электрокаталитических слоев (разнотолщинность не более 5 мкм);

Рис. 11. Интегрированный семислойный мембранно-электродный блок
Fig. 11. Integrated seven-layer membrane-electrode block

На базе интегрированных МЭБ и их компонентов разработано большое количество моделей электролизеров воды различной производительности (от 1 до 10000 л водорода в час) и назначения, а также топливных элементов и энергоустановки на их основе.

Примеры электрохимических систем с ТПЭ, разработанных при участии коллектива:

- энергоустановка на основе твердополимерных топливных элементов мощностью 10 кВт для резервного и автономного энергообеспечения (рис. 12);
- опытный образец электролизной установки производительностью 10 нм^3/час водорода при давлении до 13 МПа (рис.13);

Рис. 12. Энергоустановка на основе топливных элементов с ТТПЭ мощностью 10 кВт

Fig. 12. Power plant based on fuel cells with a 10 kW TTPE

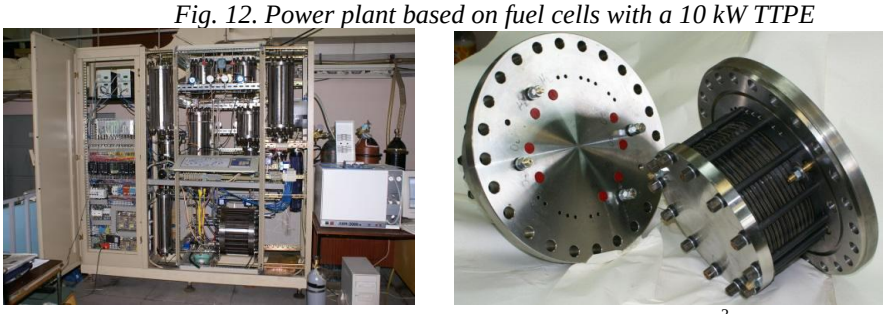


Рис. 13. Электролизная установка производительностью 10 нм^3/час водорода при давлении до 13 МПа

Fig. 13. Electrolysis plant with a capacity of 10 nm3 / hour of hydrogen at a pressure of up to 13 MPa

- силовая установка для беспилотного летательного аппарата на базе водородных топливных элементов мощностью 250 Вт (заказ Объединенной Авиастроительной Корпорации, Рис.14).

Рис. 14. Беспилотный летательный аппарат с силовой установкой на базе водородных топливных элементов мощностью 250 Вт

Fig. 14. Unmanned aerial vehicle with a power plant based on hydrogen fuel cells with a power of 250 W

- установка на основе обратимого топливного элемента мощностью 200 Вт с системой длительного хранения водорода на основе металлогидридного накопителя объемом 2,0 м^3 (потери менее 0,25 % в месяц) рис. 15).

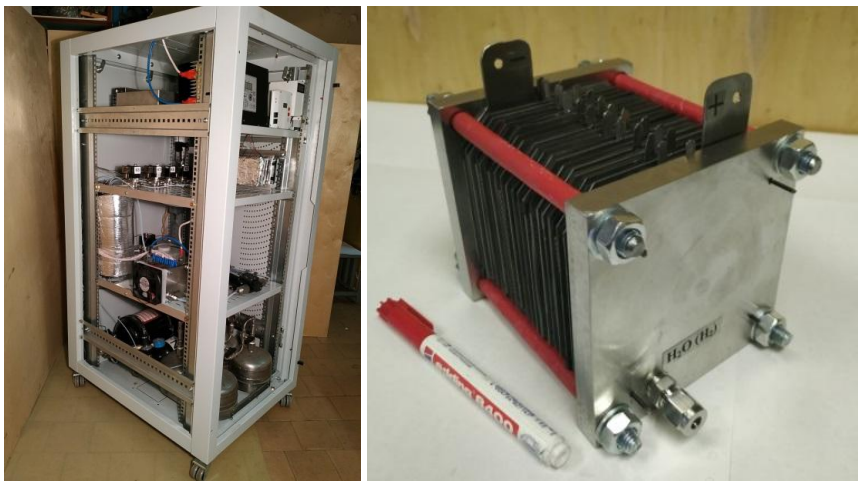


Рис. 15. Установка на основе обратимого топливного элемента мощностью 200 Вт
Fig. 15. Installation based on a reversible fuel cell with a capacity of 200 W

- создание уникальной установки для электролиза воды производительностью 10 $м^3$/час водорода при давлении до 20 МПа с асимметрией по давлению.

Перспективные направления деятельности Центра в области электрохимической водородной энергетики

Планируемые разработки и исследования:

- наноструктурных электрокатализаторов, ионообменных мембран и мембранно-электродных блоков;
- электролизных технологий производства водорода и кислорода (системы с твердым полимерным электролитом, твердооксидные, водно-щелочные);
- химических источников тока (топливные элементы и аккумуляторы);
- электрохимических технологии получения неорганических соединений (озон, фтор, серная кислота и т.п.).

В настоящее время основные усилия направлены на разработку и исследования основных компонентов электрохимических систем с ТПЭ – наноструктурных катализаторов/электрокатализаторов и мембранно-электродных блоков на их основе (проекты РФФИ, РНФ) (Рис. 16-17).

Основные объекты исследований:

- высокоэффективные электрокатализаторы и электродные материалы на основе наноразмерных (3-6 нм) частиц металлов платиновой группы, в том числе на наноуглеродных носителях; смешанные оксиды и соли типа $Ru_xIr_ySn_zO_2$, $LiFe(PO_4)$;
- наноструктурные углеродные электродные материалы, включая нановолокна, нанотрубки и фуллерены; композиты типа $Si\text{-}C_4$;
- физические и химические методы синтеза электрокатализаторов и электродных материалов;

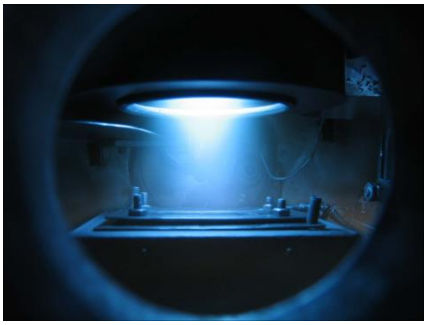


Рис. 16. Магнетронное получение наноструктурных электрокатализаторов
16. Magnetron production of nanostructured electrocatalysts

- твердые электролиты, мембраны и диафрагмы для электрохимических процессов;

- защитные и каталитические покрытия;

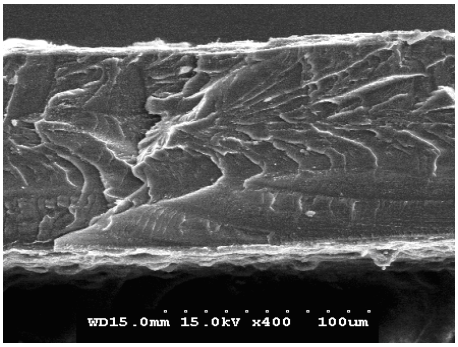


Рис. 17. Наноструктурированные электрокаталитические слои
(подложка – мембрана Nafion 117)
Fig. 17. Nanostructured electrocatalytic layers (Nafion 117 membrane substrate)

- материалы для высокотемпературных электрохимических систем на основе диоксида циркония.

Планируется продолжить разработки нового поколения электролизеров с ТПЭ, в том числе, высокого давления, с улучшенными характеристиками (давление до 30 МПа, чистота водорода > 99,99%, энергозатраты 3,8-4,3 кВт·час/м^3), разработки электрохимических технологий получения неорганических соединений (O_3, F_2, H_2SO_4 и др.), топливных элементов различного назначения.

Технологические и научные возможности НИЦ «Курчатовский Институт», научная кооперация

Центр обладает материально-технической базой и необходимым оборудованием для выполнения работ с обеспечением заданных показателей качества. В распоряжении Центра находятся анализаторы поверхности и размеров пор, приборы для проведения электрохимических исследований, технологический комплекс для формирования дисперсных наноструктурных электрокаталитических и компактных защитных покрытий методом магнетронно-ионного напыления и ионной имплантации и другое оборудование. Активно используется парк уникального оборудования Центра коллективного пользования «Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий», включая различные типы электронных и оптических микроскопов, спектрометров, приборы для элементного анализа.

Членами научного коллектива Центра по тематике водородной энергетики опубликованы более 300 печатных работ и оформлены более 50 патентов, свидетельств на программы для ЭВМ и ноу-хау. Ежегодно представляются доклады на ведущих международных и Российских конференциях и семинарах.

Сотрудники Центра успешно совмещают научно-исследовательскую работу с преподавательской деятельностью и являются профессорами высших учебных заведений, в частности, МЭИ и МФТИ.

Ежегодно в НИЦ «Курчатовский институт» проходят практику и выполняют дипломные работы студенты МЭИ, РХТУ и МФТИ.

НИЦ «Курчатовский институт» ведет совместные исследования и разработки более чем с 10 зарубежными университетами, научно-исследовательскими центрами и компаниями Европы, Азии и Южной Африки, среди которых:

- *Max-Plank-Institut fur Plasmaphysik, Garching*, Германия;
- Китайская академия Инженерной физики;
- Пражский Технический университет, Чехия;
- Международное Партнерство по Водородной Экономике (IPHE);
- *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH*, Германия;
- *Université Paris-Sud и University of Poitiers*, Франция;
- *Fraunhofer-Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung e.V.*, Германия;
- *Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" (ITAE)*, Италия;
- *Linköping University*, Швеция;
- *Warsaw University of Technology*, Польша;
- *North-West University* ЮАР.

Заключение

Сегодня технологии водородной энергетики становятся крайне востребованными в связи с ренессансом атомно-водородной энергетики, основой которой является производство водорода с использованием энергии АЭС, и широким развитием возобновляемой энергетики, требующей высокоэффективных систем хранения энергии. Наблюдается устойчивая тенденция к переходу от углеводородной энергетики к экологически чистой водородной энергетике, в рамках которой водород – универсальный энергоноситель – становится неотъемлемой частью развития современного общества.

НИЦ «Курчатовский институт» ведет разработки ключевых систем водородной энергетики, позволяющих производить водород, хранить его и использовать с высокой эффективностью.

Литература

1. Русанов В.Д., Фридман А.А., Шолин Г.В. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 414 с.

2. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я. Атомно-водородная энергетика. Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2004. № 3(11). С.5-10.

3. Семинар Водородная энергетика НИЦ Курчатовский Институт http://www.nrcki.ru/product/press-nrcki/press-nrcki--37166.shtml?g_show=32038.

4. Столяревский А.Я. Ядерно-технологические комплексы на основе высокотемпературных реакторов. М.:Энергоатомиздат. 1988.

5. Митенков Ф.М., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В., Головко В.Ф., Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Столяревский А.Я. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – энергоисточник для промышленного производства водорода // Атомная энергия. 2004. № 11.

6. Столяревский А.Я. Технология получения синтез-газа для водородной энергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология».2005. № 2(22). С. 26-32.

7. Астановский Д.Л., Астановский Л.З./Энергосберегающее компактное производство водорода // Химическое и нефтегазовое машиностроение.2003. №4. С.7-11.

8. Русанов В.Д., Этьеван К., Бабарицкий А.И. и др. Эффект плазменного катализа на примере диссоциации метана на водород и углерод. ДАН, 1997. Т.354. №2. С. 213-215.

9. Потехин С.В., Потанкин Б.В., Деминский М.А. и др. Эффект плазменного катализа при разложении метана. ХВЭ, 1997. Т.33. №1. С.59-66.

10. Русанов В.Д., Бабарицкий А.И., Герасимов Е.Н., и др. Энергия электронов в импульсном псевдокоронном микроволновом разряде в процессе плазменного катализа. ДАН, 1999. Т.366. №3. С.323.

11. Бабарицкий А.И., Герасимов Е.Н., Демкин С.А., и др. Импульсно-периодический СВЧ-разряд как катализатор химической реакции. ЖТФ. 2000. Т.70. №.11. С. 36-41.

12. Бабарицкий А.И., Баранов И.Е., Дёмкин С.А., и др. Плазменный катализ процессов конверсии углеводородов. ХВЭ, 1999. Т.33. № 6. С.458-463.

13. КРОТОВ М.Ф., БАБАРИЦКИЙ А.И., БИБИКОВ М.Б., И ДР. Способ переработки углеродсодержащего сырья в реакторе с расплавом металла Патент на изобретение RU2630118C. 2017.

14. Бабарицкий А.И., Бибиков М.Б., Деминский М.А., и др. Экспериментальное исследование газификации гудрона в расплаве металла при циклической подаче в реактор углеродсодержащего сырья и окислителя Химия Высоких Энергий. 2017. Т. 51. № 2.

15 . Чабак А.Ф. Аккумулятор водорода // Патент РФ RU 2376522 C1.

16. Чабак А.Ф., Ульянов А.И. Проблемы хранения и использования водорода // Вестник машиностроения. 2007. № 4. С. 48-52

17. Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., и др. Системы хранения водорода // «Транспорт на альтернативном топливе». 2009. № 5(11). С.72-79.

18. Баронов Г.С., Калинников А.А., Русанов В.Д и др. Высокоэффективные дожигатели водорода на основе активированных пористых ячеистых материалов. 4 Ежегодная Научно-Техническая Конференция Ядерного Общества, Июнь 28 – Июль 2. 1993, Нижний Новгород.

19. Денисенко В.П., Кириллов И.А., Мелихов А.С., и др. Экспериментальное исследование морфологии ультра-бедных водородо-воздушных пламен в горизонтальном узком канале, Атомная энергия, 2021.

20. Кириллов И.А., Симоненко В.А., Харитонова Н.Л. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики, Российские нанотехнологий, 2020. Т.15. №3. С.402-414.

21. Denisenko VP, Kirillov IA, Korobtsev SV, et al. Analysis of the Interaction between Jet and Plume Flows of a Light Gas with an Extended Ceiling Based on the Results of Experimental Studies. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards.: 21-26 April 2019. V.2, Saint Petersburg, Russia.

22. Kirillov I.A., Deflagration-to-flame-ball-transition in hydrogen-air gas mixtures: gaps and bottlenecks, 2nd Near-Limit Flames Workshop, Peking, 2019.

23. Kirillov I., Kharitonova N., Lebedev A., Nikiforov S., Plaksin V. Theoretical Estimation of Concentration Limits for Water Steam Capability to Suppress Flame Acceleration in Hydrogen-Air Mixtures. Proceedings of the 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. 2019.

24. Kirillov I.A., Physics-based Approach for Reduction Uncertainties in Concentration Limits of Slow-to-Fast Flame Transition in Hydrogen-Air Gas Mixtures, Hydrogen Management in Severe Accidents, Technical Meeting EVT1701911, 25-28 September 2018, Vienna, TECDOC, IAEA.

25. Kirillov IA. Theoretical Physics-based Definition and Accurate Characterization of Lower Concentration Limit for Hydrogen-Air Mixtures // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards.: 21-26 April 2019. V. 2. Saint Petersburg, Russia.

26. Кириллов И.А., Харитонова Н.Л. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы, Ядерная и радиационная безопасность, 2017. Т.2. № 84. С.26-37.

27. Pasman H., Kirillov I., editors. Resilience of Cotyies to Terrorist and other Thretas: Learning fro 9/11 and further research issues, Springer, 2008.

28. Kulova T.L., Nikolaev I.I., Fateev V.N., et al. Modern Electrochemical Systems of Energy Accumulation. Chemical Problems, V.1, p 9-34,2018. https://istina.msu.ru/publications/article/162889909/.

29. Denisenko V.P., Kirillov I.A., Korobtsev S.V., et al. Analysis of the Interaction between Jet and Plume Flows of a Light Gas with an Extended Ceiling Based on the Results of Experimental Studies. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9), pp. 1335-1347, April 21-26, 2019,Saint Petersburg.

30. Grigoriev S.A., Porembsky V.I., Fateev V.N. International Journal of Hydrogen Energy 2006. V.31. pp.171-175.

31. Grigor'ev S.A., Porembskii V.I. and Fateev V.N. Chemical and Petroleum Engineering, 2004.V. 40.

32. Григорьев С.Л., Лютикова Е.Л., Притуленко Е.Г., и др. Электрохимия. 2006. Т.42 №11. С. 1393-1396.

33. Арчаков О.В., Лютикова Е.К., Фатеев В.Н., Укр.хим.журнал. 1988. Т.54. №7. С. 709-712.

34. Белоглазов В.Ю. Технология изготовления каталитических слоёв топливного элемента с твердополимерным электролитом // Труды Международного симпозиума по водородной энергетике, Москва, Издательство МЭИ. 2007.

35. Grigor'ev S.A., Porembskii V.I and Fateev V.N. Electrolysers with solid polimer electrolyte for getting special purity gases, Chemical and Petroleum Engineering. 2004. V. 40.

36. Grigoriev S.A., Porembsky V.I., Fateev V.N. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. International Journal of Hydrogen Energy.2006. V. 31. pp. 171 – 175

37. Grigoriev S.A., Millet P., Porembsky V.I., et al. Development and preliminary testing of a unitized regenerative fuel cell based on PEM technology. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36. p.4164-4168,.

38. Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.Н., др. Получение водорода электролизом воды - современное состояние, проблемы и перспективы // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. № 3. С. 62-69.

39. Баранов И.Е., Григорьев С.А., Николаев И.И., и др. Перенос реагентов по пористым системам газодиффузионных и электрокаталитических слоев топливного элемента с твердым полимерным электролитом в условиях их частичного затопления водой // Электрохимия, 2006. Т.42. № 12. С. 14-42.

40. Баранов И.Е., Фатеев В.Н., Сысоев А.В., и др. Моделирование тонких каталитических слоев со случайным расположением частиц катализаторов. ДАН. «Химия». 1997. Т.354. №1. С.55-58.

41. Баранов И.Е., Фатеев В.Н., Сысоев А.В. Численное моделирование электрокаталитического слоя электролизеров с твердым полимерным электролитом // Электрохимия. 1997. Т.33. №8. С. 967-970.

42. Баранов И.Е., Фатеев В.Н., Фридман А.А. и др Модель электрохимического слоя с твердо-полимерным электролитом. Электрохимия. 1994. Т. 30. С. 1256.

43. Grigoriev S.A., Fateev V.N., Bessarabov D.G., et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology // International Journal of Hydrogen Energy, 2020. V. 45. Issue 49. pp. 26036-26058.

44. Pushkareva I.V., Pushkarev A.S., Grigoriev S.A., et al. Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis // International Journal of Hydrogen Energy. 2020.V. 45. Issue 49. pp. 26070-26079.

45. Антуш М., Григорьев С.А., Эль Руби В.М.А., Мийе П. Применение фото-анода на основе TiO2/красителя N719 в сенсибилизированном красителем солнечном элементе и анализ его характеристик // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 11. С. 1024–1033.

46. Григорьев А.С., Скорлыгин В.В., Григорьев С.А., и др. Энергоустановки на основе возобновляемых источников и электрохимических устройств хранения и генерации энергии для децентрализованного автономного электроснабжения // Электротехника, 2019. №7. С. 33-37.

47. Григорьев А.С., Григорьев С.А., Королев А.В., и др. Малая автономная энергетика киловаттного уровня генерируемой мощности на основе радиоизотопных и возобновляемых источников энергии для Арктической зоны и Дальнего Востока // Атомная энергия, 2018. Т. 125. № 4. С. 206-212.

48. Grigoriev A.S., Skorlygin V.V., Grigoriev S.A., et al.A Hybrid Power Plant Based on Renewables and Electrochemical Energy Storage and Generation Systems for Decentralized Electricity Supply of the Northern Territories // International Journal of Electrochemical Science, Volume 13, Issue 2 (February), 2018, V. 13. Issue 2. pp. 1822–1830.

49. Grigoriev S.A., Kalinnikov A.A. Mathematical modeling and experimental study of the performance of PEM water electrolysis cell with different loadings of platinum metals in electrocatalytic layers // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 47. Issue 3. Issue 3. pp. 1590-1597.

50. Kalinnikov A.A., Grigoriev S.A, Bessarabov D.G. Nonequilibrium poroelectroelastic theory for polymer electrolytes under conditions of water electrolysis // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V.44. Issue 16. pp. 7889-7904.

51. Григорьев С.А., Бессарабов Д.Г., Фатеев В.Н. О механизмах деградации характеристик мембранно-электродных блоков при твердополимерном электролизе воды // Электрохимия, 2017. Т. 5. № 3. С. 359-365.

52. Ramenskiy AYu., Grigoriev S.A., Ramenskaya E.A., et al. Technical regulation issues concerning fuel cell technologies in the Russian Federation, countries of the Eurasian Economic Union and CIS countries // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42. Issue 3. pp. 21250-21262.

53. Siracusano S., Baglio V., Grigoriev S.A., et al. The influence of iridium chemical oxidation state on the performance and durability of oxygen evolution catalysts in PEM electrolysis // Journal of Power Sources. 2017. V.366. pp. 105-114.

54. Grigoriev SA., Fateev Vl N., Pushkarev AS, et al. Reduced Graphene Oxide and Its Modifications as Catalyst Supports and Catalyst Layer Modifiers for PEMFC // Materials, 2018, V.11(8). pp.1405.

55. Alekseeva OK., Mikhalev AI., Lutikova EK., et al. Structural and Electrocatalytic Properties of Platinum and Platinum-Carbon Layers Obtained by Magnetron-Ion Sputtering // Catalysts, 2018. V. 8(12). pp.665.

56. Roudabeh Valiollahi, Mikhail Vagin, Viktor Gueskine, et al. Electrochemical hydrogen production on a metal-free polymer // Sustainable Energy & Fuels, 2019. V. 3. Issue 12. pp. 3387–3398.

57. Баранов И.Е.,Акелькина С.В.,Спасов Д.Д., и др. Энергоустановка для работы в условиях отрицательных температур. Патент РФ RU 2 736 883 2020.

Авторы публикации

Фатеев Владимир Николаевич – д-р. хим. наук, начальник отделения НИЦ «Курчатовский Институт».

Порембский Владимир Николаевич – зам. начальника отделения НИЦ «Курчатовский

Институт».

Григорьев Сергей Александрович – д-р техн. наук, зам. начальника отделения НИЦ «Курчатовский Институт».

Баранов Иван Евгеньевич – канд. физ-мат. наук, начальник отдела НИЦ «Курчатовский Институт».

Островский Сергей Владимирович – начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский Институт».

Коробцев Сергей Владимирович – канд. физ-мат. наук, начальник отделения НИЦ «Курчатовский Институт».

Денисенко Валерий Павлович – начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский Институт».

Николаев Игорь Игоревич – ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский Институт».

Кириллов Игорь Александрович – канд. физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский Институт».

Демкин Святослав Александрович – канд. физ-мат. наук, начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский Институт».

Смирнов Роман Викторович - канд. физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский Институт»

References

1.Rusanov VD, Fridman AA, Sholin GV. *Physics of chemically active plasma*. Moscow: Nauka, 1984. 414 p.

2. Ponomarev-Stepnoy NN, Stolyarevsky AYa, Atomic-hydrogen energy. *International scientific journal Alternative energy and ecology*. 2004;3(11):5-10.

3. *Seminar Hydrogen Energy NRC Kurchatov Institute*. *Available at* http://www.nrcki.ru/product/press-nrcki/press-nrcki--37166.shtml?g_show=32038.

4. Stolyarevsky AYa. *Nuclear-technological complexes based on high-temperature reactors*. M.: Energoatomizdat, 1988.

5.Mitenkov FM, Kodochigov NG, Vasyaev AV, et al. High-temperature gas-cooled reactor - an energy source for the industrial production of hydrogen. *Atomic Energy*. 2004. No. 11.

6. Stolyarevsky AYa. Synthesis gas production technology for hydrogen energy. International *scientific journal Alternative energy and ecology*. 2005;2 (22):26-32.

7.Astanovskiy DL, Astanovskiy LZ. Energy-saving compact hydrogen production. *Chemical and oil and gas engineering.* 2003;4:7-11.

8. Rusanov VD, Etievan K, Babaritskiy AI. et al. *Effect of plasma catalysis on the example of methane dissociation into hydrogen and carbon*. DAN, 1997;354(2):213-215.

9. Potekhin SV, Potankin BV, Deminsky MA. et al. *The effect of plasma catalysis in the decomposition of methane*. KhVE, 1997;33(1):59-66.

10. Rusanov VD, Babaritsky AI., Gerasimov EN, et al. *The energy of electrons in a pulsed pseudo-corona microwave discharge during plasma catalysis.* DAN, 1999;366(3):323.

11. Babaritsky AI, Gerasimov EN, Demkin SA, et al. *Pulsed-periodic microwave discharge as a catalyst for a chemical reaction. ZhTF*. 2000;70(11):36-41.

12. Babaritsky A. I., Baranov I. E., Demkin S.A., et al. *Plasma catalysis of hydrocarbon conversion processes.* KhVE, 1999;33(6):458-463.

13.Krotov MF, Babaritsky AI, Bibikov MB, et al. *Method for processing carbon-containing raw materials in a melted metal reactor*. Patent for invention RU 2630118 C, 2017.

14. Babaritsky AI, Bibikov MB, Deminsky MA, et al. Experimental study of tar gasification in a metal melt with cyclic feeding of carbonaceous feedstock and oxidizer into the reactor. *High Energy Chemistry.* 2017;51(2).

15. Chabak AF. *Hydrogen accumulator*. RF Patent RU 2376522 C1.

16. Chabak AF, Ulyanov AI. Problems of storage and use of hydrogen. *Vestnik mashinostroeniya*. 2007;4:48-52

17. Alekseeva OK, Kozlov SI, Samsonov R.O. et al. *Hydrogen storage systems. Transport on alternative fuel*. 2009,5(11):72-79.

18. Baronov GS, Kalinnikov AA, Rusanov VD, et al. *Highly efficient hydrogen afterburners based on activated porous cellular materials.* 4th Annual Scientific and Technical Conference of the Nuclear Society, June 28 - July 2 1993.Nizhny Novgorod.

19. Denisenko VP, Kirillov IA, Melikhov AS, et al. Experimental study of the morphology of ultra-poor hydrogen-air flames in a horizontal narrow channel. *Atomic Energy*. 2021. (in press)

20.Kirillov IA, Simonenko VA, Kharitonova NL. Problems of normative, experimental and theoretical calculation of the safety of hydrogen energy. *Russian nanotechnologies*. 2020;15(3):402-414.

21 Denisenko VP, Kirillov I, Korobtsev SV, et al. *Analysis of the Interaction between Jet and Plume Flows of a Light Gas with an Extended Ceiling Based on the Results of Experimental Studies.* Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. 2019.

22 Kirillov IA. *Deflagration-to-flame-ball-transition in hydrogen-air gas mixtures: gaps and bottlenecks*. 2nd Near-Limit Flames Workshop, Peking, 2019.

23. Kirillov I, Kharitonova N, Lebedev A, et al. *Theoretical Estimation of Concentration Limits for Water Steam Capability to Suppress Flame Acceleration in Hydrogen-Air Mixtures*. Proceedings of the 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. 2019.

24. Kirillov IA. *Physics-based Approach for Reduction Uncertainties in Concentration Limits of Slow-to-Fast Flame Transition in Hydrogen-Air Gas Mixtures, Hydrogen Management in Severe Accidents, Technical Meeting EVT1701911*. 25-28 September. 2018, Vienna , TECDOC, IAEA (in press).

25. Kirillov IA. *Theoretical Physics-based Definition and Accurate Characterization of Lower Concentration Limit for Hydrogen-Air Mixtures*. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. 2019;2. Saint Petersburg, Russia.

26. Kirillov IA, Kharitonova NL. Ensuring hydrogen safety at nuclear power plants with water-cooled reactors. Current state of the problem. *Nuclear and Radiation Safety*. 2017;2 (84);26-37.

27. Pasman H, Kirillov I, editors. Resilience of Cotyies to Terrorist and other Thretas: Learning fro 9/11 and further research issues. *Springer*. 2008

28. Kulova TL, Nikolaev II, Fateev VN, et al. Modern Electrochemical Systems of Energy Accumulation. *Chemical Problems*. 2018; 1:9-34. Available et https://istina.msu.ru/publications/article/162889909.

29. Denisenko VP, Kirillov IA, Korobtsev SV. *Analysis of the Interaction between Jet and Plume Flows of a Light Gas with an Extended Ceiling Based on the Results of Experimental Studies*. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). 2019. pp. 1335-1347.

30. Grigoriev SA, Porembsky VI, Fateev VN. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006. pp.171-175.

31. Grigor'ev SA, Porembskii VI and Fateev VN. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2004;40.

32. Grigoriev SL, Lyutikova EL, Pritulenko EG, et al. *Electrochemistry*. 2006;42(11):1393–1396.

33. Archakov OV, Lyutikova EK, Fateev VN, et al. *Ukrainian Chemistry Journal*. 1988;54(7);709-712.

34. Beloglazov VYu. *Manufacturing technology of catalytic layers of a fuel cell with solid polymer electrolyte. Proceedings of the International Symposium on Hydrogen Energy*, Moscow. MPEI Publishing House, 2007.

35.. Grigor'ev S.A, Porembskii VI and Fateev VN. Electrolysers with solid polimer electrolyte for getting special purity gases. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2004;40(9-10).

36. Grigoriev SA, Porembsky VI, Fateev VN. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006;31:171-175.

37. Grigoriev SA, Millet P, Porembsky VI,et al. Development and preliminary testing of a unitized regenerative fuel cell based on PEM technology. *J. Hydrogen Energy*.2011;36:4164-4168.

38. Grigoriev SA, Porembsky VI, Fateev VN, et al. Hydrogen production by electrolysis of water - current state, problems and prospects. *Transport on alternative fuel*. 2008;3:62-69.

39. Baranov IE, Grigoriev SA, Nikolaev II, et al.Transfer of reagents through porous systems of gas diffusion and electrocatalytic layers of a fuel cell with a solid polymer electrolyte under conditions of their partial flooding with water. *Electrochemistry*. 2006;42(12):1442.

40. Baranov IE, Fateev VN, Sysoev AV, et al. Modeling of thin catalytic layers with a random arrangement of catalyst particles. DAN. *Chemistry*. 1997;354(1):55-58.

41. Baranov IE, Fateev VN, Sysoev AV, et al. Numerical modeling of the electrocatalytic layer of electrolyzers with solid polymer electrolyte. *Electrochemistry*. 1997;33(8):967-970.

42. I Baranov IE, Fateev VN, Fridman AA, et al. Model of an electrochemical layer with a solid-polymer electrolyte. *Electrochemistry*. 1994;30:1256.

43. Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020,45(49):26036-26058.

44. Pushkareva IV, Pushkarev AS, Grigoriev SA, et al. Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(49):26070-26079.

45. Antush M, Grigoriev SA. Application of a photo-anode based on TiO2 / dye N719 in a dye-sensitized solar cell and analysis of its characteristics. *Electrochemistry*. 2020;56(11):1024-1033.

46 Grigoriev AS, Skorlygin VV, Grigoriev SA, et al. Power plants based on renewable sources and electrochemical devices for storage and generation of energy for decentralized autonomous power supply *Electrical Engineering*. 2019;7:33-37.

47. Grigoriev AS, Grigoriev SA, Korolev AV, et al. Small-scale autonomous power engineering of a kilowatt level of generated power based on radioisotope and renewable energy sources for the Arctic zone and the Far East. *Atomic Energy*. 2019;125(4):231-238.

48. Grigoriev AS, Skorlygin VV, Grigoriev SA, et al. A Hybrid Power Plant Based on Renewables and Electrochemical Energy Storage and Generation Systems for Decentralized Electricity Supply of the Northern Territories. *International Journal of Electrochemical Science*. *2*018;13(2):1822-1830.

49Grigoriev SA, Kalinnikov AA. Mathematical modeling and experimental study of the performance of PEM water electrolysis cell with different loadings of platinum metals in electrocatalytic layers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(3):1590-1597.

50. Kalinnikov AA, Grigoriev SA, Bessarabov DG. Nonequilibrium poroelectroelastic theory for polymer electrolytes under conditions of water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;44(16):7889-7904.

51 Grigoriev SA, Bessarabov DG, Fateev VN. On the mechanisms of degradation of the characteristics of membrane-electrode blocks during solid polymer electrolysis of water. *Electrochemistry*. 2017;53(3):318-323.

52. Ramenskiy AYu, Grigoriev SA, Ramenskaya EA. Technical regulation issues concerning fuel cell technologies in the Russian Federation, countries of the Eurasian Economic Union and CIS countries. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(33):21250-21262.

53. Siracusano S, Baglio V, Grigoriev SA. et al. The influence of iridium chemical oxidation state on the performance and durability of oxygen evolution catalysts in PEM electrolysis. *Journal of Power Sources* 2017;366:105-114.

54. Grigoriev SA, Fateev VN, Pushkarev AS. et al. Reduced Graphene Oxide and Its Modifications as Catalyst Supports and Catalyst Layer Modifiers for PEMFC. *Materials*. 2018,11(8):1405.

55. Alekseeva OK, Mikhalev AI., Lutikova EK. et al. Structural and Electrocatalytic Properties of Platinum and Platinum-Carbon Layers Obtained by Magnetron-Ion Sputtering. *Catalysts*. 2018,8 (12):665.

56. Roudabeh Valiollahi, Mikhail Vagin, Viktor Gueskine, Amritpal Singh, et al. Production Electro, Xavier Crispin hydrogen on a metal-free polymer. *Sustainable Energy & Fuels*. 2019;3(12):3387-3398.

57 Baranov IE, Akelkina SV, Spasov DD, et al. *Power plant for operation in conditions of negative temperatures.* RF Patent RU 2 736 883 C2 2020.

Authors of the publication

Fateev Vladimir Nikolaevich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Porembsky Vladimir Nikolaevich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Grigoriev Sergey Alexandrovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Baranov Ivan Evgenievich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Ostrovsky Sergey Vladimirovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Korobtsev Sergey Vladimirovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Denisenko Valery Pavlovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Nikolaev Igor Igorevich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Kirillov Igor Alexandrovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Demkin Svyatoslav Alexandrovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Smirnov Roman Viktorovich - National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Получено ***30 марта 2021г.***

Отредактировано ***06 апреля 2021г.***

Принято ***08 апреля 2021г.***