МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ
Научно-технический центр "ТАТА" *(Саров)*
Номер: **13-15 (261-263)** Год: **2018**

Название статьи	Страницы	Цит.
ПРЕДИСЛОВИЕ		
ЮБИЛЕЙ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА РОБЕРТА АЛЕКСАНДРОВИЧА АМЕРХАНОВА *Григораш О.В.*	12-14	0
I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1-3-0-0 СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.		
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА И ОРИЕНТАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ *Гаевский А.Ю., Гаевская А.Н.*	15-29	0
I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА. 2-7-0-0 ВЕТРО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.		
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕТРО-ВОДОРОДНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ *Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Амерханов Р.А., Коробатов Д.В., Лутовац М., Мартьянов А.С.*	30-54	0
I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 8. ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ВИЭ.		
АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ *Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г.*	55-67	0
II. НЕВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 9. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 9-1-0-0 АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.		
ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЗАМКНУТОГО ВОДОРОДНОГО ЦИКЛА ГОРЕНИЯ *Аминов Р.З., Егоров А.Н.*	68-79	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-4-0-0 ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА.		
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ БОРОГИДРИДА НАТРИЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЩЕЛОЧНЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ *Селиккан Х., Сахин М., Аксу М.Л., Везироглу Т.Н.*	80-86	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-5-0-0 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА. 12-5-2-0 ЭЛЕКТРОЛИЗ.		
НЕРАВНОВЕСНАЯ ПОРОЭЛЕКТРОЭЛАСТИЧНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛИМЕРНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ *Калинников А.А., Григорьев С.А., Бессарабов Д.Г.*	87-112	0
ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ: "ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ" (ТЖМТ - 2018)	112	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-5-0-0 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА. 12-5-11-0 ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ИЗ ГЛУБИННОГО МОРСКОГО СЕРОВОДОРОДА.		
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ H_2S В ГЛУБИННЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ *Мидилли А.Н., Ай М., Кейл А., Везироглу Т.Н.*	113-121	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-8-1-0 ВОДОРОД В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ.		
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИДОВ МЕТАЛЛОВ IV И V ГРУПП В ГИДРИДНОМ ЦИКЛЕ *Долуханян С.К., Мурадян Г.Н., Алексанян А.Г., Тер-Галстян О.П., Мнацаканян Н.Л.*	122-140	0
V. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. 13. НАНОСТРУКТУРЫ. 13-1-0-0 НАНОСИСТЕМЫ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ.		
ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ НАНОСТРУКТУР ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ, МОЛИБДЕНА И ВОЛЬФРАМА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ *Карпухин В.Т., Маликов М.М., Вальяно Г.Е., Бородина Т.И., Казарян М.А.*	141-148	0
XI. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, УСТРОЙСТВА И ИХ ВНЕДРЕНИЕ. 26. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ АЭ И ЭКОЛОГИИ.		
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ *Амерханов Р.А., Бекиров Э.А., Асанов М.М., Шеметов И.В., Босько П.Ю.*	149-156	0

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-3-0-0 НАУЧНЫЕ БИОГРАФИИ УЧЁНЫХ МИРА.

НАГРАЖДЕНИЕ. АМЕРХАНОВ А.Р	157	0

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-5-0-0 МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ.

I МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ПРИРОДООБУСТРОЙСТВЕ"	158-159	0
НОБЕЛЕВСКИЙ КОНГРЕСС - 12 МЕЖДУНАРОДНАЯ ВСТРЕЧА-КОНФЕРЕНЦИЯ ЛАУРЕАТОВ НОБЕЛЕВСКИХ ПРЕМИЙ И НОБЕЛИСТОВ	160-161	0
СТАТУТЫ НАО "САЛЮС" И МИНЦ	162-176	0
VII БАКЕЕВСКАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ КОНФЕРЕНЦИЯ "МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАНООБЪЕКТЫ И ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ"	177-178	0

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-6-0-0 РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ.

КОМПАНИЯ HPBS ПРИНЯЛА УЧАСТИЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "GREENBUILD EUROPE 2018"	179	0
ТЕМА ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ: НЕВИДИМЫЙ ГАЗ-УБИЙЦА В ВАШЕМ ДОМЕ. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ	179-182	0
CLIMEON OPENS REPRESENTATION OFFICE IN JAPAN	182	0
MEYER BURGER DIVESTS ITS SOLAR SYSTEMS BUSINESS TO PATRICK HOFER-NOSER	183	0
TWO MARKETS BECOME ONE - SWEDEN AND DENMARK REACH AGREEMENT ON HARMONIZATION	183-184	0
"ДАНФОСС": ТЕПЛОВАЯ АВТОМАТИКА НА ТРЕТЬ СНИЗИТ РАСХОДЫ НА ОТОПЛЕНИЕ ВДНХ	184-185	0
МЕГА-ПРЕМИЯ ИЗ РОССИИ: "ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ" - В СПИСКЕ ВЫДАЮЩИХСЯ НАГРАД	185-186	0

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-7-0-0 НОВЫЕ НАУЧНЫЕ КНИГИ.

ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИЕ И ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ *Амерханов Р.А., Кириченко А.С.*	187-188	0

XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ 41. ИНФОРМАЦИЯ 41-15-0-0 НОВОСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

НОВОСТИ	189-205	0

Юбилей доктора технических наук, профессора Роберта Александровича Амерханова

В День России, 12 июня 2018 г., исполняется 80 лет со дня рождения и 57 лет работы в высшей школе СССР и Российской Федерации Роберта Александровича Амерханова – доктора технических наук, профессора кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», известного ученого и педагога отечественной школы сельскохозяйственной теплоэнергетики.

Р.А. Амерханов родился в городе Краснодаре, в 1960 г. окончил механический факультет Краснодарского института пищевой промышленности (КИПП), работал инженером-механиком на Адыгейском консервном комбинате. С 1961 г. – ассистент КИПП и Краснодарского политехнического института (КПИ), с 1964 г. – ассистент кафедры «Промтеплоэнергетика» КПИ.

С 1967 г. по 1971 г. обучался в целевой аспирантуре кафедры «Отопление и вентиляция» Ростовского инженерно-строительного института (РИСИ).

В 1971 г. Р.А. Амерханов защитил кандидатскую диссертацию в Харьковском инженерно-строительном институте и продолжил работу в РИСИ на должностях: ассистента, старшего преподавателя и доцента.

В 1977 г. Р.А. Амерханов был принят на работу в КСХИ и избран по конкурсу на должность доцента кафедры строительного производства, а в 1978 г. назначен заместителем декана инженерно-строительного факультета.

В 1981 г. Р.А. Амерханов был избран на должность доцента кафедры энергетики и одновременно назначен заместителем декана факультета электрификации сельского хозяйства, в 1987 г. – деканом этого факультета и проработал в этой должности до 1998 г.

В 1992 г. Р.А. Амерханову было присвоено ученое звание профессора по кафедре энергетики. В 2004 г. Р.А. Амерханов успешно защитил докторскую диссертацию по специальности 05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии.

Р.А. Амерханов
к.т.н., профессор (1987–1988)
декан факультета
электрификации с/х

В конце 90-х гг. XX века Р.А. Амерханов выступил с инициативой создания на факультете школы по возобновляемым источникам энергии, которая была поддержана академиком РАН, ректором КубГАУ Иваном Тимофеевичем Трубилиным (с 1970 г. по 2007 г. – ректор, с 2007 г. по 2014 г. – президент КубГАУ). После этого в учебный процесс университета начали внедрять учебно-методические и научные разработки по возобновляемой энергетике.

Иван Тимофеевич Трубилин

Пребывание Президента Российской Федерации В.В. Путина в Кубанском государственном аграрном университете (2005 г.)

Александр Иванович Трубилин

В 2007 г. ректором университета был избран Александр Иванович Трубилин. Под его руководством ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» занял лидирующие позиции в системе образования Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, продолжая поддерживать развитие инновационного направления, связанного с возобновляемой энергетикой и экологией.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Большая заслуга в том, что созданное на факультете научное направление по возобновляемой энергетике позволило КубГАУ стать первым в этой области среди аграрных вузов России, принадлежит и Р.А. Амерханову.

Работа научной школы под руководством Р.А. Амерханова получила развитие после объединения кафедр «Энергетика и возобновляемые источники энергии» и «Теоретическая и общая электротехника». Решение о создании объединенной кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» было принято президентом И.Т. Трубилиным, ректором университета А.И. Трубилиным, первым проректором С.М. Резниченко и единодушно поддержано Ученым советом КубГАУ.

Главный корпус ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Факультет энергетики КубГАУ

Основным предназначением университета, о чем постоянно просил не забывать И.Т. Трубилин, является тесное сочетание научно-исследовательской работы и учебного процесса, использование научных разработок в подготовке патентов и, прежде всего, учебников и учебных пособий.

Профессор Р.А. Амерханов – автор около 500 учебных, учебно-методических, исследовательских, научных публикаций и патентов. Под его руководством и при его непосредственном участии издан комплекс учебников, учебных пособий и монографий. Так, в 2001 г. вышел первый учебник с грифом Минсельхоза РФ – Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов «Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства» (г. Краснодар), затем в 2002 г. – Р.А. Амерханов, А.С. Бессараб, Б.Х. Драганов, С.П. Рудобашта, Г.Г. Шишко «Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства» (г. Москва).

В 2003 г. была опубликована монография Р.А. Амерханова «Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии», в 2005 г. – другая монография Р.А. Амерханова «Тепловые насосы», а также комплект учебных программ по энергообеспечению сельского хозяйства (г. Москва).

В прошлом году вышли монографии: Р.А. Амерханов, О.В. Григораш, И.Б. Самородов, Б.К. Цыганков, Е.С. Воробьев «Солнечные фотоэлектрические станции» (Краснодар, 2017); Р.А. Амерханов, В.П. Камышанский, Д.А. Козюков, Б.К. Цыганков «Нормативно-техническое и правовое регулирование возобновляемых источников энергии в современных условиях» (Краснодар, 2017).

Материалы научных исследований и полученных патентов нашли своё отражение и в других в учебниках:

– Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов «Теплотехника» (Москва, 2006);

– Р.А. Амерханов, Е.А. Штокман, В.А. Шилов, Е.Е. Новгородская, Т.А. Скорик «Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности» (Москва, 2007);

– Р.А. Амерханов, Г.П. Ерошенко, Е.В. Шелиманова «Эксплуатация теплоэнергетических установок и систем» (Москва, 2008);

– Р.А. Амерханов, В.А. Бутузов, К.А. Гарькавый «Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем» (Москва, 2009);

– Р.А. Амерханов, А.В. Богдан, С.В. Вербицкая, К.А. Гарькавый «Проектирование систем энергообеспечения» (Москва, 2010).

Ранее, по согласованию с Департаментом научно-технологической политики и образования Минсельхоза РФ, заместителем директора Департамента В.Е. Бердышевым на основании запросов КубГАУ, лично Ивана Тимофеевича Трубилина и после соответствующей экспертизы всем учебникам были присвоены грифы «Рекомендовано». Депнаучтехполитика Минсельхоза РФ рекомендовала всем подведомственным Минсельхозу РФ вузам включить в учебный процесс выпускаемые в КубГАУ учебники по данному направлению. Более 56 аграрных и технических вузов России, а также Беларуси, Украины, Казахстана, Армении и Молдовы пользуются этими учебниками.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

По итогам IV и V Всероссийских конкурсов Министерства сельского хозяйства РФ «Аграрная учебная книга» (2009 г., 2011 г.), авторский коллектив под руководством Р.А. Амерханова был удостоен дипломов первой степени за учебники: Р.А. Амерханов и Г.П. Ерошенко, Е.В. Шелиманова «Эксплуатация теплоэнергетических установок и систем» и Р.А. Амерханов, А.В. Богдан, С.В. Вербицкая, К.А. Гарькавый «Проектирование систем энергообеспечения». Эти же учебники были удостоены звания лауреата и премии администрации Краснодарского края за 2010 г. и 2012 г.

Учебные и научные издания принесли доктору технических наук, профессору, заслуженному работнику высшей школы РФ Р.А. Амерханову и возглавляемым им авторским коллективам широкую известность среди ученых и специалистов России.

Результаты исследований научной школы профессора Р.А. Амерханова опубликованы в ведущих международных и российских научных журналах: «Промышленная теплотехника», «Возобновляемая энергетика»; Международном научном журнале «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), «Энергосбережение и водоподготовка», «Известия высших учебных заведений», «Механизация и электрификация сельского хозяйства», «Международный сельскохозяйственный журнал», «Промышленная энергетика», «Теплоэнергетика», «Труды Кубанского государственного аграрного университета» и др.

Профессор Р.А. Амерханов за время деятельности научной школы в области развития возобновляемой энергетики совместно с её участниками опубликовал более 1 100 научных работ, в том числе, более 200 работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

Одним из важных направлений работы научной школы профессора Р.А. Амерханова является подготовка специалистов высшей квалификации – докторов и кандидатов наук. Эти специалисты работают в основном на кафедре электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии КубГАУ и участвуют в системе подготовки инженерных кадров, которые в дальнейшем будут не только обслуживать установки возобновляемой энергетики, но на базе полученных знаний разрабатывать решения технических, экономических, экологических и социальных задач. Кроме того, профессор Р.А. Амерханов и его ученики постоянно выступают в роли официальных оппонентов, а кафедра – ведущей организацией по защите диссертаций по специальностям нетрадиционной и возобновляемой энергетики.

Р.А. Амерханов свою профессиональную деятельность сочетает с общественной деятельностью – является действительным членом Российской инженерной академии (РИА); членом Комитета по проблемам использования возобновляемых источников энергии РИА; Российских академий: промышленной экологии, электротехнических наук (отделение энергетики); с 1992 г. – членом диссертационного совета КубГАУ; с 2013 г. – президентом общественной организации «Общественная академия научно-технического и социального прогресса Краснодарского края имени Б.Н. Пономаренко»

За работы в области образования и науки Р.А. Амерханову были присвоены звания: залуженный деятель науки Кубани (1998 г.), заслуженный работник высшей школы РФ (2004 г.), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2007 г.), Кавалер Ордена Почета РФ (2008 г.), почетный работник по науке и технике РФ (2011 г.); в связи с 70-летием со дня рождения Р.А. Амерханову от имени министра сельского хозяйства РФ А.В. Гордеева выражена Благодарность (2008 г.); награжден почетной грамотой Президента РФ Путина Владимира Владимировича (2014 г.).

На региональном уровне Р.А. Амерханову присуждены премии администрации Краснодарского края (2002 г., 2004г., 2007–2009 гг., 2012 г.). Кроме того, Р.А. Амерханов награжден дипломами Министерства образования и науки края (2002 г., 2003 г., 2005 г., 2007 г., 2008 г., 2010 г.); в связи с 215 годовщиной города Краснодара – памятной медалью «За заслуги» муниципального образования г. Краснодара (2008 г.); за высокий профессионализм, большой научный вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований, в связи с Днем Российской Науки – почетной грамотой главы администрации (губернатора) Краснодарского края (2009 г.); дипломом и памятной медалью «Радетель Краснодара» (2015 г.).

Коллектив кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» и факультета энергетики от всей души поздравляет профессора Роберта Александровича Амерханова с юбилеем – 80-летием. Желаем крепкого здоровья, творческих успехов на благо Родины – России!

О.В. Григораш

Заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 16.02.17. Ред. рег. № 931-1754-1 The article has entered in publishing office 16.02.17. Ed. reg. No. 931-1754-1

УДК 620.9+551.521

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА И ОРИЕНТАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ*

А.Ю. Гаевский, А.Н. Гаевская

НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»
д. 37, пр. Победы, Киев, 03056, Украина
тел./факс: +380 44 204-81-91; тел.: +380 97 570-46-43; e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.015-029

Заключение совета рецензентов: 15.05.17 Заключение совета экспертов: 18.10.17 Принято к публикации: 06.03.18

При расчете и проектировании фотоэлектрических станций (ФЭС) необходимо выбрать оптимальный угол наклона и азимутальную ориентацию солнечных панелей, которые будут во многом определять объем электроэнергии, вырабатываемой будущей ФЭС за оперативный календарный период. Однако, для того чтобы определить эти углы экспериментально путем мониторинга выработки ФЭС с различными фиксированными положениями панелей, потребуется много лет. Поэтому целесообразно разработать модель, которая будет теоретически рассчитывать оптимальные углы наклона и азимута при фиксированном положении панелей. В данной работе в качестве критерия оптимальности этих углов принят максимум суммарного прихода радиации на единицу площади приемной поверхности за календарный период работы ФЭС. Схема расчета применялась для разных периодов: всего года, четырех сезонов года в отдельности и рабочего периода, включающего все месяцы, кроме зимних. В представленном методе исходными данными оптимизации являются географические координаты ФЭС, почасовые суммы прямой и диффузной радиации на горизонтальную плоскость, а также отражательная способность земной поверхности. Эти данные, которые получают путем усреднения многолетних измерений основных компонентов солнечной радиации, являются экспериментальными. Разработанная вычислительная схема основана на нелинейных уравнениях для оптимальных углов наклона панелей, впервые полученных для анизотропных моделей солнечной радиации. Эта схема позволяет рассчитывать оптимальные углы панелей для любого операционного периода генерации ФЭС и для любого региона, в котором имеются соответствующие экспериментальные радиационные данные. В качестве примеров были рассчитаны графики зависимостей среднесуточного прихода радиации от углов положения панелей, а также определены оптимальные фиксированные углы наклона и азимута для шести городов России, находящихся в различных климатических зонах. С помощью данного метода можно оценивать выигрыш в выработке электроэнергии ФЭС при выборе оптимальных углов наклона и азимута панелей, а также перенастраивать углы наклона на оптимальные значения для каждого сезона, если такое предусмотрено конструкцией рядов панелей.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Гаевский А.Ю., Гаевская А.Н. Метод определения оптимального угла наклона и ориентации фотоэлектрических модулей на основе экспериментальных данных солнечной радиации // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):15-29.

Ключевые слова: фотоэлектрические станции; фотоэлектрические модули; солнечные панели; оптимальный угол наклона; азимутальная ориентация; анизотропные модели радиации; суммы радиации; выработка электроэнергии.

A METHOD FOR DETERMINING OF OPTIMAL TILT ANGLE AND ORIENTATION OF PV MODULES BASED ON MEASURED SOLAR RADIANCE DATA

A.Y. Gaevskii, A.N. Gaevskaya

Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Peremogy Av., Kiev, 03056, Ukraine
tel./fax: +380 44 204 8191; tel.: +380 97 570 4643, e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.015-029

Referred 15 May 2017 Received in revised form 18 October 2017 Accepted 6 March 2018

For calculating and designing of photovoltaic (PV) plant, it is necessary to choose the optimal tilt angle and azimuth orientation of solar panels which will largely determine the electricity output produced by future PV plant during an operational calendar period. However, in order to determine these angles experimentally by monitoring the PV plant electricity yield at different panel's positions, it will take many years. Therefore, it is advisable to develop a theoretical model, which a priori calculates the optimal tilt and azimuth angles of panels amounted in fixed positions. This paper assumes the maximum of the total radiation arrival per unit area on the receiving surface over the calendar period of PV plant operation as an optimization criterion for these angles. The calculation scheme has been applied for the whole year, for four year seasons and for a whole year period except winter. In the developed optimization method, the initial data are the geographical coordinates of the PV plant, the hourly sums of direct and diffuse radiation on the horizontal plane, as well as the reflectivity of the earth's surface. These data obtained by averaging the long-term measurements of the main solar radiation components are experimental ones. The developed computational scheme is based on nonlinear equations for the optimal tilt angles of panels first obtained for anisotropic solar radiation models. This scheme allows us to calculate the optimal panel angles for any operational PV plant period and for any region for which experimental radiation data are available. As the examples, we have calculated the graphs of the average daily radiation arrival dependencies on the panel's position angles and have determined the optimal fixed tilt and azimuth angles for six cities of Russia located in different climatic zones. The method allows us to evaluate the gain in the electricity yield of PV plant when choosing the optimum tilt angles and azimuth of the panels, and to adjust the tilt angles to the optimum values for each season if this is envisaged by the PV string design.

Keywords: PV plants; PV modules; solar panels; optimal tilt angle; azimuth orientation; anisotropic models for solar radiation; insolation; power generation.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Александр Юльевич Гаевский
Alexander Gaevskii

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры возобновляемых источников энергии факультета электроэнерготехники и автоматики НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».

Образование: Киевский политехнический институт (1975 г.).

Область научных интересов: возобновляемая энергетика; фотоэнергетика; физика твердого тела; компьютерное моделирование.

Публикации: 125.

h-index: 7

ORCID: 0000-0001-6144-2441

https://scholar.google.com.ua/citations?user=IUr5UlkAAAAJ&hl=ru

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor at the Department of Renewable Energy Sources of Electric Power Engineering and Automatics Faculty, Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, 1975.

Research interests: renewable energy; PV plants; solid state physics; computer simulation.

Publications: 125.

Анна Николаевна Гаевская
Anna Gaevskaya

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры «Электрические станции» факультета электроэнергетики и автоматики НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».

Образование: Киевский политехнический институт (1977 г.).

Область научных интересов: электрические станции; компьютерное моделирование.

Публикации: 16.

ORCID: 0000-0001-7760-6789

Information about the author: Senior Lecturer, Department of Electric Power Stations of Electric Power Engineering and Automatics Faculty, Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, 1977.

Research interests: power plants; computer simulation.

Publications: 16.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

Конструкция и размещение солнечных панелей фотоэлектрической станции (ФЭС), подключенной к сети, должны обеспечивать максимальное использование солнечного излучения для выработки электроэнергии. Количество произведенной за определенный период электроэнергии на единицу приемной поверхности зависит от нескольких факторов: временного профиля излучения, эффективности фотоэлектрических модулей (ФМ), угла наклона и ориентации ФМ, рабочей температуры и температурных характеристик фотоэлементов, характеристик инверторов и остального оборудования ФЭС. Параметрами, которые легко варьируются и не имеют конструктивных ограничений при строительстве сетевых ФЭС, являются наклон и ориентация по азимуту рядов солнечных панелей.

Опубликовано множество работ, посвященных оптимизации угла наклона и ориентации фиксированных солнечных панелей. Эти работы можно разделить на те, в которых оптимальные углы определяются путем непосредственного измерения выработки электроэнергии модулями (например, [1– 3]), и те, в которых тем или иным образом задействованы модели солнечной радиации [4–22], позволяющие оценивать выработку электроэнергии фотоэлектрической системой. Преимущество первого подхода заключается в прямом экспериментальном определении угла наклона для данной местности, но такие эксперименты обычно проводятся за сравнительно короткий промежуток времени, что не позволяет надежно экстраполировать получаемые результаты на продолжительные периоды времени. В рамках второго подхода выработка ФЭС связывается с суммой радиации на приемной поверхности. Несмотря на косвенный характер оценки выработки, второй подход также имеет преимущество – учёт многолетних данных актинометрических измерений. Использование усредненных на различных временных интервалах результатов наземных и спутниковых измерений повышает точность оценок оптимальных углов и, соответственно, эффективность проектируемых ФЭС при больших сроках эксплуатации. Если считать эффективность фотоэлектрического преобразования (КПД) не зависящей от уровня радиации, то за критерий оптимальности фиксированных углов наклона и ориентации фотомодулей можно принять максимум суммарного прихода радиации за календарный период работы ФЭС.

В ранних работах, относящихся к рассматриваемой проблеме, предполагалось, что оптимальный угол наклона β легче всего связать с географической широтой L: например, $\beta_{opt} = L \pm 8^{\circ}$ [4] или $\beta_{opt} = L \pm 15^{\circ}$ [5] (плюс относится к зимнему сезону, минус – к летнему). Многочисленные эмпирические работы посвящены определению соотношения вида $\beta_{opt} = L + a$ (в частности, в [6] оно протестировано для различных регионов Китая). Известны также теоретические обоснования линейной связи оптимального угла наклона и широты местности: так, в работе [7] определены значения коэффициентов линейной регрессии $\beta_{opt} = a_1 + a_2 L$ для городов, расположенных на разных широтах от Стокгольма до Триполи. В рамках указанных подходов солнечные панели считаются, как правило, ориентированными на юг.

В большинстве современных работ, посвященных оценкам оптимальных углов наклона приемных поверхностей, используются, во-первых, та или иная математическая модель радиации на наклонную поверхность и, во-вторых, экспериментальные данные о солнечной радиации с различными временными интервалами усреднения. Среди математических моделей солнечной радиации наиболее известны изотропная модель Лю – Джордана [5, 8] и целый ряд анизотропных моделей (см. обзоры [9, 10]). Примеры расчетов оптимальных углов наклона на основе изотропной модели можно найти в работах [11–19], а на основе анизотропных моделей – в [12, 14–16]. Методы вычисления оптимальных углов могут быть представлены сугубо численными расчетами [15–17, 20], аналитическими решениями задачи оптимизации [11, 12, 18], алгоритмами с нейронными сетями [14], компьютерным моделированием с программами типа TRNSYS [21–22].

Применение той или иной модели радиации обусловлено необходимостью перевода экспериментальных значений, относящихся, как правило, к горизонтальной поверхности [23–25], в значения для наклоненной под произвольным углом поверхности. Переход от горизонтальной к наклонной поверхности легко выполняется для прямой радиации с помощью простых геометрических соотношений [5, 23]. Более сложную задачу представляет вычисление диффузного и отраженного компонентов, для которых и разрабатываются радиационные модели.

В моделях радиации в качестве переменных, зависящих от времени, используются солнечные углы (зенитный и азимутальный), которые меняются в течение светового дня. В связи с этим для корректного расчета суммы радиации за рабочий период ФЭС требуются достаточно подробные экспериментальные данные на минимально возможных временных интервалах отсчетов. Однако такие данные по интересующей местности могут отсутствовать или быть недоступными, тогда на практике прибегают к интегральным данным, например, к усредненному приходу радиации за один день месяца [5]. Известно множество работ по определению оптимального наклона на основе месячных значений сумм радиации [6, 11–12, 15, 17, 19, 20]. Для решения этой задачи подходит и модель ясного неба ASHRAE, в которой прямой и диффузный компоненты выражаются через зенитный угол и эмпирические коэффициенты [26]. Более точные оценки оптимальных углов наклона могут быть получены с помощью радиационных данных, относящихся к коротким временным интервалам (один час и менее).

Поскольку солнечная радиация сильно зависит от сезона, времени суток, облачности и плохо предсказуемых метеорологических факторов, для процедуры оптимизации наклона и азимутальной ориентации ФМ целесообразно использовать наиболее надежные и точные данные наземных долгосрочных измерений [5, 23]. В случае если такие данные для интересующего региона отсутствуют, следует воспользоваться спутниковыми данными NASA. При этом необходимо учитывать, что данным NASA присуща несколько большая погрешность для высоких широт [24], и при наличии облачного покрова с их помощью невозможно точно определить земное альбедо в видимом диапазоне. Накопленные к настоящему времени обширные почасовые данные по солнечной радиации в различных регионах России [25] позволяют определять не только ресурсы солнечной энергии, но и оптимальные конструкционные параметры системы фотомодулей ФЭС. Отметим, что оптимизация углов наклона и азимута ФМ должна выполняться на основе усредненных многолетних данных (не менее 10 лет), получаемых путем обработки измерений почасовых сумм радиации.

В настоящей работе показано, что задача определения оптимальных углов наклона и азимутальной ориентации солнечных панелей может быть решена с достаточной точностью, если по конкретному региону доступны указанные выше усредненные данные. Впервые получены нелинейные уравнения для оптимальных углов наклона в рамках анизотропных моделей радиации: Хея, Хея – Девиса, Рейндла и Ключера [9, 10, 27]. Кроме того, описан алгоритм одновременного определения оптимальных углов наклона и азимута для различных сезонных периодов работы ФЭС. Разработанный метод расчета был реализован авторами в виде пакета программ на языках C++ и MATLAB, который, в отличие от известных коммерческих приложений (см. [21–22]), позволяет решать рассматриваемые оптимизационные задачи в легко контролируемых приближениях, а также вносить необходимые поправки по мере улучшения радиационных моделей.

В качестве примера в рамках рассматриваемых моделей солнечной радиации был впервые выполнен оптимизационный расчет углов наклона и азимута солнечных панелей для ряда городов в различных климатических зонах России. Для этих городов в виде графиков и таблиц представлены полученные зависимости среднесуточного прихода радиации на единицу площади от наклона и азимутальной ориентации панелей.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список обозначений	
Буквы греческого алфавита	
β	Угол наклона солнечной панели
θ	Угол падения прямого солнечного излучения на приемную поверхность
ρ	Отражательная способность земной поверхности
τ	Рабочий период ФЭС
τ_j	Продолжительность светового дня *j*, когда солнечная радиация не равна нулю
ϕ	Зенитный угол
Буквы латинского алфавита	
A	Индекс анизотропии
f	Коэффициент просветления горизонта
I	Интенсивность радиации
E	Сумма радиации
$< E_T >$	Среднесуточный приход радиации на наклонную поверхность в течение рабочего периода
L	Географическая широта

	Продолжение списка обозначений
N	Число дней в рабочем периоде ФЭС
R	Коэффициент транспозиции
t	Момент перехода солнца
$t_{back-front}$	Момент перехода солнца с тыльной на лицевую сторону солнечной панели
$t_{front-back}$	Момент перехода солнца с лицевой на тыльную сторону солнечной панели
Δt	Временной интервал между соседними суточными данными радиации
z	Азимут солнца
z_d	Азимутальный угол солнечной панели
Индексы нижние	
0	Верхняя граница атмосферы
B	Лучевой (прямой) компонент [радиации]
D	Диффузный компонент [радиации]
G	Полная [радиация]
i	Номер временного интервала Δt в течение суток
j	Номер дня календарного года
m	Номер месяца
n	Нормальный компонент [радиации]
opt	Оптимальный
R	Отражённый компонент [радиации]
T	Наклонная плоскость
total	Общая
Индексы верхние	
Hay	Модель Хея
Hay – Dav	Модель Хея – Дэвиса
hz	Вблизи горизонта
iso	Изотропная модель [радиации]
Klucher	Модель Ключера
Liu – Jord	Модель Лю – Джордана
Reindl	Модель Рейндла
sc	Окрестность солнечного диска
Аббревиатуры	
ФМ	Фотоэлектрический модуль
ФЭС	Фотоэлектрическая станция

2. Теоретический анализ

2.1. Анизотропные модели солнечной радиации

Угол наклона β определяется как угол между приемной поверхностью ФМ и горизонтальной плоскостью, а ориентация ФМ, или азимутальный угол z_d, отсчитывается от направления на юг. В настоящей работе эти углы считаются фиксированными и должны обеспечивать максимум прихода радиации на единицу площади приемной поверхности в течение календарного рабочего периода ФЭС.

Пусть рабочий период τ состоит из световых дней длительностью τ_j (когда солнечная радиация не равна нулю). Общая сумма радиации $E_{total,\tau}$ на единицу площади ФМ за рабочий период выражается формулой:

$$E_{total,T} = \sum_j E_{T,j}, \quad \tau = \bigcup_j \tau_j, \tag{1}$$

где $E_{T,j}$ (кВт·ч /м^2) – приход радиации на наклонную поверхность за j-й день, который можно представить в виде интеграла от суммы вкладов основных компонентов радиации:

$$E_{T,j} = \int_{\tau_j} I_{BT}(t) + I_{DT}(t) + I_{RT}(t)\ dt. \tag{2}$$

Здесь I_{BT}, I_{DT} и I_{RT} (кВт /м^2) – интенсивности прямого, диффузного и отраженного компонентов радиации на наклонной поверхности соответственно. При этом компонент I_{BT} выражается через прямую радиацию I_B на горизонтальной плоскости с помощью простого соотношения [5, 27]:

$$I_{BT} = R_B I_B, \quad R_B = \frac{\cos\theta}{\cos\phi}, \tag{3}$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

где R_B – коэффициент транспозиции для прямой радиации; ϕ – зенитный угол; θ – угол падения (угол между нормалью к приемной поверхности и направлением на солнце), определяемый формулой:

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\phi + \sin\beta\sin\phi\cos(z - z_d). \quad (4)$$

Для оценки диффузной радиации I_{DT} на наклонной поверхности будем использовать модели, в которых I_{DT} представляется в виде суммы изотропного диффузного компонента I_{DT}^{iso}, то есть однородного излучения небесной полусферы, и поправок на анизотропию, а именно, свечения в окрестности солнечного диска (circumsolar) I_{DT}^{sc}, которое обусловлено рассеянием излучения вперед, и просветления горизонта (horizon brightening) I_{DT}^{hz}, наиболее выраженного в ясные дни [27, 28]:

$$I_{DT} = I_{DT}^{iso} + I_{DT}^{sc} + I_{DT}^{hz}. \quad (5)$$

Компонент I_{DT}^{iso} оцениваем в рамках изотропной модели Лю – Джордана как [1, 5]:

$$I_{DT}^{iso} = R_D^{Liu-Jord} I_D,\ R_D^{Liu-Jord} = \frac{1+\cos\beta}{2}, \quad (6)$$

где $R_D^{Liu-Jord}$ – коэффициент транспозиции (угловой фактор) для диффузной радиации, зависящий от угла наклона. В данной работе значения I_D являются экспериментальными данными, которые получают путем статистической обработки результатов актинометрических измерений за многолетний период [25]. В рамках изотропной модели вычисляется также отраженный компонент радиации, который связан с полной радиацией $I_G = I_B + I_D$ на горизонтальную поверхность следующим образом:

$$I_{RT} = \rho R_R I_G,\ R_R = \frac{1-\cos\beta}{2}, \quad (7)$$

где R_R – коэффициент транспозиции для отраженной радиации; ρ – земное альбедо.

Анизотропные компоненты диффузной радиации I_{DT}^{sc}, I_{DT}^{hz} будем рассчитывать с помощью нескольких моделей: Хея, Хея – Дэвиса, Рейндла и Ключера [9, 10]. В этих моделях диффузный компонент радиации выражается через коэффициенты транспозиции R_D.

Модель Хея:

$$R_D^{Hay} = AR_B + (1-A)R_D^{Liu-Jordan},\ A = \frac{I_B}{I_0}; \quad (8a)$$

Модель Хея – Девиса:

$$R_D^{Hay-Dav} = AR_B + (1-A)R_D^{Liu-Jordan},\ A = \frac{I_{Bn}}{I_{0n}}; \quad (8b)$$

Модель Рейндла:

$$R_D^{Reindl} = AR_B + (1-A)R_D^{Liu-Jordan}\left(1 + f_R\sin^3\frac{\beta}{2}\right),$$
$$A = \frac{I_B}{I_0},\ f_R = \sqrt{\frac{I_B}{I_G}}; \quad (8c)$$

Модель Ключера:

$$R_D^{Klucher} = R_D^{Liu-Jordan}\ \ 1 + f_K\cos^2\theta\sin^3\phi\ \left(1 + f_K\sin^3\frac{\beta}{2}\right),$$
$$f_K = 1 - \left(\frac{I_D}{I_G}\right)^2, \quad (8d)$$

где A – индекс анизотропии, который интегральным образом описывает анизотропную составляющую диффузной радиации, остальная часть диффузной радиации в моделях Хея и Хея – Дэвиса рассматривается как изотропная. Величины I_{Bn} и I_{0n} в (8b) – нормальные компоненты прямой радиации на приемной поверхности и на верхней границе атмосферы. Слагаемые с коэффициентами f_R в модели Рейндла (8c) и f_K в модели Ключера (8d) описывают вклад от просветления горизонта, который сильно зависит от угла наклона ($\sim \sin^3\frac{\beta}{2}$). Кроме того, в (8d) имеются компоненты с $f_K\cos^2\theta\sin^3\phi$, отвечающие рассеянному излучению от солнечного диска. Следует отметить, что при f_K = 0 (условие ясного неба) имеем $R_D^{Klucher} = R_D^{Liu-Jordan}$.

2.2. Основные формулы оптимизационного расчета

В течение светового дня солнце может освещать как лицевую, так и тыльную сторону ФМ (преимущественно в летние дни). Условием перехода солнца с тыльной стороны ФМ на лицевую (в утренние часы) и обратно (в вечерние часы) является $\cos\theta = 0$ или, согласно (4):

$$\mathrm{tg}\phi\cos(z - z_d) = -\mathrm{ctg}\,\beta. \quad (9)$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Если $\mathrm{tg}\phi\cos(z-z_d)<-\mathrm{ctg}\beta$, то солнце освещает только тыльную сторону, и прямая радиация отсутствует ($I_{BT}=0$); при этом I_{DT}, I_{RT} могут не равняться нулю (например, во время «белой» ночи). В случае $\mathrm{tg}\phi\cos(z-z_d)>-\mathrm{ctg}\beta$ присутствуют все три компонента радиации. Обозначим момент перехода солнца с тыльной стороны на лицевую сторону ФМ как $t_{back-front}$ и момент обратного перехода как $t_{front-back}$. Интеграл (2) для суточного прихода радиации тогда запишем в виде:

$$\begin{aligned} E_T = &\int_{t_{D1}}^{t_{back-front}} I_{DT}(t)+I_{RT}(t)\ dt + \\ &+\int_{t_{back-front}}^{t_{front-ack}} I_{BT}(t)+I_{DT}(t)+I_{RT}(t)\ dt + \\ &+\int_{t_{front-ack}}^{t_{D2}} I_{DT}(t)+I_{RT}(t)\ dt. \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь индекс номера суток j опущен. Моменты t_{D1}, t_{D2} отвечают появлению и исчезновению диффузной радиации в течение дня.

Оптимальные углы наклона β_{opt} и азимута $z_{d,opt}$ панелей должны рассчитываться на основе системы уравнений:

$$\frac{\partial < E_T >}{\partial\beta}=0,\quad \frac{\partial < E_T >}{\partial z_d}=0, \tag{11}$$

где $< E_T >$ – среднесуточная сумма в течение рабочего периода, значение которой определяется следующим образом:

$$< E_T >=\frac{1}{N}E_{total,T},\quad N=\sum_{m\in\tau}N_m, \tag{12}$$

где N – число дней в рабочем периоде τ. Поскольку все компоненты радиации и пределы интегрирования $t_{back-front}$, $t_{front-back}$ в (10) зависят от β, а также от z_d (кроме I_{DT}), система интегральных уравнений (11) может быть решена только численно путем итераций. При этом выбор начальных значений β и z_d для итерационного процесса весьма затруднителен – ошибка может привести к комплексным решениям. Однако для рассматриваемых моделей (8) начальные значения можно получить из аналитических решений уравнений (11) при определенном приближении.

В качестве такого приближения следует пренебречь первым и последним интегралами в выражении (10) ввиду их незначительного вклада, заменить пределы интегрирования $t_{back-front}$, $t_{front-back}$ временем восхода и захода соответственно в те дни, когда солнце не бывает на тыльной стороне панелей, либо заменить эти пределы на моменты времени, когда солнце светит в торец панели ($|\ z-z_d\ |=90^\circ$). Далее необходимо преобразовать интеграл в сумму с учётом того, что обычно доступны экспериментальные почасовые данные, которые являются усредненными для каждого месяца m = 1, 2, …12 (см., например, [25]), то есть интегралы в формуле (1) заменяются приближенной суммой типа $\sum_j\int_{\tau_j}\ldots=\Delta t\sum_{m\in\tau}\sum_i N_m\ldots$, где N_m – число дней в месяце m, а i – номер временного интервала Δt, к которому относятся экспериментальные данные. Выражение для $E_{total,T}$ преобразуется с учетом (3), (6) и (7) следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{total,T} &= \Delta t\sum_{m\in\tau}\sum_i N_m \\ &I_{B,mi}\ \ R_{B,mi}+\rho_m R_{R,mi}\ \ +I_{D,mi}\ \ R_{D,mi}+\rho_m R_{R,mi}\ \ , \end{aligned} \tag{13}$$

где индексы m, i обозначают зависимость соответствующих величин от месяца и номера временного интервала.

Решение уравнений (11) для моделей Хея (8a) и Хея – Дэвиса (8b) при ограничении $|\ z-z_d\ |\le 90^\circ$ приводит к следующим формулам для β_{opt}, $z_{d,opt}$:

$$\beta_{opt}=\mathrm{arctg}\frac{P}{Q_1},\quad z_{d,opt}=\mathrm{arctg}\frac{R}{S}, \tag{14}$$

где

$$P=\sum_m{}'\sum_i\ I_{B,mi}+A_{mi}I_{D,mi}\ \ \mathrm{tg}\,\phi_{mi}\cos\ z_{mi}-z_s\ ; \tag{15a}$$

$$Q_1=\sum_m{}'\sum_i\left[I_{B,mi}(1-\frac{1}{2}\rho_{mi})+\frac{1}{2}I_{D,mi}(1+A_{mi}-\rho_{mi})\right]; \tag{15b}$$

$$R=\sum_m\sum_i I_{Bn,mi}(1+A_{mi})\sin\phi_{mi}\sin z_{mi}\ ; \tag{15c}$$

$$S=\sum_m\sum_i I_{Bn,mi}(1+A_{mi})\sin\phi_{mi}\cos z_{mi}\ . \tag{15d}$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Здесь A_{mi} – коэффициент анизотропии, равный $\frac{I_{B,mi}}{I_{0,mi}}$ для модели Хея и $\frac{I_{Bn,mi}}{I_{0n,mi}}$ – для модели Хея – Дэвиса; z_{mi} – азимут солнца; $\sum_m{}'\ldots$ в (15) – взвешенные суммы с весами, пропорциональными числу дней в месяцах. Если в равенствах (15) положить $A_{mi} = 0$, получим формулы для β_{opt} и $z_{d,opt}$ для изотропной модели Лю – Джордана. Суммирование в формулах (15) выполняется для тех часов, когда солнце не находится на тыльной стороне панелей.

В случае модели Рейндла (8c) выражение для оптимального азимута панелей остается таким же, как и в случае модели Хея, а оптимизационная задача для угла наклона сводится к решению следующего нелинейного уравнения относительно переменной $x = \cos(\frac{\beta}{2})$:

$$P(2x^2-1) - 2Q_1 x\sqrt{1-x^2} - Q_2 x\left(\frac{5}{2}x^4 - \frac{7}{2}x^2 + 1\right) = 0, \quad (16)$$

где P, Q_1 выражаются равенствами (15), (16), а

$$Q_2 = \sum_{m,i}{}' \left(1 - A_{mi}\right) I_{D,mi} f_{R,mi}, \; f_{R,mi} = \sqrt{\frac{I_{B,mi}}{I_{G,mi}}}. \quad (17)$$

Использование анизотропной модели Ключера (8d) приводит к оптимальной азимутальной ориентации как в изотропной модели. Что касается угла наклона, то после громоздких преобразований придем к следующему уравнению относительно $x = \cos(\frac{\beta}{2})$:

$$P(2x^2-1) - 2Q_1 x\sqrt{1-x^2} - \\ - Q_2 x\left(\frac{5}{2}x^4 - \frac{7}{2}x^2 + 1\right) + \Phi(x) = 0, \quad (18)$$

где P, Q_1 и Q_2 задаются равенствами (15a), (15b) и (17) с $A_{mi} = 0$ и $f_{K,mi} = 1 - \left(\frac{I_{D,mi}}{I_{G,mi}}\right)^2$ вместо $f_{R,mi}$. Функция $\Phi(x)$ в (18) задается выражением:

$$\Phi(x) = \sum_m{}' \sum_i{}' I_{D,mi} f_{K,mi} \sin^3 \phi_{mi} \left[B_{1,mi}(x) C_{1,mi}(x) + B_{2,mi}(x) C_{2,mi}(x)\right]. \quad (19)$$

Здесь вводятся следующие обозначения и функции:

$$B_{1,mi}(x) = f_{K,mi} x\left(\frac{5}{2}x^4 - \frac{7}{2}x^2 + 1\right) - x\sqrt{1-x^2}; \quad (20a)$$

$$B_{2,mi}(x) = x^2\left[1 + f_{K,mi}\left(1 - x^2\right)\sqrt{1-x^2}\right]; \quad (20b)$$

$$C_{1,mi}(x) = 4D_{1,mi}x^2\left(x^2 - 1\right) + \\ + 2D_{2,mi}x\left(2x^2 - 1\right)\sqrt{1-x^2} + \cos^2\phi_{mi}; \quad (20c)$$

$$C_{2,mi}(x) = D_{2,mi}\left(8x^4 - 8x^2 + 1\right) - \\ - 4D_{1,mi}x\left(2x^2 - 1\right)\sqrt{1-x^2}; \quad (20d)$$

$$D_{1,mi} = \cos^2\phi_{mi} - \cos^2\left(z_{mi} - z_d\right)\sin^2\phi_{mi}; \quad (20e)$$

$$D_{2,mi} = \cos\left(z_{mi} - z_d\right)\sin 2\phi_{mi}. \quad (20f)$$

Для решения полученных нелинейных уравнений (16), (18) в работе применялся хорошо известный метод Ньютона – Рафсона. Результаты этих расчетов использовались в качестве первого приближения при решении систем уравнений (11).

3. Результаты расчетов и их обсуждение

С помощью начальных значений β и z_d, получаемых путем решения приведенных выше уравнений (14)–(20), в работе были рассчитаны оптимальные углы наклона β_{opt} и азимут $z_{d,opt}$ как итерационные решения уравнений (11). В качестве рабочих периодов ФЭС были выбраны сезоны (весна, лето, осень, зима) и круглый год. Расположение ФЭС было задано вблизи городов Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, Астрахань, Иркутск, Якутск. Значительные расстояния между этими городами и различные условия солнечной радиации приводят к существенным отличиям значений β_{opt}, $z_{d,opt}$. В таблицах 1–6 представлены результаты расчета для изотропной модели (LJ – Liu-Jordan) и анизотропных моделей (H – Hay, HD – Hay – Davies, R – Reindl, K – Klucher) радиации. Параметры, входящие в уравнения для оптимальных углов, были рассчитаны на основе почасовых данных для компонентов радиации [25].

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 1

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Санкт-Петербурга (Воейково, Ш = 60,0°, Д = 30,7°)

Table 1

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Saint-Petersburg (Voeikovo, Latitude = 60.0° N, Longitude = 30.7° E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	77,8	79,8	79,3	81,3	76,4	–10,2	–11
3-5 – весна	40,2	43,5	44,2	46,6	44,5	–18,8	–19,2
6-8 – лето	25,5	28,0	29,0	29,9	29,1	–28,8	–28,0
9-11 – осень	54,6	58,0	58,.4	61,2	57,7	–14,7	–15,2
3-11– кроме зимы	35,5	38,8	39,8	41,5	39,9	–21,5	21,0
1-12 – весь год	37,8	41,5	42,5	42,0	42,0	–19,5	–19,8

Таблица 2

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Москвы (Одинцово, Ш = 55,8°, Д = 37,6°)

Table 2

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Moscow (Odintsovo, Latitude = 55.8°N, Longitude = 37.6°E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	76,5	78,2	77,5	80,4	74,5	0,5	0,5
3-5 – весна	36,2	39,2	40,0	42,5	39,8	–5,1	–5,0
6-8 – лето	21,3	23,3	24,0	24,6	23,2	–15,8	15,0
9-11 – осень	52,5	55,7	56,0	59,2	55,8	–2,8	–2,8
3-11– кроме зимы	32,0	35,0	35,8	37,5	35,8	–8,0	–7,5
1-12 – весь год	35,7	39,2	40,2	40,0	40,0	–6,2	–5,5

Таблица 3

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Краснодара (Ш = 45,0°, Д = 39,0°)

Table 3

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Krasnodar (Latitude = 45.0°N, Longitude = 39.0°E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	57,0	60,3	60	63,5	59,5	–0,2	–0,1
3-5 – весна	24,5	27	27,5	28,6	27,4	–4,5	–3
6-8 – лето	14,5	16,2	16,8	16,8	15,5	–14,0	–14,0
9-11 – осень	45,4	48,5	48,6	50,7	48,4	–1,8	–1,2
3-11– кроме зимы	25,3	28,0	28,5	29,4	28,2	–5,0	–5,0
1-12 – весь год	28,8	31,8	32,5	32,5	32,5	–3,8	–3,5

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 4

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Астрахани (Ш = 46,0°, Д = 48,0°)

Table 4

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Astrakhan (Latitude = 46.0°N, Longitude = 48.0°E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	63,0	65,7	65,5	68,1	64,0	1,0	1,0
3-5 – весна	27,5	29,8	30,5	31,5	29,8	–3,0	–2,8
6-8 – лето	16,0	17,7	18,3	18,2	16,5	–9,0	–10,0
9-11 – осень	49,0	51,5	52,0	53,5	51,2	–0,5	–0,4
3-11– кроме зимы	28,0	30,5	31,2	32,0	31,5	–3	–2,5
1-12 – весь год	31,9	34,8	35,5	35,0	35,0	–1,8	–1,8

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 5

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Иркутска (Ш = 52,3°, Д = 104,3°)

Table 5

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Irkutsk (Latitude = 52.3°N, Longitude = 104.3°E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	71,8	74,0	73,7	75,5	71,1	2,0	2,0
3-5 – весна	34,2	37,0	37,6	38,9	36,8	–0,5	–0,5
6-8 – лето	20,2	21,8	22,5	22,9	21,5	3,0	3,0
9-11 – осень	55,0	58,2	58,5	60,2	57,0	3,0	3,0
3-11– кроме зимы	33,8	36,7	37,5	38,7	36,8	2,0	2,0
1-12 – весь год	38,7	42,3	42,8	42,5	42,0	2,0	2,0

Таблица 6

Оптимальные углы β_{opt} и $z_{d,opt}$ для Якутска (Ш = 62,0°, Д = 129,7°)

Table 6

The optimum angles β_{opt} and $z_{d,opt}$ for Yakutsk (Latitude = 62.0°N, Longitude = 129.7°E)

Месяцы – рабочий период	β_{opt} (изотропная и анизотропные модели)					$z_{d,opt}$	
	LJ (изо)	H	HD	R	K	LJ	HD
1, 2, 12 – зима	81,2	82,5	82,2	83,5	79,1	2,8	2,2
3-5 – весна	49,5	52,5	53,5	55,5	51,8	3,0	–2,8
6-8 – лето	26,8	29,0	30,7	30,7	29,5	–8,0	–8,5
9-11 – осень	62,4	66,2	66,2	68,4	63,7	–0,6	–0,5
3-11– кроме зимы	42,0	45,8	46,8	48,2	45,5	–4,0	–3,5
1-12 – весь год	45,0	49,3	50,2	48,0	48,0	–2,8	–2,2

При сравнении значений β_{opt}, полученных с помощью различных моделей радиации, следует учитывать основное отличие изотропных моделей от анизотропных. В изотропных моделях рассеянное излучение равномерно распределено по небосводу, и максимум его поступления на приемную поверхность наблюдается при $\beta = 0$, в то время как прямое излучение (без рассеяния) будет максимально при $\cos\theta = 1$, то есть когда $z_d = z$ и $\beta = \phi$. В анизотропных моделях часть диффузной радиации связана с направлением на источник через слагаемые, пропорциональные $\cos\theta$ (компоненты с R_B в формулах (8a) – (8c) и с множителем $\cos^2\theta$ в (8d)). Поэтому вклад однородного рассеянного излучения в общую сумму радиации в анизотропных моделях меньше, чем в изотропных. Соответственно, углы β_{opt} в табл. 1–6 для всех городов и рабочих периодов, которые рассчитаны в анизотропных моделях Хея – Дэвиса, Рейндла и Ключера, больше, чем в изотропной модели Лю – Джордана.

Исходя из данных таблиц, значения β_{opt}, полученные на основе различных анизотропных моделей, хорошо согласуются между собой. Более высокие значения β_{opt} для всех регионов и рассмотренных рабочих периодов дают, как правило, модель радиации Рейндла. К меньшим значениям приводит модель Ключера или модель Хея. Количественная оценка разброса значений β_{opt}, полученных с помощью разных моделей радиации, приведена в табл. 7.

Табл. 7

Различие в оценках β_{opt} анизотропных моделей радиации

Table 7

The difference in the β_{opt} estimates for anisotropic radiation models

Месяцы – рабочий период	$\lvert\beta_{opt,\max} - \beta_{opt,\min}\rvert / \beta_{opt,\max}$, %					
	С-Петербург	**Москва**	**Краснодар**	**Астрахань**	**Иркутск**	**Якутск**
1, 2, 12 – зима	6,0	7,3	6,3	6,0	5,8	5,3
3-5 – весна	6,7	7,8	5,6	5,4	5,4	6,7
6-8 – лето	3,0	5,7	7,7	9,8	6,1	5,5
9-11 – осень	5,7	5,9	4,5	4,3	5,3	6,9
3-11– кроме зимы	6,5	6,7	4,8	4,7	5,2	5,6
1-12 – весь год	2,4	2,5	2,2	2,0	1,9	4,4

В этой таблице для различных сезонных периодов указаны значения $\lvert\beta_{opt,\max} - \beta_{opt,\min}\rvert / \beta_{opt,\max}$ (%), полученные в результате расчетов на основе анизотропных моделей. Наименьшие различия в результатах разных моделей наблюдаются для календарного периода «весь год». Причем эти различия минимальны (≤ 2 %) для городов с большой среднесуточной суммой радиации (Астрахань, Иркутск), которая превышает 4 кВт·ч/м^2 при оптимальных углах наклона и азимута (см. рис. 1). Несколько большие расхождения по β_{opt} «весь год» получены для городов с меньшим уровнем инсоляции. Это можно объяснить тем, что для этих городов характерна большая доля рассеянной радиации и, следовательно, сильнее проявляются различия в результатах, получаемых на основе анизотропных моделей.

Что касается азимутальной ориентации панелей, то три анизотропные модели (H, HD и R) дают практически одинаковые результаты $z_{d,opt}$ для всех рабочих периодов (в табл. 1–6 эти данные приведены для модели Хея – Дэвиса). Это связано с тем, что от азимута z_d в этих моделях зависит только прямая радиация (2)–(7), которая представляется одинаковым образом. Расчет показывает, что правильная ориентация панелей по азимуту приводит к увеличению годовой суммы радиации примерно на $1 \div 1{,}5$ % по сравнению с ориентацией строго на юг ($z_d = 0$). Отличия между данными по $z_{d,opt}$, полученными с помощью изотропной и какой-либо анизотропной модели, незначительны.

На рис. 1 для различных регионов приведены контурные графики поверхности среднесуточного прихода радиации $< E_T >$ (12) за рабочий период «весь год», которые получены на основе модели Ключера (8d).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

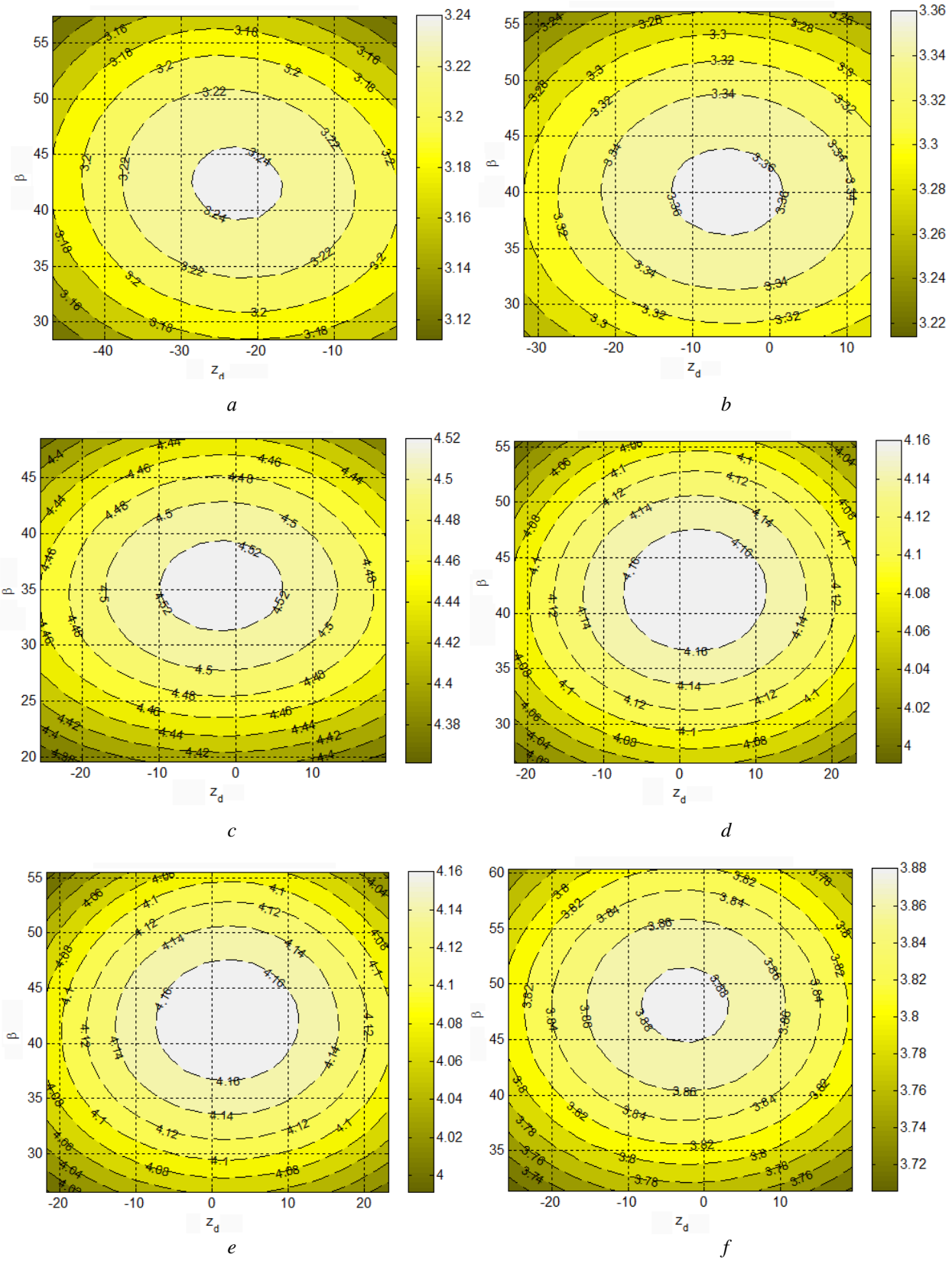


Рис. 1 – Контурные графики для среднесуточных сумм радиации (кВт·ч/м^2) за годовой период в координатах «азимут – угол наклона» (градусы) для городов: *a* – Санкт-Петербург (Воейково); *b* – Москва (Одинцово); *c* – Краснодар; *d* – Астрахань; *e* – Иркутск; *f* – Якутск

Fig. 1 – The contour plots for the daily insolation (kWh/m^2) on dependence of azimuth and tilt angle (degree) for cities: *a* – St. Petersburg (Voeikovo); *b* – Moscow (Odintsovo); *c* – Krasnodar; *d* – Astrakhan'; *e* – Irkutsk; *f* – Yakutsk

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Приведенные графики позволяют оценить оптимальные углы наклона и азимут, а также скорость убывания суммы радиации при отклонении от максимума в координатах «азимут – наклон». Поскольку область максимальной инсоляции на графиках менее протяженная для северных регионов (Санкт-Петербург, Якутск), они оказываются более критичными к выбору оптимальных углов, чем южные регионы.

4. Заключение

Выработка электроэнергии ФЭС непосредственно зависит от прихода радиации за рабочий период. В настоящей статье предложен итерационный метод расчета радиационных сумм на основе изотропной и ряда анизотропных моделей солнечной радиации. Первое приближение для итераций дается полученными в работе аналитическими решениями для углов наклона и азимута; в ходе последующих итераций находится решение системы нелинейных уравнений для β_{opt} и $z_{d,opt}$. Параметры этих уравнений выражаются через почасовые суммы прямой и диффузной радиации, которые являются усредненными величинами за многолетний период. Предложенный метод позволяет определить оптимальные углы для любого сезонного периода работы ФЭС: круглый год, летом, зимой и в отдельные месяцы.

Расчет оптимальных углов наклона для ФЭС, работающей круглый год, показал, что результаты анизотропных моделей отличаются от результатов изотропной модели на $3 \div 5$ градусов в большую сторону (для северных городов расхождение между моделями больше, чем для южных). Между результатами, полученными в рамках анизотропных моделей, имеется значительно большее согласие, а именно: расхождения для годового рабочего периода не превышают двух градусов, а для всех рабочих периодов и рассмотренных регионов расхождения лежат, как правило, в пределах $5 \div 7$ %. Таким образом, при оптимизации фиксированных углов солнечных панелей и при расчете планируемой выработки электроэнергии ФЭС предпочтительно использовать именно анизотропные модели.

Сравнение радиационных сумм $< E_T >$, представленных в виде контурных графиков на плоскости $z_d - \beta$, показывает, что к выбору оптимальных углов наклона и ориентации следует более тщательно подходить в случае северных регионов с большой долей диффузного компонента радиации, поскольку для этих регионов $< E_T >$ быстрее спадает при удалении от максимума, чем в случае южных регионов.

Неточность в выборе углов наклона ФМ порядка ±10 % приводит к потерям среднесуточного поступления радиации около 1,6 % для Якутска, 1,2 % для Санкт-Петербурга и менее 1 % для остальных рассмотренных городов. Потери в поступлении радиации возрастают при неточной азимутальной ориентации, например, если к отклонениям β от оптимальных значений на ±10 % добавляются неточности в азимутальной ориентации на ±20 % (что весьма распространено на практике), то радиационные потери составят примерно 2,5 % для всех шести городов. В случае неоптимального выбора углов, несмотря на небольшую относительную долю радиационных потерь (например, ~2,5%) в общем поступлении радиации на наклонные поверхности ФМ, радиационные потери могут привести к существенному недобору генерируемой энергии. Так, для ФЭС с годовой генерацией 10^4 МВт·ч (установочная мощность порядка 10 МВт) недобор энергии составит ~250 МВт·ч. Если учесть, что установка под оптимальными углами рядов фотомодулей больших ФЭС при их свободном размещении на плоских земельных участках не требует дополнительных финансовых затрат, кроме затрат на тщательный расчет при проектировании, то очевиден значительный экономический эффект от правильной конструкции рядов ФМ. Следует также отметить, что приведенные выше оценки (см. рис. 1) относятся к работе ФЭС на протяжении календарного года. Если же ФЭС работает только в благоприятные месяцы (летом либо летом и в межсезонье), то выигрыш от оптимального выбора наклона и азимута ФМ станет более ощутимым.

Список литературы

[1] Koronakis P. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area [Text] / P. Koronakis // Sol. Energy. – 1986. – Vol. 36. – P. 217–225.

[2] Kaldellis J. Experimental investigation of the optimum photovoltaic panel's tilt angle during the summer period [Text] / J. Kaldellis, D. Zafirakis // Energy. – 2012. – Vol. 38. – P. 305–314.

[3] Le Roux, W.G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data [Text] / W.G. Le Roux // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 96. – P. 603–612.

[4] Lewis, G. Optimum tilt of solar collectors [Text] / G. Lewis // Solar and Wind Technology. – 1978. – Vol. 4. – P. 407–410.

[5] Даффи, Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии [Текст] / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман – М.: Мир, 1977. – 420 с.

[6] Tang, R. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China [Text] / R. Tang, T. Wu // Appl. Energy. – 2004. – Vol. 79. – P. 239–248.

[7] Calabrò, E. An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation [Text] / E. Calabrò // Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 307547. – 12 pages.

[8] Liu, B.Y.H. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator [Text] / B.Y.H. Liu, R.C. Jordan // Trans ASHRAE. – 1962. – Vol. 67. – P. 526–541.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[9] Loutzenhiser, P.G. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation [Text] / P.G. Loutzenhiser, H. Manz [et al.] // Solar Energy. – 2007. – Vol. 81. – P. 254–267.

[10] Noorian, A.M. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces [Text] /Ali M. Noorian, I. Moradi, G. Ali Kamali // Renewable Energy. – 2008. – Vol. 33. – P. 1406–1412.

[11] Balouktsis, A. On the optimum tilt angle of a photovoltaic array [Text] / A. Balouktsis, D. Tsanakas, G. Vachtsevanos // Sol. Energy. – 1987. – Vol. 5. – P. 153–69.

[12] Rahman, M.M. Computation of solar radiation tilt factor and optimum tilt angle for Bangladesh [Text]/ M.M. Rahman, S. Shareef // Indian Journ. of Radio & Space Physics. – 2000. – Vol. 29. – P. 37 –40.

[13] Chang, T.P. Study on the optimal tilt angle of solar collector according to different radiation types [Text] / T.P. Chang // Int. Journ. of Applied Science and Engineering. – 2008. – Vol. 6. – P. 151–161.

[14] Mehleri, E.D. Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays [Text] / E.D. Mehleri, P.L. Zervas [et al.] // Renew. Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 2468–2475.

[15] Benghanem, M. Optimization of tilt angle for solar panel: case study for Madinah, Saudi Arabia [Text] / M. Benghanem //Appl. Energy. – 2011. – Vol. 88. – P. 1427–1433.

[16] Stanciu, C. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models [Text] / C. Stanciu, D. Stanciu // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 81. – P. 133–143.

[17] Kaddoura, T.O. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia [Text] / T.O. Kaddoura, A.M. Makbul [et al.] //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 65. – P. 626 – 634.

[18] Гаевский, А.Ю. Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей [Текст] / А.Ю. Гаевский, О.В. Ушкаленко // Відновлювана енергетика. – 2016. – № 1 (44). – С. 21–27.

[19] Zang, H. Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China [Text] / H. Zang, M. Guo [et al.] // Sustainability. – 2016. – Vol. 8. – P. 654–669.

[20] Armstrong, S. A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions [Text] / S. Armstrong, W.G. Hurley // Renewable Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 780–787.

[21] Hussein, S. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations [Text] / H.M.S. Hussein, G.E. Ahmad and H.H. El-Ghetany // Energy Convers Manage. – 2004. – Vol. 45. – P. 2441–2452.

[22] Mondol, J.D. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system [Text] / J.D. Mondol, Y.G. Yohanis [et al.] // Renewable Energy. – 2007. – Vol. 32. – P. 118–140.

[23] Виссарионов, В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика [Текст] / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова и др. – М.: МЭИ, 2008. – 276 с.

[24] NASA Surface meteorology and Solar Energy: Methodology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ceoe.udel.edu/File%20Library/Research/Wind%20Power/SSE_Methodology.pdf – (Дата обращения: 09.02.2017).

[25] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуски 3 – 24/ под ред. Е.П. Борисенкова, Н.В. Кобышевой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988 –1991.

[26] Yasin, A.S. General polynomial for optimizing the tilt angle of flat solar energy harvesters based on ASHRAE clear sky model in mid and high latitudes [Text] / A.S. Yasin, N.Y. Fathi, A. Khaled Ali // Energy and Power.– 2016. – Vol. 6. – P. 29 –38.

[27] Kalogirou, S.A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems [Text] / S.A. Kalogirou. – London: Academic Press, 2009 – 760 p.

[28] Loutzenhiser, P.G. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation [Text] / P.G. Loutzenhiser, H. Manz // Solar Energy. – 2007. – Vol. 81. – P. 254–267.

Referenses

[1] Koronakis P. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Sol. Energy*, 1986;36:217–225.

[2] Kaldellis J., Zafirakis D. Experimental investigation of the optimum photovoltaic panel's tilt angle during the summer period. *Energy*. 2012;38:305–314.

[3] Le Roux W.G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. *Renewable Energy*, 2016;96:603–612.

[4] Lewis G. Optimum tilt of solar collectors. *Solar and Wind Technology*, 1978;4:407–410.

[5] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition – John Wiley & Sons, Inc., 2013, 936 p.

[6] Tang R., Wu T. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China. *Appl. Energy*, 2004;79:239–248.

[7] Calabrò E. An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation. *Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy*, 2013;2013:Article ID 307547.

[8] Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *Trans ASHRAE*, 1962;67:526–541.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[9] Loutzenhiser P.G., Manz H. et al. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 2007;81:254–267.

[10] Noorian A.M., Noorian Ali M, Moradi I., Ali Kamali G. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 2008;33:1406–1412.

[11] Balouktsis A.,Tsanakas D., Vachtsevanos G. On the optimum tilt angle of a photovoltaic array. *Sol. Energy*, 1987;5:153–69.

[12] Rahman M.M., Sharee f S. Computation of solar radiation tilt factor and optimum tilt angle for Bangladesh. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 2000;29:37–40.

[13] Chang T.P. Study on the optimal tilt angle of solar collector according to different radiation types. *Int. Journ. of Applied Science and Engineering*, 2008;6:151–161.

[14] Mehleri E.D., Zervas P.L. et al. Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. *Renew. Energy*, 2010;35:2468–2475.

[15] Benghanem M. Optimization of tilt angle for solar panel: case study for Madinah, Saudi Arabia. *Appl Energy*, 2011;88:1427–1433.

[16] Stanciu C., Stanciu D. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, 2014;81:133–143.

[17] Kaddoura T.O., Makbul A.M. et al. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;65:626–634.

[18] Gaevskii A.Y., Ushkalenko O.V. Opredelenie optimalnyh uglov naklona fotoelectricheskih paneley. *Vidnovlyuval'na energetika*, 2016;1(44):21–27(in Russ).

[19] Zang H.,M., Guo M. et al. Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China. *Sustainability*, 2016;8:654–669.

[20] Armstrong S., Hurley W.G. A new methodology to optimize solar energy extraction under cloudy conditions. *Renewable Energy,* 2010;35:780–787.

[21] Hussein H. M. S., Ahmad G. E., El-Ghetany H. H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy Convers Manage*, 2004;45:2441–2452.

[22] Mondol J.D., Yohanis Y.G. et al. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 2007;32:118–140.

[23] Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetzova V.A. et al. Solar energy (Solnechnaya energetika). Moscow: MEI, 2008; 276 p. (in Russ).

[24] NASA Surface meteorology and Solar Energy: Methodology. https://www.ceoe.udel.edu/File%20Library/Research/Wind%20Power/SSE_Methodology.pdf (09.02.2017).

[25] Borisenkov E.P., Kobisheva N.V. Scientific and Applied Handbook on Climate of the USSR (Nauchno-pricladnoi spravochnik po klimatu SSSR): Seriya 3 Mnogoletnie Dannye, issues 3–24, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988–1991 (in Russ).

[26] Yasin A.S., Fathi N.Y., Khaled Ali. General polynomial for optimizing the tilt angle of flat solar energy harvesters based on ASHRAE clear sky model in mid and high latitudes. *Energy and Power*, 2016;6:29–38.

[27] Kalogirou, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. London: Academic Press, 2009, 760 p.

[28] Loutzenhiser P.G. ,Manz H. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*. 2007; 81:254–267.

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

]Статья поступила в редакцию 25.01.18. Ред. рег. № 1287-2604-1 The article has entered in publishing office 25.01.18. Ed. reg. No. 1287-2604-1

УДК: 62-503.54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕТРО-ВОДОРОДНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ*

Е.В. Соломин[1], И.М. Кирпичникова[1], Р.А Амерханов[2], Д.В. Коробатов[1], М. Лутовац[3], А.С. Мартьянов[1]

[1]Южно-Уральский государственный университет
д. 76, пр. Ленина, Челябинск, 454080, Россия
тел./факс: +7(912)317-18-05; e-mail: martyanov_andrey@mail.ru
[2] Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина
д. 13, ул. Калинина, Краснодар, 350044, Россия
тел.: +7(861)221-58-54; e-mail: energyksau@mail.ru
[3]Факультет Белградского союзного университета
Сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
e-mail: gsmmitar@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054

Заключение совета рецензентов: 30.01.18 Заключение совета экспертов: 06.02.18 Принято к публикации: 14.02.18

Представлен проект по созданию автономного энергокомплекса на основе ветроэнергетической установки и водородного модуля мощностью 3 кВт с дальнейшим тиражированием до 50 кВт. Показаны возможности эксплуатации данного комплекса в самых разных климатических условиях России: Сибири, Дальнего Востока, Северного Кавказа, Краснодарского края, – а также для универсального использования в климатических зонах Арктики и Антарктики, пустынях Африки и изолированных островов с характерными разрушительными морскими соляными туманами.

Проведены изучение, комплексный анализ и сравнение известных типов и классов ветроэнергоустановок, в результате которых представлена разработанная авторами инновационная многоярусная масштабируемая вертикально-осевая ветроэнергетическая установка. Эта установка использовалась в качестве основного источника питания, бесперебойная часть которого базируется на циклически работающем водородном модуле, содержит электролизер, систему топливных элементов и накопитель водорода с системой коммуникаций и управления. Компоненты разработанной авторским коллективом силовой установки функционируют на едином напряжении постоянного тока и могут подключаться к общей шине с увеличением мощности энергокомплекса. Гибкие алгоритмы управления позволили оптимизировать работу энергокомплекса для снижения частоты пусков-остановов, тем самым увеличив и срок эксплуатации, и временные промежутки между ремонтным обслуживанием. Дистанционное управление обеспечило контроль и управление процессами выработки электроэнергии и хранения водорода с помощью Интернет-технологий в длительных режимах.

Исследования показали, что данное оборудование является долговечным, надежным и экологически безопасным, система – модульной и гибкой, так как легко масштабируется под конкретного потребителя, включая персональное энергопотребление и малый бизнес. Кроме того, разработанный энергокомплекс является доступным по стоимости приобретения, монтажа и эксплуатации для удаленных потребителей энергии, поскольку оценочная стоимость оборудования коррелирует со стоимостью установки линии электропередачи, а эксплуатация оборудования не требует значительных инженерных и технических навыков.

Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Амерханов Р.А., Коробатов Д.В., Лутовац М., Мартьянов А.С. Использование ветро-водородного комплекса бесперебойного энергоснабжения в различных климатических условиях // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):30-54.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Ключевые слова: ветроэнергетика; источник бесперебойного питания; водородный носитель; возобновляемая энергия; производство электроэнергии; вертикально-осевая ветроэнергетическая установка; оптимальный многоярусный ротор; масштабируемая; гибкая; модульная.

THE USE OF WIND-HYDROGEN UNINTERRUPTED POWER SUPPLY PLANT IN DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS

E.V. Solomin[1], I.M. Kirpichnikova[1], R.A. Amerkhanov[2], D.V. Korobatov[1], M. Lutovats[3], A.S. Martyanov[1]

[1]South-Urals State University
76 Lenin St., Chelyabinsk, 454080, Russia
tel./fax: +7 912 317 18 05, e-mail: martyanov_andrey@mail.ru
[2] Kuban State Agrarian University
13 Kalinina St., Krasnodar, 350044, Russia
tel.: +7 988 242 63 30, e-mail: energyksau@mail.ru
[3]Faculty of Business and Industrial Management
Belgrade, Serbia
e -mail: gsmmitar@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054

Referred 30 January 2018 Received in revised form 6 February 2018 Accepted 14 February 2018

The paper presents the project of the autonomous power complex on the basis of wind-power plant and hydrogen module with a capacity in 3 kW with further replication to 50 kW and shows the possibilities of operation of the present plant in different climatic conditions of Russia: Siberia, the Far East, the Northern Caucasus, Krasnodar territory, and also for universal use in climatic zones of the Arctic and Antarctic, deserts of Africa and the isolated islands with typical destructive sea salt fogs.

This paper carries out the study, comprehensive analysis and comparison of known types and classes of wind plants, as a result of which the authors have developed an innovative multi-tier scalable vertically-axial wind power plant. This unit is used as the main power source, the uninterrupted part of which is based on a cyclically operating hydrogen module, contains an electrolytic cell, a fuel cell system and a hydrogen storage device with a communication and control system. The components of the power plant developed by the authors' team operate at a single DC voltage and can be connected to a common bus bar with an increase of power in this complex. Flexible control algorithms allow optimizing the operation of the power complex to reduce the start-stop frequency, thereby increasing both the service life and time intervals between maintenance. Remote control provides monitoring and management of electricity output processes and hydrogen storage with the help of Internet technologies in long-term modes.

The study has shown that this equipment is long-lived, reliable and environmentally friendly, and the system is modular and flexible because it is easily scaled under consumer's control including the personal power consumption and small business. Moreover, the developed power plant is accessible in purchase, mounting and operation for remote energy consumers as far as the assessed value of equipment is correlating with the cost of power line installation and the operation of equipment does not require large engineering and technological skills.

Keywords: wind energy; hydrogen based uninterruptible power supply; renewable energy; power generation; vertical axis wind turbine; optimal multi-tier development; scalable flexible modular.

Евгений Викторович Соломин
Evgeny Solomin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Будапештский технический университет (1990 г.).

Область научных интересов: ветроэнергетика; солнечная энергетика; распределенная энергетика; возобновляемые источники энергии; гибридные энергокомплексы.

Публикации: более 200.
h-index (РИНЦ):12
h-index (Скопус): 4

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor at Electric Stations, Grids and Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Budapest Technical University, 1990.

Research interests: wind power; solar power; distributed power; renewable energy; combine energy complexes.

Publications: more than 200.
SPIN-код: 7191-4503
ResearcherID: A-2409-2014
Scopus ID: 56497029400

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Ирина Михайловна Кирпичникова
Irina Kirpichnikova

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (1979 г.).

Область научных интересов: ветроэнергетика; солнечная энергетика; распределенная энергетика; возобновляемые источники энергии; гибридные энергокомплексы.

Публикации: более 150.
h-index (РИНЦ):6
h-index (Скопус): 2
SPIN-код: 4553-2206

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor at the Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University.

Education: Chelyabinsk Institute of Mechanical and Electric Engineering in Agriculture, 1979.

Research interests: wind power; solar power; distributed power; renewable energy; combine energy complexes.

Publications: more than 150.
Researcher ID: A-3968-2014
Scopus ID: 55979971200

Роберт Александрович Амерханов
Robert Amerkhanov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина.

Образование: Краснодарский институт пищевой промышленности (1960 г.).

Область научных интересов: энергосбережение естественных ресурсов при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе.

Публикации: около 500.
h-index (РИНЦ): 15
h-index (Скопус): 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Department of Electric Technology, Heat Technology and Renewable Sources of Energy, Kuban State Agrarian University.

Education: Krasnodar Institute of Food Industry, 1960.

Research interests: energy saving of natural resources under usage of non-traditional and renewable sources of energy in agro-industrial complex.

Publications: more than 500.
SPIN-код: 4139-7234
Scopus ID: 55480629300

Денис Владимирович Коробатов
Denis Korobatov

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский государственный технический университет (1997 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; ветроэнергетика; системы управления; контроллеры; электроприводы; накопители энергии; электрические машины.

Публикации: более 50.
h-index (РИНЦ):4
h-index (Скопус): 3
SPIN-код: 1307-5453

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Electric Stations, Grids and Electric Supply Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Chelyabinsk State Technical University, 1997.

Research interests: renewable energy sources; wind power engineering; control system; controllers; electric drives; energy storage; electric machine.

Publications: more than 50.
ResearcherID: G-8755-2014
Scopus ID: 55229369300

Митар Лутовац
Mitar Lutovac

Сведения об авторе: академик, профессор, доцент Факультета бизнеса и промышленного менеджмента Белградского союзного университета.

Образование: магистратура технического факультета (2008 г.).

Область научных интересов: информационные технологии; ВИЭ.

Публикации: более 35.

Information about the author: Acad., Professor, Docent, Faculty of Business and Industrial Management, University Union Belgrade.

Education: magistracy of Faculty, 2008.

Research interests: information technology; RES.

Publications: more than 35.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Андрей Сергеевич Мартьянов
Andrey Martyanov

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского гос. университета.

Образование: Челябинский государственный технический университет (1997 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; ветроэнергетика; системы управления; контроллеры; электроприводы; накопители энергии; электрические машины.

Публикации: более 50.
h-index (РИНЦ): 8
h-index (Скопус): 3

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Electric Stations, Grids and Systems Dept. of South Ural State University.

Education: Chelyabinsk State Technical University, 1997.

Research interests: renewable energy sources; wind power engineering; control system; controllers; electric drives; energy storage; electric machine.

Publications: more than 50.
SPIN-код: 7745-3958
ResearcherID: A- 3902-2014
Scopus ID: 57170580600

1. Введение

В условиях непредсказуемых изменений климата до сих пор не найдены ответы на вопросы: насколько виновно человечество в этих глобальных изменениях; надолго ли хватит запасов ископаемого топлива; так ли судьбоносны выбросы CO/CO_2 и другие. Дискуссии по этим темам являются противоречивыми, часто лоббируются крупными корпорациями, однако ученые, инженеры и, наконец, человечество в целом должны принять наиболее универсальные меры для решения этих проблем [1].

Мировое сообщество давно пришло к решению о том, что переход от традиционных к возобновляемым источникам энергии, определяющими свойствами которых являются неисчерпаемость и экологичность, становится необходимым выходом из сложившейся ситуации. Следует отметить, что правительства многих стран уже договорились о значительном увеличении доли возобновляемой энергетики [2]. Кроме получения экологически чистой энергии, применение ВИЭ позволит снабдить электроэнергией объекты агропромышленного комплекса, большое количество локальных потребителей, включая разведку и освоение Северного и Южного полюсов Земли, наблюдение за океанами, электроснабжение метеостанций, вышек сотовой связи и т.д. Проблемы, с которыми исследователи сталкивались в холодных регионах России, при разведке Арктики и Антарктики (холодный пуск двигателя, выход из строя оборудования, растрескивание сварных швов и др.) [3] хорошо известны. Но данные проблемы не могут быть успешно решены без новых методов, в частности, инфраструктура территорий с холодными климатическими условиями все еще недостаточно развита, так как промышленное строительство и транспортная логистика ограничены [4].

В русле этого тренда авторами разработан проект энергокомплекса на основе ВИЭ, который может работать в любых климатических условиях. В качестве основных были поставлены следующие задачи: достижение максимальной надёжности электроснабжения и высокого КПД установки при низкой стоимости изделия; минимизация экологического ущерба в период производства и эксплуатации (минимальный объем выбросов CO_2); создание оборудования с минимальным аэродинамическим и механическим шумом, низкой вибрацией и отсутствием инфразвука, рассчитанного на длительный срок службы.

На начальных этапах проекта было необходимо выбрать:
– вид ВИЭ;
– вид энергогенерации;
– тип энергоустановки;
– способ аккумулирования энергии;
а также сделать экономические расчёты.

Результатом проделанной работы стала надежная ветроэнергетическая установка (ВЭУ) в сочетании с водородным накопителем энергии, предназначенным для обеспечения бесперебойного энергоснабжения по аналогии с [1] и [5], в которых были показаны возможности создания ветро-водородных установок. Но в отличие от теоретических исследований в настоящей работе, исходя из опыта эксплуатации оборудования в холодных климатических условиях, была предпринята попытка реальной адаптации генерирующего оборудования со специфическими компонентами для низкотемпературных условий местности.

Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
Ср	Коэффициент мощности (коэффициент использования энергии ветра)
Аббревиатуры	
DC	Постоянный ток
VAC	Вольт переменного тока
VDC	Вольт постоянного тока
БПС	Базовая передающая станция
БЭЯ	Батарея (стек) электролизных ячеек

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Продолжение списка обозначений

ВАВ	Всемирная ассоциация ветроэнергетики
ВБ	Водяной бак
ВВЭК	Ветро-водородный энергокомплекс
ВдрН	Водородный насос
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВН	Водяной насос
ВОВЭУ	Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка
гCO_2eq	Эквивалент одного грамма CO_2
ГОВЭУ	Горизонтально-осевая ветроэнергетическая установка
ДГ	Дизельный генератор
ИСО	Международная организация по стандартизации
КПД	Коэффициент полезного действия
МВТ	Малая ветротурбина
МК	Модуль компрессии
МТЯ	Модуль топливных ячеек
МЭ	Модуль электролизера
МЭК	Международная электротехническая комиссия
НВ	Накопитель водорода
НК	Накопитель кислорода
н.м^3	Нормальный кубометр
ПЛК	Программируемый логический контроллер
СМУ	Система мониторинга и управления
СТЭ	Система топливных элементов
СЭЯ	Стек электролизных ячеек
ТЭ	Топливные элементы

2. Методика исследований

Типовой автономный потребитель энергии в отдаленных регионах, таких как северный районы России, Сибирь, Арктика, Антарктика, Аляска, Африка, требует относительно небольшой мощности – до 10 кВт. Такой же уровень бытового энергопотребления можно наблюдать по всему миру, если электроэнергия используется достаточно эффективно.

Сегодня рекреационные районы и отдаленные поселения для удовлетворения своих потребностей в энергообеспечении используют в основном дизельные генераторы. Но такой подход является чрезвычайно сложным, так как требует регулярных поставок топлива в труднодоступные места, что, в свою очередь, приводит к существенному удорожанию генерируемой энергии. В связи с этим возобновляемые источники энергии служат единственным локально доступным средством энергообеспечения [4, 5].

При ответе на вопрос, какой вид возобновляемых источников энергии (ВИЭ) будет использоваться для работы энергоустановки, предназначенной, в том числе, для экстремальных климатических условий, очень важно учитывать особенности арктических территорий: длительное отсутствие солнечного света в течение полярной ночи [6]; трудность использования энергии биомассы на крайних широтах [7]; отсутствие гидроэнергетики в холодном климате [8]; ограниченное использование приливной и волновой энергии [9] и т.д. – то есть тот факт, что ни солнечная, ни приливная энергетика не смогут обеспечить регулярную генерацию энергии [10]. На основе проведенных исследований выбор был сделан в пользу ветра.

Правильность такого выбора подтверждают и другие расчёты. Каждая энергетическая установка, преобразующая энергию воздушных масс, выделяет в $10 \div 20$ раз меньше парниковых газов, чем было выделено при производстве ее компонентов [11]. Так, при производстве ВЭУ номинальной мощностью 3 кВт с мачтой массой около 0,5 т, состоящей главным образом из углеродистой стали, в атмосферу выбрасывается до 1,1 т CO_2 в соответствии с таблицей A. III.8 [12] (общая интенсивность выбросов 2,2 тCO_2/т стали для 2010 г.) и дополнительно 0,3 тыс. т во время эксплуатации в соответствии с таблицей A. III.2 [12] (выбросы за время эксплуатации 11 гCO_2eq/кВт·ч), составляя суммарно всего 1,4 т CO_2. При выработке 0,390 кВт мощности и средней скорости ветра не менее 5 м/с с коэффициентом мощности Cp = 0,4 в течение 30 лет эксплуатации общая сумма составит около 100 000 кВт·ч. Для сравнения при эквивалентной производительности традиционного бензинового генератора (100 000 кВт·ч) будет сжигаться 10 000 литров бензина E10 (стандарт DIN EH 228-2004), что приведет к выбросу 21 т CO_2 (с учетом того, что для генерации 1 кВт·ч требуется около 0,1 л бензина, и сгорание одного литра бензина E10 приведет к выбросу около 2,1 кг CO_2 [13]). При этом необходимо отметить, что использование ВЭУ уменьшает выбросы CO_2 в 14 раз по сравнению с традиционными энергетическими установками.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

2.1. Малая распределённая ветроэнергетика

Генерирующее оборудование, подключенное к сети, очень зависит от местной конъюнктуры, а его цена часто находится под политическим влиянием. Поэтому стоимость подключения потребителей энергии к сети, как правило, непомерно высока, особенно если расстояние до точки подсоединения является существенным [14].

Поскольку в большинстве случаев именно стоимость становится основой для принятия решения в пользу распределённой генерации [3], ключевым фактором является анализ затрат, особенно на оборудование и пусконаладочные работы. По данным [6], типичная новая воздушная однофазная линия передачи 69 кВ стоит приблизительно $178,125 за км в сравнении с $0,9 миллиона за км для новой линии подземной магистрали 69 кВ (без оконечных устройств). Новая воздушная многофазная линия 138 кВ стоит приблизительно $243,700 за км по сравнению с $1,25 млн за км подземной магистрали (без оконечных устройств). При таких разовых и ежемесячных платежах удаленному индивидуальному потребителю, не подключенному к сети и не нуждающемуся в больших количествах энергии, подойдут автономные энергоустановки на ВИЭ, тем более небольшая система генерации стоимостью $10 \div 50$ тыс. находится в пределах экономической досягаемости большой группы потребителей [15]. Кроме того, большим плюсом являются единовременные траты на установку генерирующих мощностей, эксплуатируемых на долгосрочной основе и не облагаемых налогом.

Самый крупный компонент затрат – стоимость турбины ветроэнергетической установки, которая может составлять 70 % или более от всей стоимости ВЭУ, остальные капитальные затраты – стоимость монтажа и создание инфраструктуры. При этом наблюдается некоторое снижение капитальных затрат при вводе в эксплуатацию ветроэнергетических установок, которое обусловлено главным образом значительным сокращением стоимости самих ВЭУ. Так, в отчете о рынке ветроэнергетических технологий [11] сообщается, что затраты на ввод в эксплуатацию одной ВЭУ в 2016 г. составили примерно $1 590/кВт, что на $780/кВт меньше, чем в 2009 г. и 2010 г.

Следует отметить, что сегмент бытовых и коммерческих потребителей составляет более 40 % от общего потребления энергии в развитых странах [7] и отражает глобальный потенциальный рынок мощностью не менее 3 млрд кВт. [15]. Это свидетельствует о том, что малая ветроэнергетика сегодня востребована и будет стремительно развиваться. Так, Департамент энергетики США, способствующий развитию инновационных ветроэнергетических установок малой мощности с 1970 г. (Национальная лаборатория Сандиа), с 2004 г. финансирует разработки высокоэффективных вертикально-осевых ветроэнергетических установок (Национальная лаборатория Беркли) [15, 17, 18], в которых принимали участие авторы этой статьи, а в 2013 г. объявил ряд тендеров на разработку ВЭУ малой мощности. В 2013 г. Европейская комиссия обнародовала первые конкурсы на развитие малых ВЭУ (до 100 кВт). В начале 2014 г. Всемирная ассоциация ветроэнергетики (ВАВ) начала публиковать информацию о малой ветроэнергетике как обязательную рубрику. Значительный рост интереса к этому сегменту рынка демонстрируют десятки саммитов, форумов и конференций по малой ветроэнергетике. Кроме того, растут Интернет-продажи малых ВЭУ. В отчете, опубликованном ВАВ в 2016 г. [9], утверждается, что общая установленная мощность малых ветротурбин (МВТ) по всему миру приближается к 1 000 МВт, введено в эксплуатацию более миллиона установок средней мощностью 1 кВт. В отчете ВАВ за 2017 г. [10] даётся прогноз, согласно которому рынок малой ветроэнергетики вырастет до 1 900 МВт к 2020 г., прибавляя ежегодно до 270 МВт новой установленной мощности. Это подтверждается постоянно растущим потоком заказов на разработку генерирующих устройств для индивидуального использования на основе ВИЭ.

В соответствии со статистикой энергопотребления Евростата, индивидуальные домовладения потребляют почти такое же количество энергии (25,4 %), как и промышленность (25,3 %) [14]. Однако, в отличие от промышленности, рынок бытовой энергии можно было бы разделить на небольшие сегменты мощностью до 10 кВт. Средний индивидуальный потребитель расходует около $300 \div 1\,000$ кВт·ч в месяц при мгновенной потребляемой мощности $0{,}4 \div 0{,}8$ кВт, что может обеспечить ВЭУ установленной мощностью $5 \div 10$ кВт в зависимости от географических и природных условий.

Малая распределенная энергетика экономически выгодна и государству, потому что снижает ответственность и затраты властей в случае местных аварий или отключений. Если для использования ВЭУ средней и большой мощности, как правило, требуется развитая сетевая инфраструктура, заключение долгосрочных соглашений о покупке электроэнергии, множество согласований с коммунальными предприятиями, то в малой распределенной ветроэнергетике государство обычно просто компенсирует затраты на покупку и ввод в эксплуатацию ВЭУ, приобретая вырабатываемую электрическую энергию по выгодным для владельца ВЭУ тарифам, которые могут в несколько раз превышать долгосрочные ставки [19, 20]. Этот способ финансовой помощи применяется в США, Индии, Германии, Австралии, России и многих других странах.

Тенденция использования электростанций малой мощности, распределенных по территории страны, проявляется повсеместно, причём даже в богатых углеводородами странах, включая Саудовскую Аравию и Россию. Несмотря на то что в газифицированных районах ВИЭ пока не могут конкурировать с традиционными источниками энергии, в не электрифицированных и не газифицированных районах они

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

уже сейчас могут успешно применяться. При этом экономия может составить:

– $20 \div 50$ % на строительстве электросетевых линий;

– $20 \div 30$ % на вспомогательных конструкциях ВЭУ (если размещать ветроэнергетичекую установку на кровлях зданий и сооружений – до $20 \div 50$ % от полной стоимости ВЭУ).

Таким образом, малая ветроэнергетика завоевывает мировые рынки, стремительно совершенствуя технологии [21–23] и привлекая все больше финансирования [24]. Эти тенденции уже заметны на фоне глобальной статистики, как например, в докладах BAB [25].

3. Устройство ветро-водородной энергетической установки и принцип её действия

Ветроэнергетические установки малой мощности. ВЭУ средней и большой мощности вобрали в себя все современные технологии авиационной и электротехнической промышленности. Однако мощность больших ВЭУ практически достигла своего пика на уровне $10 \div 13$ МВт (продукция Siemens, Vestas, Enercon). Дальнейшее увеличение мощности осуществить крайне сложно ввиду ограниченной предельной прочности материалов, особенно для лопастей, длина которых может достигать 0,1 километра. Это означает, что развитие ВЭУ в сторону масштабирования замедляется или останавливается. Более того, ряд стран (США, Германия, Испания, Италия и др.) стараются вынести крупные ветровые электростанции подальше от населенных территорий, в частности в открытое море (так называемые офшоры). Это обусловлено рядом причин, включая низкочастотные помехи и другие отрицательные черты ВЭУ большой мощности [21]. ВЭУ малой мощности могут примирить генерирующие компании и потребителей и одновременно решить проблему местного электроснабжения благодаря своим особенностям.

В категорию ВЭУ малой мощности, согласно стандарту МЭК (IEC) 61400-2, попадают ВЭУ, имеющие ометаемую площадь ротора менее 200 м^2, что соответствует номинальной мощности около 50 кВт при напряжении ниже 1 000 В переменного тока или 1 500 В постоянного тока. В дополнение к этому стандарту несколько стран разработали свое собственное определение ВЭУ малой мощности, где значение максимальной мощности колеблется от 10 кВт до 100 кВт.

Срок окупаемости ВЭУ является основным аспектом приобретения электростанции. Этот период зависит от среднегодовой скорости ветра в месте установки ВЭУ, высоты мачты, местоположения площадки, стоимости энергии (оборудования) и производительности ВЭУ. Малые ВЭУ примерно в 10 раз экономически эффективнее, чем ВЭУ большой мощности, что математически доказано в [26]. Несмотря на то что на практике это пока не подтверждено, поскольку массового серийного производства МВТ нет нигде в мире, однако очевидно, что с ростом производства ВЭУ малой мощности их себестоимость должна снизиться.

Другой аспект использования ВЭУ малой мощности – эстетический. Некоторые люди утверждают, что крупные традиционные гигантские ВЭУ недостаточно привлекательны и плохо гармонируют с окружающей средой. Малые ВЭУ позволяют сгладить этот недостаток.

К проблемам, связанным с ветроэнергетикой, относится травматизм и гибель птиц от столкновения с движущимися лопастями ВЭУ.

Сравнительный анализ вертикально-осевых и горизонтально-осевых ВЭУ малой мощности. Одна из задач настоящего исследования заключалась в поиске решений для преодоления основных технических проблем ВЭУ. В этих целях был проведен сравнительный анализ вертикально-осевых (ВОВЭУ) и горизонтально-осевых ВЭУ малой мощности.

Для ВЭУ с горизонтальной осью вращения, как отмечается во многих публикациях [27, 28], основными недостатками конструкции являются: большая длина лопастей; необходимость принудительной раскрутки ротора при возникновении ветра; необходимость применения аэродинамического торможения при сильном ветре; работа конструкции в условиях циклической знакопеременной нагрузки; низкие резонансные частоты конструкции; более высокие эксплуатационные расходы.

Благодаря аэродинамическим свойствам ВЭУ с вертикальной осью вращения не производит инфразвуковых колебаний и не создает шума.

Непривлекательный с эстетической точки зрения вид ВЭУ с вертикальной осью вращения можно скрыть с помощью маскирующей окраски, которая позволяет создавать впечатление естественного происхождения ВЭУ (дерево и т.д.).

Поскольку у вертикально-осевых ВЭУ ротор вращается с гораздо меньшей скоростью, то вероятность травматизма птиц снижается почти до нуля. Это подтверждается тем, что отсутствуют зарегистрированные случаи гибели птиц от столкновения с вертикально-осевыми ВЭУ.

Лопасти для горизонтально-осевых ВЭУ (ГОВЭУ), как правило, изготавливаются вручную, что приводит к увеличению стоимости конечного изделия. В отличие от горизонтально-осевых ВЭУ, лопасти вертикально-осевых конструкций имеют неизменный по размеру профиль лопасти. Это значит, что процесс изготовления можно автоматизировать, при этом для формования профиля потребуется минимальное количество пресс-форм.

Применение вертикально-осевых ветроэнергетических установок позволит еще больше увеличить генерацию электрической энергии, поскольку работа таких ВЭУ не зависит от направления ветра (утвер-

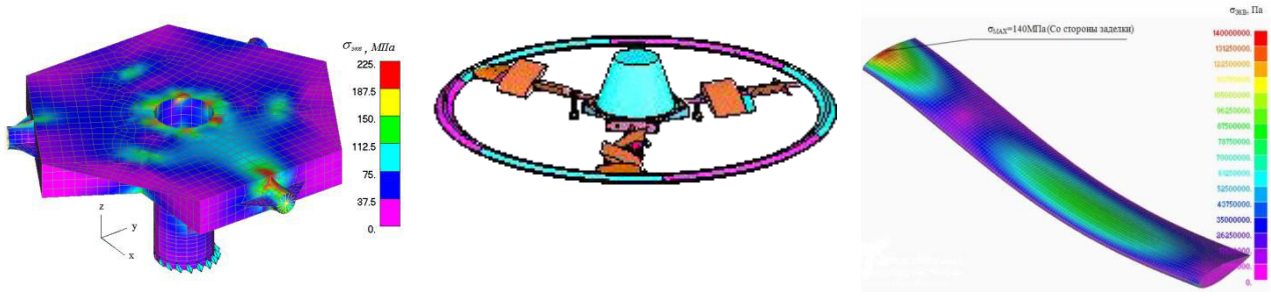
International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ждение о конкуренции с горизонтально-осевыми конструкциями до сих пор спорное, однако, впервые после закрытия исследований в конце 1970-х гг. Национальная лаборатория Сандия (США) объявила о возобновлении исследований в области вертикально-осевых ветроэнергетических установок [19], что может косвенно указывать на их частично не раскрытые преимущества).

Примером, подтверждающим достоинства вертикально-осевых конструкций, являются ВЭУ, разработанные в ходе проекта в тесном сотрудничестве с Национальной лабораторией Беркли (США). Данные установки имеют устойчивый старт на 1,5 ÷ 2 м/с, надежное аэродинамическое управление и дублирование электрических и электромеханических тормозных систем. Циклическая нагрузка на лопасти значительно уменьшена благодаря статической и динамической балансировке ротора. Система управления контролирует уровень вибрации и позволяет ротору проходить резонансные частоты как можно быстрее. Вследствие этого рядом с ВЭУ не было зарегистрировано ни вибрации почвы, ни инфразвука при любой скорости ветра. ВЭУ предназначена для длительной эксплуатации в любых климатических условиях. Испытания начались в Арктике в ноябре 2011 г. и до сих пор продолжаются, демонстрируя работоспособность конструкции в суровых арктических условиях.

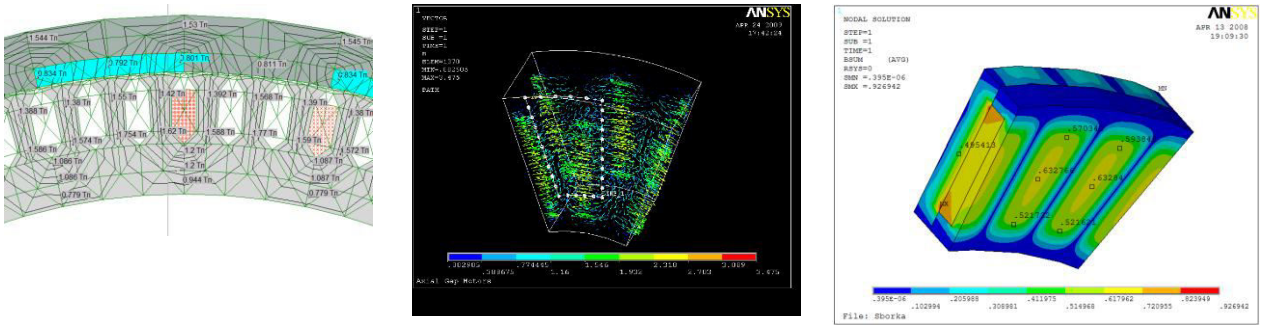
Все компоненты ВОВЭУ разработаны с помощью двухуровневого проектного подхода. На 1-ом уровне производится разработка компонентов на основе специального программного обеспечения. На этом уровне компоненты обеспечивают максимальную эффективность в обособленном (не взаимосвязанном с остальной структурой) состоянии. На 2-ом уровне осуществляются силовые механические и электрические расчеты. Все компоненты пересчитываются с учетом максимально возможных взаимодействий с внешней средой и сопряженными компонентами (расчет на максимальные механические и электрические нагрузки).

Некоторые результаты моделирования в Nastran CFX и SolidWorks показаны на рис. 1. Расчет магнитных сил и теплообмена в Ansys Maxwell представлен на рис. 2. Подробную информацию можно получить в [29].



a *b* *c*

Рис. 1 – Компьютерное моделирование компонентов ротора ветротурбины: *a* – ступица (Nastran); *b* – аэродинамические компенсаторы (SolidWorks); *c* – лопасти (Nastran)
Fig. 1 – Computer modeling of wind rotor components: *a* – hub (Nastran); *b* – aerodynamic governors (SolidWorks); *c* – blade (Nastran)



a *b* *c*

Рис. 2 – Компьютерное моделирование магнитных полей и тепловых процессов: *a* – магнитопровод (SolidWorks); *b* – магнитные поля (Ansys); *c* – расчет температуры (Ansys)
Fig. 2 – Computer modeling of magnetic fields and heat: *a* – magnetic forces (SolidWorks); *b* – magnetic fields (Ansys); *c* – heat calculations (Ansys)

Впервые разработаны ВЭУ для непрерывной работы на скорости ветра до 60 м/с (лучшие аналоги отключаются при скорости ветра 30 м/с) с постоянной выработкой электроэнергии за счет стабилизации частоты вращения аэродинамическими регуляторами/тормозами.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таким образом, комплексный анализ конструкций ВЭУ показал, что многоярусные вертикально-осевые ВЭУ являются наиболее подходящими для распределенных потребителей электроэнергии [4] с точки зрения эффективности, надежности, механической прочности, контроля вибрации, возможности аэродинамического торможения, электрического и электронного управления.

Всесторонний анализ различных видов ВИЭ и энергогенерации, типов энергоустановок и способов аккумулирования энергии позволил авторам приступить к разработке автономной ветро-водородной энергетической установки, схема которой представлена на рис. 3. При этом следует отметить, что компоненты электростанции подобраны таким образом, что любой из них может быть заменен аналогом с небольшими изменениями всей системы.

Общая схема электростанции аналогична [30], но имеет некоторые особенности. На рис. 3 показаны направления потоков электрической энергии от ветротурбины (ветрогенератора) к оборудованию для циклического процесса получения и окисления водорода с выделением энергии в системе топливных элементов, которое функционирует преимущественно при отсутствии ветра.

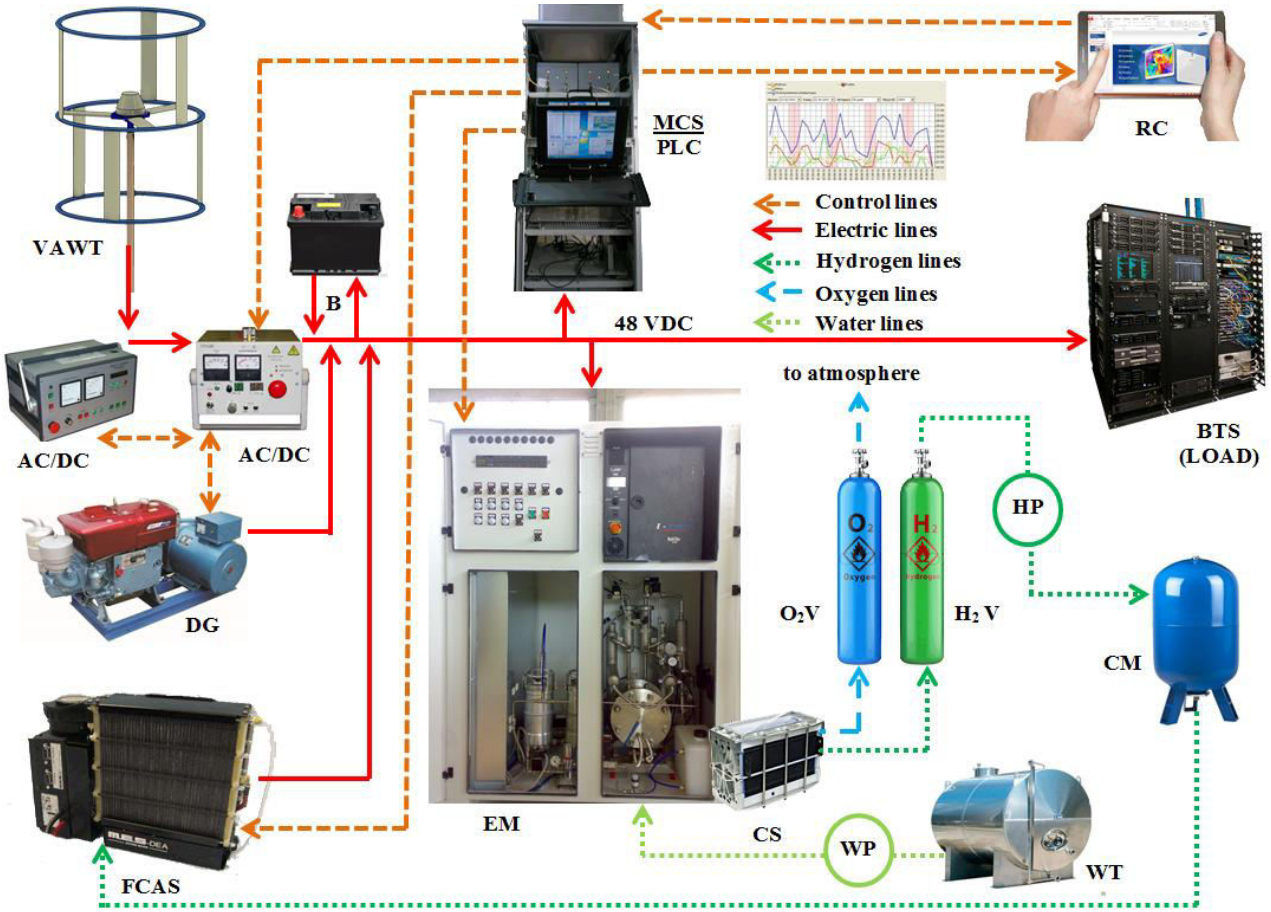


Рис. 3 – Ветро-водородный энергокомплекс с бесперебойным электроснабжением:
VAWT (ВОВЭУ) – вертикально-осевая ветроэнергетическая установка; AC/DC – преобразователь переменного тока в постоянный; DG (ДГ) – дизельный генератор; FCAS (МТЯ) – модуль топливных ячеек; B – аккумуляторная батарея; MSC (СМУ) – система мониторинга и управления; PLC (ПЛК) – программируемый логический контроллер; RC – удаленный компьютер; BTC (БПС) – базовая передающая станция; O_2V (НК) – накопитель кислорода; H_2V (НВ) – накопитель водорода; EM (МЭ) – модуль электролизера; CS (БЭЯ) – батарея электролизных ячеек; CS (СЭЯ) – стек электролизных ячеек; HP (ВдрН) – водородный насос; WP (ВН) – водяной насос; WT – накопитель воды; CM (МК) – модуль компрессии.

Fig. 3 – Uninterruptible Wind-Hydrogen Power Plant: VAWT – Vertical Axis Wind Turbine; AC/DC – Alternating Current to Direct Current Converter; DG – Diesel Generator; FCAS – Fuel Cells Assembly System; B – Battery; MSC – Monitoring and Control System; PLC – Programmable Logic Controller; RC – Remote Computer; BTC – Base Transmitter or Differential Station; O_2V – Oxygen Vessel; H_2V – Hydrogen Vessel; EM – Electrolysis Module; CS – Cell Stack; CS – Cell Stack; HP – Hydrogen Pump; WP – Water Pump; WT – Water Tank; CM – Compression Module

Типичное место проведения испытаний характеризуется сильными ветрами, превышающими 7 ÷ 8 м/с с порывами до 60 м/с. Благодаря этому, вырабатываемая мощность достаточна для питания системы получения и окисления водорода (технические характеристики приведены в табл.).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица

Технические данные

Table

Performance Data

Параметр	**Значения**		
Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6)			
Производительность, кВт·ч в месяц, на скорости ветра			
4 м/с (14 км/ч)	180 кВт·ч в месяц		
5 м/с (18 км/ч)	360 кВт·ч в месяц		
6 м/с (21 км/ч)	540 кВт·ч в месяц		
8 м/с (28 км/ч)	1 224 кВт·ч в месяц		
11 м/с (40 км/ч)	2 526 кВт·ч в месяц		
Диаметр ротора	3,4 м		
Высота ротора	4 м		
Ометаемая площадь	13,6 $м^2$		
Количество лопастей	6		
Материал лопасти	армированный стеклопластик		
Номинальная мощность	3 000 Вт		
Коэффициент мощности *Ср*	0,47		
Номинальная скорость ветра	11 м/с		
Стартовая скорость ветра	1,5 м/с		
Остановка при буревом ветре	нет (непрерывная работа до 60 м/с)		
Защита от сильного ветра	аэродинамическое регулирование		
Выходное напряжение постоянного тока	48 В		
Генератор [61]	синхронный, с постоянными магнитами		
Масса ветроколеса (ротора)	321 кг		
Крутящий момент на скорости ветра 60 м/с	20 кН		
Высота / масса мачты	12 м / 200 кг		
Шум на 20 м от ВЭУ на скорости ветра 11 м/с	не зарегистрировано		
Вибрация грунта на 5 м от турбины на 11 м/с	не зарегистрировано		
Электролизер			
Производительность по водороду	0,40 $Нм^3$/час		
Чистота водорода по объему	99,99 %		
Рабочее нормальное давление	10 ÷ 20 бар		
Влажность водорода	насыщен		
Источник энергии	ВЭУ, 48 В постоянного тока, 3кВт		
Ток	10 ÷ 40 А		
Напряжение на 80 ºС	48 VDC		
Потребляемая мощность (при рекомендуемом потоке газа H_2)	2,2 кВт		
Мощность водяного насоса	0,1 кВт		
Мощность водородного насоса	0,4 кВт		
Потребление деминерализованной воды (<5 μС/см на 25 ºС)	0,4 л/час		
Климатическое исполнение	термостатирована		
Минимальная / максимальная температура термостатирования	0 ÷ 35 ºС		
Максимальная рабочая температура	80 ºС		
Размеры шкафа	1 800 x 800 x 1 800 (высота) мм		
Массовая теплоемкость	H_2	O_2	H_2O
GAS, ккал/кг/ºС	3,40	0,25	0,55
LIQ, ккал/кг/°С	–	–	1,00
Теплота испарения, вода (40 ºС)	DHw = 580 ккал/кг		
Шум на 20 м	не зарегистрирован		
Вибрация почвы на 10 м	не зарегистрирована		
Датчик водорода	H240; аварийная сигнализация; диапазон 0,4 ÷ 5 % объемных единиц; температура эксплуатации 0 ÷ 45 ºС; напряжение питания изменено до 48 В пост. тока		

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Продолжение таблицы

Модуль компрессии	
Емкость	1 $Нм^3$
Давление	30 бар
Топливные элементы	
Максимальная выходная мощность	электрическая: 1 кВт; тепловая: 1 кВт
Выходное напряжение	24,0 ÷ 38,0 В постоянного тока
Удельная мощность	450 Вт/кг
Плотность мощности	330 Вт/л
Потребление водорода	13 л/мин, 0,06 кг/ч при полной загрузке (примерно 1$Нм^3$/ч)
Чистота водорода	не хуже, чем по стандарту 4.5 [62]
Избыточное давление водорода	0,4 ÷ 0,5 бар
Подача кислорода	из окружающего воздуха
Давление воздуха	атмосферное
Дополнительное увлажнение газов	нет
Температура ячеек	не более 63 ºС
Управление газом	циркуляция
Температура окружающей среды	0 ÷ +35 ºС
Рабочий цикл	непрерывный
Охлаждение	принудительное охлаждение
Шум	70 дБ (на 1 м), не зарегистрирован на 10 м
Вибрация грунта на 5 м	не зарегистрировано
ПК-интерфейс	мониторинг H_2
Коммуникации	CAN шина 2,0 В
Число ячеек	40 ячеек (61 $см^2$ активн. площади)
Размеры шкафа	350 x 235 x 140 мм
Масса	5,0 кг
Базовая передающая станция (потребитель)	
Потребляемая мощность	0,5 кВт (примерно 80 % времени) до 2 кВт (примерно 20 % времени)

3.1. Анализ систем бесперебойного электроснабжения на основе использования водорода

Непостоянство ВИЭ, в частности скорости ветра, которое препятствует стабильному бесперебойному энергоснабжению, – это серьёзная проблема для возобновляемой энергетики, которую можно разрешить за счёт системы накопления энергии или вспомогательного генерирующего оборудования. Анализ всех доступных способов накопления энергии показывает, что наиболее надёжным и эффективным в данном случае является водородная система аккумулирования энергии**.**

Эффективность водорода. Среди горючих веществ водород обеспечивает наибольшую гравиметрическую плотность энергии, которая достигает 39 кВт·ч/кг [30]. Водород также имеет значительно более высокую плотность энергии (142 МДж/кг) [31] по сравнению с такими накопителями энергии, как литий-ионные аккумуляторы (до 0,9 МДж/кг) [32], суперконденсаторы (до 0,16 МДж/кг) [33] и супермаховики (до 10 МДж/кг) [34]. В частности, по этим причинам Департамент энергетики США уделяет особое внимание разработке технологий хранения водорода для стационарной и мобильной энергетики, а также для транспорта [35].

Доступность водорода. Существует несколько методов получения водорода, которые имеют и достоинства, и недостатки: из природного газа, нефти и угля (наносят вред окружающей среде); радиолиз и термолиз (очень дороги и неэффективны); силиколевый способ, основанный на применении ферросилиция (на выходе H_2 ненадлежащей чистоты); фотобиологическое и фотокаталитическое расщепление воды (специальные условия и длительность процесса); из биомассы (специальные условия и длительность процесса).

На основании анализа, проведенного авторами данной статьи, наилучшим способом получения водорода для проекта автономного ветро-водородного энергокомплекса бесперебойного энергоснабжения в качестве основного и единственного метода получения водорода в данном проекте был выбран электролиз воды.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Во-первых, вода локально доступна практически везде; во-вторых, при нормальных температуре и давлении окружающей среды электролиз требует минимального напряжения 1,481 В при ΔH^0 286 кДж/моль и минимальной энергии 39,7 кВт·ч/кг водорода, при этом равновесный потенциал составляет 1,23 В, если ΔG^0 равно 237 кДж/моль [36]; в-третьих, современные электролизеры потребляют около 45 кВт·ч/кг водорода с КПД более 80 % [37].

Хранение водорода. Основная сложность хранения газообразного водорода связана с тем, что H_2 занимает довольно большой объем: для 1 кг водорода при нормальной температуре окружающей среды и атмосферном давлении требуется 11 м^3. Однако это позволяет накопить 40 кВт·ч энергии, что примерно соответствует среднему потреблению одним человеком в месяц. Кроме того, плотность водорода при –53 ºС, +27 ºС и +60 ºС составляет 0,11 кг/м^3, 0,08 кг/м^3 и 0,07 кг/м^3 соответственно [38], что позволяет экономить около 10 % объема при его использовании в холодном климате (перспективно для северных регионов, а также Арктики и Антарктики). Водород также может храниться в молекулярном состоянии в полностью реверсивных гидридах металлов или сложных гидридах под давлением [39] с плотностью до 150 кг/м^3 по сравнению с нормальной плотностью (0,08987 кг/м^3), физиосорбцией ($35 \div 45$ кг/м^3), гидратами углерода ($50 \div 70$ кг/м^3), жидким водородом ($50 \div 80$ кг/м^3) и жидкими углеводородами ($100 \div 110$ кг/м^3).

При разработке энергетической установки с водородным накопителем энергии на основе электролиза было рассмотрено несколько технологий хранения водорода: в сжатом, жидком состоянии или в виде химических соединений (гидриды металлов и неметаллов, углеводы, жидкие органические водородоносители и др.). Решающим аргументом стал тот факт, что сжатие водорода является наиболее известным и надежным методом, доступным в любое время, в любом месте и без дополнительных материалов. Помимо этого, на сжатие водорода затрачивается всего 2,1 % всей энергии, хранящейся в сжимаемом топливе [40], что позволяет при минимальных затратах существенно снизить стоимость оборудования для хранения водорода. В исследовании объем резервуара был принят из расчета умеренного энергопотребления одним человеком в течение одного месяца.

Сегодня использование водорода имеет еще одно важное и перспективное направление – возможные путешествия на другие планеты. Следует учитывать, что космонавтам потребуются источники энергии для удовлетворения своих потребностей, а ввиду того что все виды электрохимических аккумуляторных батарей и супермаховиков имеют большую массу и слишком тяжелы для транспортирования на большие расстояния, использование водорода в данном случае является наиболее предпочтительным.

Ветро-водородный энергокомплекс. Ветро-водородный энергокомплекс (ВВЭК) получает энергию от одной или нескольких ВЭУ (в зависимости от требований к генерируемой мощности), в которых давление ветрового потока преобразуется в крутящий момент ротора турбины и, далее, в напряжение генератора, переменное по фазе, амплитуде и частоте. Затем напряжение генератора преобразуется в стабилизированное напряжение постоянного тока с помощью AC/DC преобразователя. Если напряжение, поступающее от другой ветротурбины, отличается от выбранного напряжения бортовой сети, то оно должно быть отрегулировано соответствующим образом. Бортовая DC сеть используется в дальнейшем для подключения потребителей постоянного тока.

3.2. Описание работы энергокомплекса

При наличии ветра вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) (ветроэлектрический агрегат мощностью 3 кВт с 6 лопастями) генерирует электроэнергию. Если количество получаемой энергии превышает уровень потребления нагрузки (в нашем случае примерно $0,5 \div 2$ кВт – базовый передатчик или передающая станция (БПС) [41]), избыток энергии используется для генерации водорода и/или зарядки дополнительной батареи [42]. В случае, когда ветер отсутствует или потребляемая БПС мощность превышает вырабатываемую ветроагрегатом, система управления включает водородное оборудование, которое генерирует энергию [43]. При этом система является модульной и допускает гибкое масштабирование за счёт увеличения мощности (энергоемкости) всей системы или только компонентов водородного цикла. Все компоненты энергокомплекса были разработаны авторами данной статьи совместно с представителями корпорации Эмпайр Магнетикс (США) и компанией H2Нитидор (Италия) и являются экспериментальными изделиями. На рис. 4 показан генерирующий компонент описанной ветро-водородной генерирующей установки, расположенной на мысе «Канин нос», Арктика (широта: 68°39'20"N; долгота: 43°16'15"E) между Баренцевым и Белым морями.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Рис. 4 – Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка ВЭУ-3(6) в Арктике, мыс Канин нос: несколько ярусов на одной мачте увеличивают единичную мощность (вверху слева)
Fig. 4 – WPU-3(6) Vertical Axis Wind Turbine in Arctic, Kanin Nos Cape: several tiers on the same mast increase the unit power (upper left)

Режимы работы контролируются системой мониторинга и управления (СМУ) и зависят от климатических условий [44]:

1. Генерация водорода начинается в модуле электролиза (МЭ) тогда, когда объем хранимого водорода составляет менее 70 % от номинальной емкости хранилища (1 $Нм^3$) и/или мощность, генерируемая ВЭУ, превышает потребляемую мощность (0,5 ÷ 2 кВт).

2. Процесс генерации электроэнергии из водорода в модуле топливных ячеек (МТЯ) запускается тогда, когда генерируемой ВЭУ мощности недостаточно для потребителя.

Напряжение в бортовой сети постоянного тока (48 В) используется для питания СМУ, МЭ, водородного (ВдрН) и водяного насосов (ВН) для перекачки водорода в модуль компрессии (МК).

Учитывая тот факт, что приоритетом энергокомплекса является бесперебойное функционирование БПС, система электроснабжения оборудована дизельным генератором (ДГ) с функцией автоматического запуска и автоматической остановки с дальнейшим возвратом в нормальный режим работы. Таким образом обеспечивается как автоматическое резервирование, так и ввод автоматического резерва на тот крайний случай, если описанная экспериментальная система окажется неработоспособной.

Ветрогенератор. Для преобразования энергии ветра в электроэнергию применяется инновационная вертикально-осевая ветроэнергетическая установка, основными преимуществами которой являются: отсутствие зависимости мощности вырабатываемой электроэнергии от направления ветра; несколько ярусов лопастей на одной мачте, что увеличивает мощность и снижает затраты (см. рис. 4); самостоятельный запуск на низкой (от 1,5 м/с) скорости ветра; низкая частота вращения, что увеличивает ресурс; без ограничения по частоте вращения (без верхнего уровня ограничения скорости ветра) благодаря управлению аэродинамическими свойствами турбины [45]. Высокая эффективность ветровой турбины определяется коэффициентом использования энергии ветра *Ср*, который в данном случае превышает 0,47. Значение этого коэффициента у лучших мировых аналогов ниже 0,47. Конструкция ветрогенератора защищена несколькими патентами [45–47], принадлежащими, в том числе, некоторым из авторов настоящей статьи.

Ветроэнергетическая установка оснащена уникальной аварийной электромеханической тормозной системой [48], которая предотвращает аварийные ситуации при скорости ветра до 60 м/с.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

3.3. Оборудование водородной подсистемы

Оборудование водородной подсистемы разработано для удобства, надежности и безопасности эксплуатации в соответствии с европейскими требованиями ИСО/ТК 197 [49], Директивы PED 97/23/EC [50] в отношении сосудов под давлением и Директивы ATEX 94/9/EC [50], которые касаются электрических и управляющих установок, работающих во взрывоопасных средах. Данные требования были разработаны с учетом пожеланий зарубежных партнеров по проекту. Водородный модуль приведен на рис. 5.

a *b*

Рис. 5 – Оборудование водородного модуля: *a* – система мониторинга и управления СМУ с программируемым логическим контроллером ПЛК; *b* – модуль компрессии МК и модуль электролизера МЭ
Fig. 5 – Equipment of hydrogen generation and storage: *a* – monitoring and supervising control MSC with programming logic controller PLC; *b* – compression module CM and electrolyser module EM

Все компоненты термостатически изолированы от окружающей среды. Модуль электролизера, стек (батарея) электролизных ячеек, блок-сборка топливных элементов, резервуар для воды и компоненты системы управления расположены в одном металлическом шкафу с герметичным корпусом, термостатированным материалом Пеноплэкс. Внутренняя температура 21 ºС поддерживается теплообменниками. Для холодного климата тепло от электролизера, стека ячеек и топливных элементов, в зависимости от сигналов расположенных в шкафу тепловых датчиков, передается либо в окружающую среду, либо внутрь термостатируемого шкафа с помощью 2 воздушных насосов, которые потребляют мощность до 100 Вт, не учитываемую при расчетах потоков мощности. Система управления направляет воздушные потоки в необходимое направление двунаправленного клапана. В жарком климате вместо теплого воздуха используется охлажденный теплоноситель (устанавливается кондиционер). Эти изменения не являются радикальными, поскольку общая концепция теплообмена одинакова. Однако, если потребляемая кондиционером мощность будет сравнима с мощностью нагрузки, баланс мощности должен быть пересчитан. Всё же, благодаря принципу модульности, кондиционер можно легко добавить к существующей структуре электростанции.

3.4. Электролизер

Электролизер производит водород и кислород под давлением без дополнительного механического сжатия, поэтому работает на максимуме энергоэффективности. Процесс электролиза максимально автоматизирован, акцент при проектировании сделан на безотказной работе с питанием от автономной ветроэнергоустановки. Электролизер содержит оборудование, трубопроводы и приборы, необходимые для проведения процесса электролиза воды (см. рис. 3). Система контроля и управления (СМУ) основана на программируемом логическом контроллере (ПЛК).

Основным функциональным элементом модуля электролизера (МЭ) является батарея электролизных ячеек (БЭЯ), которая состоит из последовательно соединенных ячеек, работающих под высоким давлением. Водород и кислород генерируются внутри ячеек с помощью постоянного тока (DC) за счёт расщепления очищенной воды в соответствии с химической реакцией $H_2O = H_2 + 1/2O_2$.

Полученный в результате электролиза продукт, насыщенный водой, находится в газообразном состоянии при температуре 80 ºС и давлении 20 бар. Сухой газ имеет около 0,2 % объемного содержания O_2, который должен быть удален, например, в каталитическом реакторе, где «лишние» молекулы O_2 реагируют с H_2, преобразуясь в воду. Несмотря на то что катализатор не нуждается в регенерации, необходимо предотвращать образование конденсата на его поверхности. Установленный перед реактором

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

предпусковой подогреватель необходим для того, чтобы нагреть газ до температуры примерно на 50 ºС выше температуры насыщения. При этом, в целях учета потерь тепла, весь процесс считается изотермическим. На выходе каталитического реактора установлен охладитель, который должен снизить температуру до 40 ºС для частичной конденсации воды, автоматически отделяемой потоком газа. Окончательное удаление влаги осуществляется посредством осушителя, где водяной пар поглощается частицами специального материала. Дополнительная очистка газа в дальнейшем будет проводиться аналогично [51, 52], что позволит сократить период между сервисными работами. Ввиду того что процесс производства газа непрерывен, задействовано сразу 2 осушителя: в одном происходит осушение газа, а в другом – цикл регенерации для удаления влаги. Регенерация осуществляется при давлении, близком к атмосферному, путем десорбции с поверхности частиц с потоком сухого H_2 при температуре 180 ºС, которую обеспечивает газовый обогреватель. Расчетное потребление H_2 для регенерации составляет около 10 % от производства H_2. Длительность цикла регенерации зависит от расхода регенерационного газа. Расход газа можно уменьшить, если увеличить продолжительность цикла. В случае переменной производительности в процессе получения H_2, необходимо использовать измеритель расхода и программное обеспечение, которое будет управлять циклом регенерации в зависимости от количества газа, прошедшего через осушитель.

ПЛК управляет процессами внутри МЭ без участия оператора, кроме процессов включения и отключения, сообщая оператору о любом источнике сигнала тревоги. Программное обеспечение контролирует параметры процесса (температура, давление, уровень жидкости и параметры электропитания) для поддержания безопасной и эффективной работы энергетической системы. В случае возникновения аварийных режимов технологические газы автоматически удаляются путем впрыска инертного газа. ПЛК позволяет осуществлять мониторинг и управление с помощью удаленного компьютера благодаря специальному программному обеспечению, которое делает процесс управления доступным из любого места, даже с мобильного телефона. Для надежного удаленного управления СМУ, ПЛК оборудован также модулем спутниковой связи.

Скорость производства водорода прямо пропорциональна значению постоянного тока, протекающего в ячейках БЭЯ, которое может быть установлено вручную в диапазоне от 15 % до 100 % номинальной мощности электролизера. Напряжение на БЭЯ напрямую коррелирует с эффективностью ячеек и является одним из параметров, отображаемых на панели оператора, вместе со значением постоянного тока.

Степень очистки водорода и кислорода постоянно контролируется газоанализаторами. Сигналы тревоги подаются, когда состав газа (процент кислорода в водороде и, соответственно, процент водорода в кислороде) достигает нижнего предела опасности взрыва смеси.

Объем водорода в два раза превышает объем кислорода. Для разделения воды требуется энергия около 3,55 кВт·ч / $Нм^3$ в нормальных условиях, 760 мм рт. ст. и 0 ºС (см. табл.). Эффективность БЭЯ рассчитывается путем сравнения теоретической и фактической мощности потребления постоянного тока. Разница в потреблении может составить до 85 %. Такое высокое значение достигается за счёт повышения проводимости разлагаемой воды добавлением гидроксида калия (KOH). В результате образуется электролитический раствор. Водород и кислород образуются на выходе из БЭЯ, расходуя при этом некоторое количество электролита до попадания газов в разделительные сосуды, где газовая фаза отделяется от жидкой фазы, которая возвращается обратно в БЭЯ. Полученные газы проходят через оконечные фильтры и перекрестные оконечные сепараторы перед выходом из электролизера. Водород проходит через регулятор обратного давления, а кислород выпускается в атмосферу (при необходимости может быть использован). Предполагается, что требования к чистоте газового потока для металлогидридных резервуаров более высоки, чем для щелочного топливного элемента. Извлеченная тепловая энергия используется в холодном климате для подогрева помещения или шкафов с оборудованием, или отводится в окружающую среду, когда оборудование перегревается в соответствии с информацией от датчиков и соответствующих команд СМУ. Перенос тепла осуществляется замкнутым контуром теплоносителя с воздушным радиатором.

Возможность утечки электролита и газов в системе предельно ограничена. Так, никакая ручная операция не может привести к контакту оператора с электролитом. Вся система заключена в термостатируемый контейнер, который разделен на две отдельные камеры: в первой камере находится основное оборудование, во второй – источник питания. Камеры разделяет двойная стенка, через которую проходят кабели с двойной бронировкой. Кроме того, камеры снабжены принудительной вентиляцией для удаления возможных следов водорода. Управление вентиляцией осуществляется с помощью анемометрического переключателя и датчика водорода (см. табл.) – типичных компонентов [53]. В настоящее время для этих целей тестируются перспективные датчики [54, 55]. Следует отметить, что компоненты

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

электрической станции выбраны в точном соответствии с техническими правилами.

Для повышения автономности установки, запас деминерализованной воды с электрической проводимостью не более 5 мкS/см на 25 ºС автоматически пополняется из отдельного резервуара в цистерне с водой (НВ). Водяной насос (ВН) автоматически перекачивает воду в электролизер в соответствии с потребностью процесса электролиза. Деминерализованная вода в цистерну WT добавляется вручную, однако, при наличии естественного источника воды, процесс может быть автоматизирован с добавлением в структуру дополнительного резервуара для подготовки воды, по аналогии с [56]. Это увеличит не только энергопотребление, но и автономность эксплуатации.

МЭ оснащен модулем компрессии (МК), который с помощью насоса (ВдрН) готовит водород для хранения в отдельно вынесенном накопителе объемом 1 Нм^3. МК отрегулирован для давления до 30 бар, которое гораздо ниже уровня давления в системах хранения водорода на транспорте. Однако, поскольку электростанция является экспериментальной, указанного давления достаточно для испытаний. В дальнейшем давление в накопителе водорода может быть увеличено до 350 бар и далее до 700 бар на основе углеродосодержащих технологий IV типа [56], в том числе, криогенных технологий, подобных [57–59].

Система может быть оборудована одно- или трехфазным инвертором, который способен обеспечить энергией локальных потребителей переменного тока (в основном электродвигатели). Это расширяет выбор оборудования, доступного для использования в описываемом энергокомплексе.

Модуль топливных элементов. Сравнивая методы преобразования энергии, основанные на сжигании водорода с топливными элементами с протонообменными мембранами, следует отметить, что последние считаются лучшим решением для системы бесперебойного энергообеспечения [60].

Модуль топливных ячеек (МТЯ) состоит из элементов, содержащих по 40 топливных ячеек со встроенным микропроцессором, который управляет клапанами и насосами. Подача водорода контролируется СМУ/ПЛК. Электрическая эффективность (КПД) топливных элементов находится в границах $55 \div 65$ %. Однако, с учетом вырабатываемой и используемой тепловой энергии, а также потерь на вентиляцию, значение КПД достигает 90 %. При этом следует иметь в виду, что вырабатываемая тепловая энергия особенно важна в условиях холодного климата.

Модуль аккумулирования водорода. Оборудование энергокомплекса включает систему аккумулирования водорода в виде газа, содержащегося под давлением 30 бар. Сварной сосуд, в котором содержится водород, имеет двухслойную стенку, внутренняя часть которой выполнена из аустенитной нержавеющей стали, препятствующей глубокому диффундированию водорода, а наружная представляет собой емкость из высокопрочной стали [61]. Сосуд рассчитан на давление до 50 бар, емкость составляет 1 Нм^3. Однако вместимость сосуда, как и остальные элементы энергокомплекса, может быть увеличена за счет добавления параллельных сосудов или замены на один более крупный. Слабым местом этого технического решения является недостаточная герметичность поршневых газгольдеров, поэтому отсек с аккумулятором водорода отделен от остального оборудования и оснащен дополнительными датчиками газа. Кроме того, с учетом требований об ограничении утечек (по аналогии с хранением природного газа не более 1,1 % в единицу времени с единицы объема), утечки являются относительно небольшими. Главное преимущество такого подхода заключается в минимальной стоимости и простоте оборудования, которые обеспечиваются кратковременной работой аккумулятора газа (каждые $12 \div 24$ часа). Следует отметить, что в случае необходимости в дополнительной выработке газа или его дальнейшем преобразовании (сжижение, преобразование в аммиак, метанол, этанол и др.), например, с целью транспортировки, дополнительное оборудование также сравнительно легко подключается к имеющейся системе (с подбором соответствующих компонентов – насосов, емкостей, фиттингов и т.д.), однако при этом значительно возрастает стоимость энергокомплекса в целом.

3.5. Система управления

Система управления ВВЭК (СМУ/ПЛК) основана на 32-разрядном микроконтроллере (ядро ARM Cortex-M4F, тактовая частота 180 МГц). СМУ/ПЛК контролирует все процессы в комплексе. В обычном режиме работы ветровая турбина генерирует мощность в диапазоне $0 \div 3$ кВт, обеспечивая 48 В на шине постоянного тока. БПС потребляет мощность в диапазоне от 0,5 кВт (80 % времени) до 2 кВт (20 % времени).

Временные диаграммы работы ВВЭК показаны на рис. 6.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

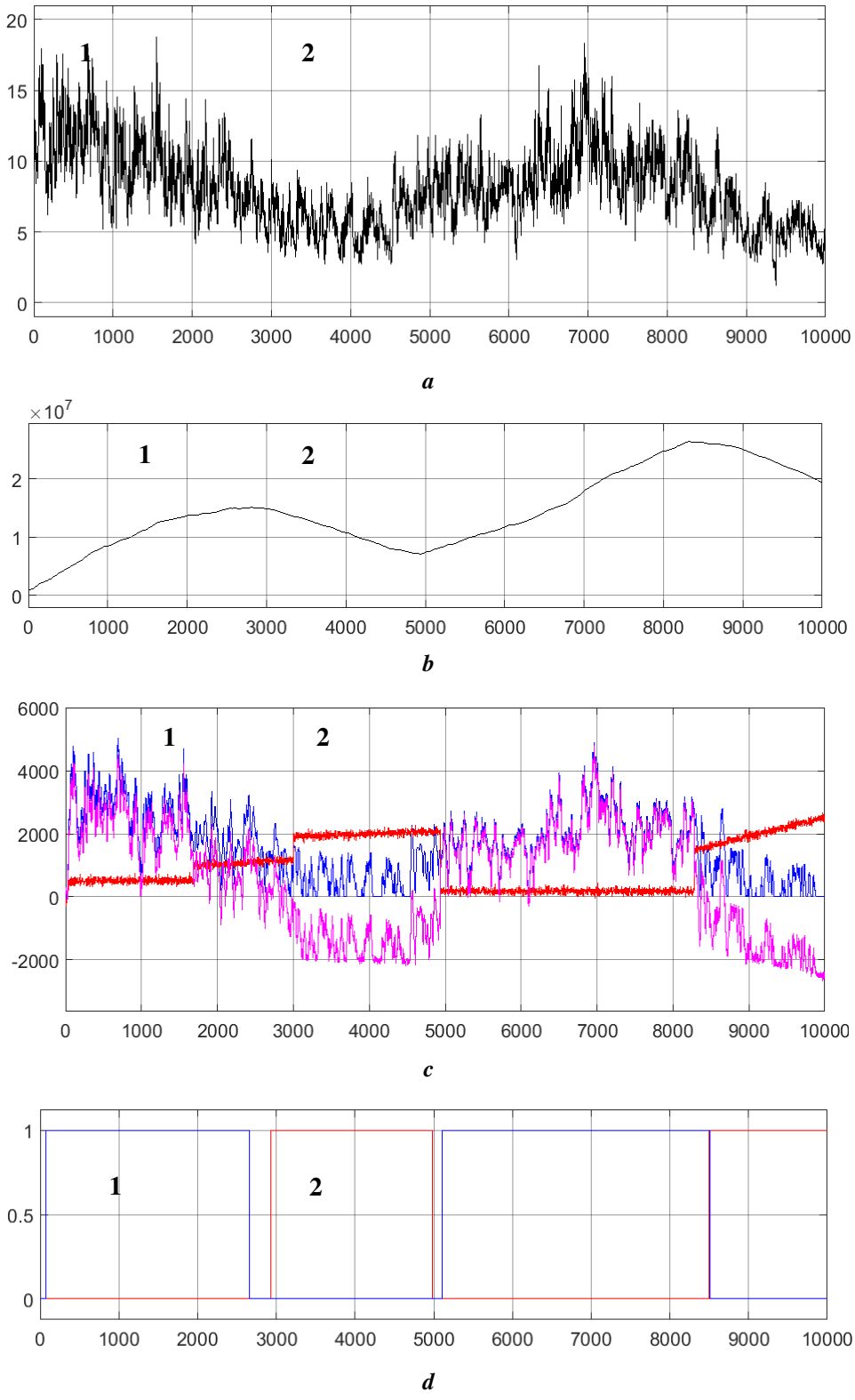


Рис. 6 – Пример работы ВВЭК:
1 – работа при избытке генерируемой мощности; *2* – работа при недостатке генерируемой мощности
(*c*: синий – генерируемая мощность, красный – потребляемая мощность, розовый – разница между генерируемой и потребляемой мощностями; *d*: красный – активность электролизера, синий – активность топливных элементов)
Fig. 6 – Sample of WHPP operation:
1 – excessive generated power; *2* – insufficient generated power
(*c*: blue – generated power, red – consumed power, pink – balance between generated and consumed power;
d: red – electrolyzer activity: blue – fuel cell activity)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

При наличии достаточного количества энергии для функционирования БПС, при том что избыточная мощность от ВЭУ превышает 1 кВт (0,5 кВт для электролизера + 0,1 кВт для ВН + 0,4 кВт для насоса ВдрН), СМУ проверяет уровень заполнения емкости накопления для водорода и, при наличии свободного объема в емкости, ПЛК переключается на МЭ, а СМУ управляет функционированием ВН и ВдрН, производя перекачку водорода в МК до достижения 30 бар (участок *1* на рис. 6 *a-d*). При этом мощность, необходимая для работы электролизера, составляет 0,5 ÷ 2,2 кВт и зависит от потока воды и силы тока. Дополнительная аккумуляторная батарея используется для демпфирования пиков потребления энергии электродвигателями насосов.

Когда вырабатываемой ветрогенератором мощности недостаточно для работы БПС, СМУ проверяет, есть ли газ в НВ, и при его наличии ПЛК включает МТЯ, а СМУ контролирует работу обратного насоса СМ (участок *2* на рис. 6 *a-d*). Водород из НВ перекачивается через сборку топливных элементов (МТЯ). Генерируемая мощность составляет до 1 кВт и зависит от установленного расхода газа.

В случае когда генерируемой мощности недостаточно, и водородный накопитель пуст, ПЛК посылает команду контроллеру БПС о переходе в режим ограниченного функционирования и принудительного уменьшения уровня потребления [62].

Для обеспечения максимально стабильного энергоснабжения БПС контроль потоков электрической энергии и водорода в ВВЭК осуществляется на трех различных уровнях управления, а также на уровне надлежащего взаимодействия между этими уровнями. На 1-ом уровне системы управление МЭ и МТЯ обеспечивается алгоритмом управления, который может первоначально идентифицировать текущие или спрогнозировать будущие проблемы в этом сегменте. Система слежения за питанием реализована на 2-ом уровне управления и контролирует потоки энергии и газа. Этот уровень реализуется посредством алгоритма, который основан на методах нечеткой логики с помощью искусственных нейронных сетей. Контроллер автоматически настраивает параметры регулирования для того, чтобы электростанцию можно было легко установить силами специалистов-электриков, не обладающих специальными знаниями в области систем управления. Изменения параметров системы непрерывно отслеживаются контроллером. 3-й уровень осуществляет дистанционное управление СМУ/ПЛК, которое координирует работу нескольких ЭМС, МТЯ или даже ВВЭК.

Выход постоянного тока может быть подключен к входу инвертора для питания потребителей переменного тока.

3.6. Масштабирование мощности

Исследуемый ветро-водородный энергетический комплекс (ВВЭК) на базе малой ветротурбины и водородной генерации предназначен в первую очередь для распределенных локальных потребителей энергии. Однако, если территориально распределенные локальные потребители будут иметь между собой электрическое соединение, они могут быть объединены в масштабируемую электросеть, которая может быть оборудована единым для всей сети хранилищем водорода для обеспечения бесперебойного электроснабжения больших территорий с холодным климатом. Кроме того, поскольку ветер в регионах с подобными климатическими условиями достаточно сильный, и объемы производства водорода гарантированы, избыток водорода может быть транспортирован для энергоснабжения других территорий, не имеющих электросети.

3.7. Экономический анализ

Энергокомплекс оптимизирован технически и экономически. Общая стоимость ветро-водородной электростанции может быть определена как сумма стоимости отдельного оборудования:

– ветроэнергетическая установка ВЭУ-3 (6), 3 кВт, полный комплект = $14 500;

– электролизер 0,4 нм^3 / ч, полный комплект = $18 200;

– топливный элемент 1 кВт, полный комплект = $14 300;

Дополнительное оборудование, которое будет использоваться для бесперебойного питания, управляемого удаленно через сеть Интернет:

– модуль очистки до чистоты 99,99% – $8 600;

– газоанализаторы – $5 400;

– бак для хранения водорода – $8 500;

– дистанционное управление с системой мониторинга – $2 000;

– дополнительная батарея 750 А·ч/48VDC – $4 900.

Стоимость доставки не учитывалась, поскольку перевозка была осуществлена потенциальным заказчиком – Научно-исследовательским институтом космического приборостроения, филиалом Объединенной ракетно-космической корпорации. Данный институт также является и потребителем электроэнергии, необходимой для питания новых арктических приемо-передающих станций, которые используются для снижения навигационной ошибки GPS. При этом пиковая потребляемая мощность составляет 2 кВт, среднее энергопотребление – около 0,7 кВт·ч.

Приблизительная оценка периода окупаемости может быть выполнена на основе общей стоимости электростанции, которая составляет около $100 000. Предполагается, что электростанция будет работать в среднем 20 ч около 300 дней в год в течение 20 лет, генерируя мощность 1,8 ÷ 2,5 кВт, при незначительном обслуживании. Общая выработка за это время составит 240 000 кВт·ч. Стоимость энергии, произведенной с помощью дизельного топлива в отдаленных районах, составляет $0,80 ÷ 1,20/кВт·ч. Общая стоимость электроэнергии составит около $200 000 (98 % этой суммы – стоимость топлива, которое будет

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

транспортироваться в основном по воздуху). Причём срок окупаемости составляет около 7 ÷ 10 лет [63].

Необходимо отметить, что затраты на обслуживание и ремонт могут быть значительно сокращены [64, 65]. При этом очевидно, что имеется запас по увеличению емкости водорода для данных генерирующих мощностей, а также расширению возможностей климатического применения посредством бортового кондиционера, работающего и на охлаждение газа. При масштабировании экономический расчет является многовариантной задачей и может быть проведен только в случае четкого представления о составе оборудования. Тем не менее линейная аппроксимация стоимости оборудования при масштабировании дает аналогичный приведенному расчету результат, в связи с чем можно утверждать, что линейное масштабирование не снижает рентабельности гибридного ветро-водородного энергокомплекса, однако любые изменения в структуре или масштабировании отдельных компонентов для удовлетворения специфических требований могут изменить картину рентабельности, причем как в лучшую, так и худшую сторону.

Общий КПД для полного цикла водорода составляет около 50 % (произведение КПД электролизера 85 % и КПД топливных элементов 65 %) без учёта повышения давления водорода до 30 бар, потери энергии на питание контроллера, зарядку аккумулятора и электроснабжение другого электронного оборудования.

4. Заключение

Изменение климата вносит коррективы в проектирование и разработку оборудования для генерации и электроснабжения: оно должно быть экологически чистым, гарантирующим безопасность жизнедеятельности, непрерывно эксплуатируемым, долговечным и максимально надежным. Всесторонний анализ оборудования, представленного на рынке, показывает, что одним из перспективных направлений является сочетание энергии ветра в качестве источника энергии и водородной системы в виде бесперебойного энергообеспечения. Такая система могла бы масштабироваться от 1 кВт до 50 кВт и использоваться в любых распределенных сетях постоянного и/или переменного тока, на которые приходится до 40 % всех потребителей электрической энергии. Кроме того, такое оборудование является идеальным источником питания для отдаленных домохозяйств и предприятий, расположенных в суровых климатических условиях полюсов, пустынь и островов. Оборудование является универсальным как с точки зрения использования, так и масштабирования как покомпонентно, так и в целом. Распределенные локальные генерирующие установки в будущем могут быть объединены в более крупные объекты со строительством общих резервуаров для хранения водорода, что позволит обеспечить бесперебойное электроснабжение больших территорий.

За счет оптимизации выработки генерируемого водорода, в зависимости от потребляемой энергии, капитальные затраты электролизера могут быть снижены до 85 % текущей цены, что будет выгодным как для персональных потребителей, так и для промышленности (в соответствии с «Исследовательскими целями по преодолению глобальных проблем» [66]). При этом внедрение системы сжатия газа в электролизер позволяет сэкономить на отдельном компрессоре.

Критическое время работы оборудования в промежутке между сервисным обслуживанием доведено до 1 000 часов благодаря оптимизации переключений пусков-остановов – до 1 000 переключений в год. Обслуживание может проводиться локально инструктированными техниками.

Благодарности

Проект финансировался Министерством энергетики США через Национальную лабораторию Лоуренс Беркли и Международный научно-технический центр в рамках Гранта № 2568р (контракт №LBNL-T2-0203-RU / RUE-2-010620-ч-06) и был поддержан актом 211 Правительства РФ (договор № 02.A03.21.0011). Любые предположения, выводы или рекомендации, изложенные в настоящем материале, принадлежат авторам и не обязательно отражают мнение финансирующих организаций.

Acknowledgements

This project was funded by US Department of Energy via Lawrence Berkeley National Laboratory and International Science and Technology Center, under grant #2568p (contract #LBNL-T2-0203-RU/RUE-2-010620-CH-06), and was supported by Act 211 Government of RF, contract № 02.A03.21.0011. Any options, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the funding organizations.

Список литературы

[1] Гольцов, В.А. В шаге от водородной цивилизации / В.А. Гольцов, Т.Н. Везироглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 22–24. – С. 33–39.

[2] Ackermann, T. Distributed generation: a definition / T. Ackermann, G. Andersson, L. Södera // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 57. – P. 195–204.

[3] Underground vs. Overhead: Power Line Installation – Cost Comparison and Mitigation, Electric Light and Power [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-18/issue-2/features/underground-vs-overhead-power-line-installation-cost-comparison-.html – (Дата обращения: 20.01.2018).

[4] Chade, D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations – Grimsey island case study / D. Chade, T. Miklis, D. Dvorak // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 76. – P. 204–211.

[5] Svalbard's electric power could come from hydrogen. SINTEF. ScienceDaily, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

https://www.sciencedaily.com/releases/2017/02/170207104356.htm – (Дата обращения: 04.01.2018).

[6] Underground Electric Transmission Lines. Public Service Commission of Wisconsin Electric 11 (05/11), 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://psc.wi.gov/Documents/Under%20Ground%20Transmission.pdf. – (Дата обращения: 20.01.2018).

[7] How much energy is consumed in US residential and commercial buildings? US Energy Information Admin-istration. May 10, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1 – (Дата обращения: 20.01.2018).

[8] Wind Energy Reduces Greenhouse Gas Emissions. American Wind Energy Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.awea.org/reducing-greenhouse-gas-emissions – (Дата обращения: 03.08.2017).

[9] Information. Statistics. World Wind Energy Association 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.wwindea.org/11961-2/. – (Дата обращения: 01.08.2017).

[10] Small wind world market: back on track again. World Wind Energy Association 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.wwindea.org/small-wind-world-market-back-on-track-again/ – (Дата обращения: 01.08.2017).

[11] 2016 Wind Technologies Market Report, American Wind Energy Association, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2016_wind_technologies_market_report_final_optimized.pdf – (Дата обращения: 01.08.2017).

[12] Bruckner, T. Report of IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology – specific Cost and Performance Parameters 2014 [Электронный ресурс] / T. Bruckner [et al.]. – Режим доступа: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf – (Дата обращения: 08.01.2018).

[13] EIA.gov. How much carbon dioxide is produced from burning gasoline and diesel fuel. US Energy Information Administration, updated 19.05.17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11 – (Дата обращения: 08.01.2018).

[14] Consumption of energy. Eurostat Statistics Explained. European Commission. Modification of 09.11.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy – (Дата обращения: 08.02.2017).

[15] Reports 1-4 of SRC-Vertical, Project RUE-2-010620-CH-06 "All-Climate Testing of Vertical Axis Wind Turbines", for Lawrence Berkeley National, DOE, USA / E. Solomin. – 2006–2009. – Режим доступа: по запросу автору или Glen Dahlbacka at LBNL.

[16] Vesborg, P.C.K. Europe's real energy problem [Электронный ресурс] / P.C.K. Vesborg // Technologist. – 2015 – No. 5. – Режим доступа: http://www.technologist.eu/europes-real-energy-problem/ – (Дата обращения: 03.08.2017).

[17] Dahlbacka, G. Vertical Axis Windpower Systems and Opportunities [Электронный ресурс] / G. Dahlbacka. – Berkeley Lab. – July 29, 2004. – Режим доступа: http://www2.lbl.gov/today/2004/Jul/26-Mon/wind-jump.html. – (Дата обращения: 27.02.2017).

[18] Reports 1-8 of SRC-Vertical on Project LBNL-T2-0203-RU "Development of Low-Maintenance Wind Power Systems" for Lawrence Berkeley National Laboratory and US Department of Energy [Электронный ресурс] / E. Solomin. – 2004–2006. – Режим доступа: http://newscenter.lbl.gov/2004/10/04/from-russia-with-wind-power/ (Дата обращения: 22.02.2017).

[19] Ashwill, T.D. A Retrospective of VAWT technology [Электронный ресурс] / T.D. Ashwill, H.J. Sutherland, D.E. Berg // Report of Sandia National Laboratories #SAND2012-0304, TRN: US201205%%90. – 2012. – Режим доступа: https://www.osti.gov/scitech/biblio/1035336-retrospective-vawt-technology – (Дата обращения: 26.02.2017).

[20] Ruff, H. Why is there so much confusion about "Small Wind"? [Электронный ресурс] / H. Ruff // CleanTechnica. – 2014. – Режим доступа: https://cleantechnica.com/2014/10/27/small-wind-turbine-myths/. – (Дата обращения: 27.02.2017).

[21] Parker, H.S. The Hidden Human Tragedy Caused by Incessant Wind Turbine Noise [Электронный ресурс] / H.S. Parker // European Platform Against Windfarms. – Режим доступа: https://stopthesethings.com/author/stopthesethings/page/2/ – (Дата обращения: 01.05.2017).

[22] Solomin, E. Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines / E. Solomin, I. Kirpichnikova, A. Martyanov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – No. 792. – P. 582–589.

[23] SWIP – New innovative solutions, components and tools for the integration of wind energy in urban and peri-urban areas. Spain, Great Britain. Program: FP7-ENERGY. European Commission. Modification of 17.07.2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cordis.europa.eu/news/rcn/137715_en.html – (Дата обращения: 03.08.2017).

[24] Next-Generation Wind Technology. EU-funded projects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/ – (Дата обращения: 03.08.2017).

[25] WWEA released latest global small wind statistics. Jun.2, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.wwindea.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/ – (Дата обращения: 20.01.2018).

[26] da Rosa, A.V. Fundamentals of Renewable Energy Processes / Aldo V. da Rosa. – 3rd Edition. – 2013. – P. 688.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[27] Borg, M. Offshore floating vertical axis wind turbines: advantages, disadvantages, and dynamics modeling state of the art [Электронный ресурс] / M. Borg, M. Collu, Brennan F.P. // The Royal Institution of Naval Architects. Marine & Offshore Renewable Energy. – 2012. – London, UK. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/235963001_Offshore_floating_vertical_axis_wind_turbines_Advantages_disadvantages_and_dynamics_modelling_state_of_the_art. – (Дата обращения: 24.01.2018).

[28] Albuquerque, I.M. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines / I.M. Albuquerque, F.F.d.S. Matos // IEEE Latin America Transaction. – 2016. – Vol. 14. – No. 10. – P. 4255–4260.

[29] Соломин, Е.В. Основы методологии разработки вертикально-осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2011. – № 1. – С. 18–39.

[30] Züttelab, A. Storage of Renewable Energy by Reduction of CO_2 with Hydrogen. Sion, a new Center for Chemistry and Chemical engineering in Valais / A. Züttelab [et al.] // CHIMIA. – 2015. – Vol. 69. – No. 5. – P. 264–68.

[31] Energy Density of Hydrogen. An encyclopedia of scientific essays. The Physics Factbook. 2005.

[32] Hislop, M. Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough [Электронный ресурс] / M. Hislop // The American Energy News. Режим доступа: http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough – (Дата обращения: 15.03.2017).

[33] Espinar, B. The role of energy storage for mini-grid stabilization / B. Espinar, D. Mayer. – Report IEA-PVPS T11-02:2011, IEA PVPS Task 11. – July 2011. – P. 28.

[34] Amiryar, M.E. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications / M.E. Amiryar, K.R. Pullen // Applied Science. – 2017. – Vol. 7. – P. 286.

[35] Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage. – (Дата обращения: 23.01.2018).

[36] LeRoy, R.L. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. / R.L. LeRoy, C.T. Bowen, D.J. LeRoy // J. Electrochem. Soc. – 1980. – No. 127. – P. 1954–1962.

[37] Zeng, K. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications / K. Zeng, D. Zhang // Prog. Energy Combus. Sci. – 2010. – Vol. 36. – P. 307–326.

[38] Gupta, R. Properties of Hydrogen. Cryogenic Data Handbook. Brookhaven National Laboratory, US Department of Energy [Электронный ресурс] / R. Gupta. – Режим доступа: https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section3.pdf. – (Дата обращения: 23.02.2017).

[39] Dias, R. P. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen / R.P. Dias, I.F. Silvera // Science. – 2017. – No. 355. – P. 715–718.

[40] Wind-to-Hydrogen Project. Hydrogen and Fuel Cells. National Renewable Energy Laboratory. DOE. USA [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nrel.gov/hydrogen/wind-to-hydrogen.html. – (Дата обращения 23.02.2017).

[41] Павлов, Н.А. Автономное энергоснабжение объектов крайнего севера / Н.А. Павлов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 10–11. – С. 75–83.

[42] Solomin, E.V. Algorithms of $LiFePO_4$ batteries automatic charge / E.V. Solomin, D.V. Topolsky, I.G. Topolskaya // Procedia Engineering Journal. – 2015. – Vol. 129. – P. 213–218.

[43] Korobatov, D.V. Wind Turbine Power Plant Control / D.V. Korobatov [et al.] // Materials of X International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics, IEEE), Omsk State Technical University. – Nov. 2016.

[44] Martyanov, A.S. Development of control algorithms in Matlab/Simulink / A.S. Martyanov, E.V. Solomin, D.V. Korobatov // Procedia Engineering Journal. – 2015. – No. 129. – P. 922–26.

[45] Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения (варианты): пат. 2347104 РФ: МПК F03D 3/06 (2006.1) / Грахов Ю.В., Соломин Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ГРЦ-Вертикаль». – № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006 опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 12 с.

[46] Ветроколесо ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: пат. 2443902 РФ: МПК F03D3/06 (2006.01) / Грахов Ю.В., Соломин Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ГРЦ-Вертикаль». – № 2010121692/06; заявл. 27.05.2010 опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 5 с.

[47] Комбинированная ветро-солнечная энергетическая установка со светодиодным прожектором для социальных нужд: пат. 101105 РФ, МПК F03D 9/02 (2006.01) / Соломин Е.В.; заявитель и патентообладатель ООО «НИИ "Уралмет"». – № 2010137417/06; заявл. 08.09.2010 опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 2 с.

[48] Sirotkin, E.A. Emergency Braking System for the Wind Turbine / E.A. Sirotkin [et al.] // Procedia Engineering Journal (ICIEAM). – 2016 (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[49] ISO/TR 15916:2015. Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iso.org/standard/56546.html?browse=tc. – (Дата обращения: 25.01.2018).

[50] Pressure Equipment Directive 97/23/CE. European Commission [Электронный ресурс]. – Режим

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

доступа: https://ec.europa.eu/growth/sectors/pressure-gas/pressure-equipment/directive_en. – (Дата обращения 25.01.2018).

[51] Gusev, A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen / A.L. Gusev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – Vol. 45. – No. 9–10. – P. 640.

[52] Gusev, A.L. Manufacture Nanocomposites Membranes for clearing Chlorine / A.L. Gusev, M.A. Kazaryan // Work Meeting, Bayer MaterialScience AG, Leverkuzen, Germany, 12–15, August, 2007.

[53] Favier, F.L. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays / F.L. Favier [et al.] // Science. – 2001. – No. 293(5538). – P. 2227–2231.

[54] Gusev, A.L. Hydrogen Sensor for Cryogenic Vacuum Objects / A.L. Gusev [et al.] // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides. – 01/2002. – P. 41–47. ISBN: 978-1-4020-0731-6.

[55] Gusev, A.L. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects / A.L. Gusev [et al.] // Abstacts book of NATO International Conference Katsiveli, Yalta, Ukraine September 02–08, 1999. – P. 370.

[56] Eberle, U. Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012 / U. Eberle, B. Mueller, R. von Helmolt // Energy & Environmental Science. – 2012. – Vol. 5. – No. 10. – P. 8790–8798.

[57] Gusev, A.L. Thermodynamic peculiarities of low-temperature regeneration of cryosorption devices in heat-insulation cavities of hydrogenous cryogenic tanks / A.L. Gusev // International Journal of Hydrogen Energy. – 2001. – Vol. 26. – No. 8. – P. 863–871.

[58] Gusev, A.L. Flaw detection of large cryogenic objects with regard for the effect of effusion induced hydrogen superinsulation instability // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). – 2000. – No. 1. – P. 103–108.

[59] Gusev, A.L. Anomalies of the residual superinsulation pressure under emergency conditions of cryogenic objects / A.L. Gusev // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). – 2000. – No. 1. – P. 55–75.

[60] Bratsch, S.G. Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K / S.G. Bratsch // J. Phys. Chem. Ref. Data. American Institute of Physics. – 1989. – No. 18 (1). – P. 1–21.

[61] ГОСТ 3022-80. Водород технический. Технические условия. – Введ. 1981-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 27 с.

[62] Kirpichnikova, I.M. Simulation of a generator for a wind–power unit / I.M. Kirpichnikova, A.S. Martyanov, E.V. Solomin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – No. 84(10). – P. 46–49.

[63] Гольцов, В.А. От водородной экономики к водородной цивилизации / В.А. Гольцов, Т.Н. Везироглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 22–24. – С. 25–32.

[64] Галеев, А.Г. Методика оптимизации параметров технического обслуживания и показателей безотказности сложных технических систем, функционирующих на кислородно-водородном топливе / А.Г. Галеев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 1–3. – С. 22–33.

[65] Наман, С.А. Пилотная промышленная установка по десорбции H_2S из воды черного моря / С.А. Наман, И.Э. Тур, Т.Н. Везироглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 22–24. – С. 99–109.

[66] Research Focuses on Overcoming Challenges. Hydrogen Production: Electrolysis, Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis – (Дата обращения: 25.01.2018).

[67] Varkaraki, E. Hydrogen based Uninterruptible Power Supply. 2nd Eu-ropean Hydrogen Energy Conference – EHEC 2005, Nov. 22-25, Zaragoza [Электронный ресурс] / E. Varkaraki [et. al.]. –. Режим доступа: http://www.cres.gr/kape/hmerida/files/ydrogen/Varkaraki_EHEC_05%20HELPS.pdf – (Дата обращения: 24.01.2018).

References

[1] Goltsov V.A., Veziroglŭ T.N.. A step on the road to hydrogen civilization (V shage ot vodorodnoi tsivilizatsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):33–39; doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.033-039 (in Russ.) (previously: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002;27:719–723 in Eng.).

[2] Ackermann T., Andersson G., Södera L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 2001;57(3):195–204.

[3] Underground vs. Overhead: Power Line Installation – Cost Comparison and Mitigation, Electric Light and Power. Available on: http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-18/issue-2/features/underground-vs-overhead-power-line-installation-cost-comparison-.html [accessed 01.20.18].

[4] Chade D., Miklis T., Dvorak D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic re-mote locations – Grimsey island case study. *Renewable Energy*, 2015;76:204–211, ISSN 0960-1481. Available on: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114007381) [accessed 01.04.18].

[5] Svalbard's electric power could come from hydrogen. SINTEF. Science Daily. 2017. Available on: https://www.sciencedaily.com/releases/2017/02/170207104356.htm [accessed 01.04.18].

[6] Underground Electric Transmission Lines. Public Service Commission of Wisconsin Electric 11 (05/11), 2011. Available on: https://psc.wi.gov/Documents/Under%20Ground%20Transmission.pdf [accessed 01.20.2018].

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[7] How much energy is consumed in US residential and commercial buildings? US Energy Information Administration. May 10, 2017. Available on: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1[accessed 01.20.2018].

[8] Wind Energy Reduces Greenhouse Gas Emissions. American Wind Energy Association. Available at: http://www.awea.org/reducing-greenhouse-gas-emissions [accessed 08.03.17].

[9] Information. Statistics. World Wind Energy Association 2016. Available on: http://www.wwindea.org/11961-2/ [accessed 01.08.17].

[10] Small wind world market: back on track again. World Wind Energy Association 2017. Available on: http://www.wwindea.org/small-wind-world-market-back-on-track-again/ [accessed 08.01.17].

[11] 2016 Wind Technologies Market Report, American Wind Energy Association, 2016. Available on: https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2016_wind_technologies_market_report_final_optimized.pdf [accessed 08.01.17].

[12] Bruckner T. *et al*. Report of IPCC Working Group III – Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology – specific Cost and Performance Parameters 2014. Available on: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf [accessed 01.08.18].

[13] EIA.gov. How much carbon dioxide is produced from burning gasoline and diesel fuel. US Energy Information Administration, updated 19.05.17. Available on: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11 [accessed 01.08.18].

[14] Consumption of energy. Eurostat Statistics Explained. European Commission. Modification of 09.11.2016. Available on: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy [accessed 02.08.17].

[15] Solomin E. Reports 1-4 of SRC-Vertical, Project RUE-2-010620-CH-06 "All-Climate Testing of Vertical Axis Wind Turbines", for Lawrence Berkeley National, DOE, USA, 2006-2009. Available per request from author or Glen Dahlbacka at LBNL.

[16] Vesborg P.C.K. Europe's real energy problem. Technologist 05, 2015. Available on: http://www.technologist.eu/europes-real-energy-problem/ [accessed 08.03.17].

[17] Dahlbacka G. Vertical Axis Windpower Systems and Opportunities. July 29, 2004. Berkeley Lab. Available on: http://www2.lbl.gov/today/2004/Jul/26-Mon/wind-jump.html [accessed 02.27.17].

[18] Solomin E. Reports 1–8 of SRC-Vertical on Project LBNL-T2-0203-RU "Development of Low-Maintenance Wind Power Systems" for Lawrence Berkeley National Laboratory and US Department of Energy. 2004–2006. Available on: http://newscenter.lbl.gov/2004/10/04/from-russia-with-wind-power/ [accessed: 02.22.2017].

[19] Ashwill T.D., Sutherland H.J., Berg D.E. A Retrospective of VAWT technology. Report of Sandia National Laboratories #SAND2012-0304, TRN: US201205%%90. 01.01.12. DOI: 10.2172/1035336. Available on: https://www.osti.gov/scitech/biblio/1035336-retrospective-vawt-technology [accessed 02.26.17]

[20] Ruff H. Why Is There So Much Confusion About "Small Wind"? CleanTechnica 2014 October 27th. Available on: https://cleantechnica.com/2014/10/27/small-wind-turbine-myths/ [accessed 02.27.17].

[21] Parker H.S. The Hidden Human Tragedy Caused by Incessant Wind Turbine Noise. European Platform Against Windfarms. Available on: https://stopthesethings.com/author/stopthesethings/page/2/ [accessed 05.01.17].

[22] Solomin E., Kirpichnikova I., Martyanov A. Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines. Applied Mechanics and Materials Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering 2015; 792:582–89.

[23] SWIP – New innovative solutions, components and tools for the integration of wind energy in urban and periurban areas. Spain, Great Britain. Program: FP7-ENERGY. European Commission. Modification of 17.07.2017. Available on: http://cordis.europa.eu/news/rcn/137715_en.html [accessed 08.03.17].

[24] Next-Generation Wind Technology. EU-funded projects. Available on: https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/ [accessed 08.03.17].

[25] WWEA released latest global small wind statistics. Jun.2, 2017. Available on: http://www.wwindea.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/ [accessed 01.20.18].

[26] da Rosa A.V. Fundamentals of Renewable Energy Processes. 3rd Edition. p. 688, Chapter 15 "Wind Energy". 2013. ISBN: 978-0-12-397219-4. Available on: http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123972194 [accessed 01.26.18].

[27] Borg M., Collu M., Brennan F.P. Offshore floating vertical axis wind turbines: advantages, disadvantages, and dynamics modeling state of the art. The Royal Institution of Naval Architects. Marine & Offshore Renewable Energy. September 2012, London, UK. Available on: https://www.researchgate.net/publication/235963001_Offshore_floating_vertical_axis_wind_turbines_Advantages_disadvantages_and_dynamics_modelling_state_of_the_art [accessed 01.24.18].

[28] Albuquerque I.M., Matos F.F. d. S. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines. IEEE Latin America Transaction 2016; 14(10): 4255-60. Available on: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786302&isnumber=7786295 [accessed 01.22.18].

[29] Solomin E.V. Development and optimizing of vertical axis wind turbines (Osnovy metodologii razrabotki vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ustanovok). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2011;1:18–39. Available on:
https://www.researchgate.net/profile/Evgeny_Solomin [accessed 03.04.18].

[30] Züttelab A. *et al*. Storage of Renewable Energy by Reduction of CO_2 with Hydrogen. *Sion, a new Center for Chemistry and Chemical engineering in Valais. CHIMIA*, 2015;69(5):264–68.

[31] Energy Density of Hydrogen. An encyclopedia of scientific essays. The Physics Factbook. 2005.

[32] Hislop M. Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough. The American Energy News. Available on: http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough [accessed 03.15.17].

[33] Espinar B., Mayer D. The role of energy storage for mini-grid stabilization. Report IEA-PVPS T11-02:2011, IEA PVPS Task 11, July 2011, p.28.

[34] Amiryar M.E, Pullen K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Appl. Sci*., 2017;7:286.

[35] Hydrogen Storage. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy. Available on: https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage [accessed 01.23.18].

[36] LeRoy R.L., Bowen C.T., LeRoy D.J. The thermodynamics of aqueous water electrolysis. *J. Electrochem. Soc*., 1980;127:1954–1962.

[37] Zeng K., Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog. Energy Combus. Sci*., 2010; 36:307–326.

[38] Ramesh Gupta, Properties of Hydrogen. Cryogenic Data Handbook. Brookhaven National Laboratory, US Department of Energy. Available on: https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section3.pdf [accessed 02.23.17].

[39] Dias R.P., Silvera I.F. Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen. *Science*, 2017;355:715–18. doi:10.1126/science.aal1579, 2017.

[40] Wind-to-Hydrogen Project. Hydrogen and Fuel Cells. National Renewable Energy Laboratory. DOE. USA. Available on:
https://www.nrel.gov/hydrogen/wind-to-hydrogen.html. [accessed 02.23.17].

[41] Pavlov N.A., Rogachev D.S., Sinickiy A.V., Solomin E.V. Autonomous Power Supply for Extreme North Ob-jects (Avtonomnoe energosnabzhenie ob"ektov krainego severa). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2015;(10–11):75–83. DOI:10.15518/isjaee.2015.10-11.007 (in Russ.).

[42] Solomin E.V., Topolsky D.V., Topolskaya I.G.Algorithms of LiFePO4 batteries automatic charge. *Procedia Engineering Journal*, 2015;129:213–218 (Journal reference: PROENG27158. PII: S1877–7058(15)03919–3) DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.035. Available on:
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039193. [accessed 02.23.17].

[43] Korobatov D.V., Sirotkin E.A., Troickiy A.O., Solomin E.V. Wind Turbine Power Plant Control, Materials of X International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics, IEEE), Omsk State Technical University, Nov. 2016.

[44] Martyanov A.S., Solomin E.V., Korobatov D.V. Development of control algorithms in Matlab/Simulink. *Procedia Engineering Journal*, 2015;129:922–26 (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[45] Grakhov Y.V., Solomin E.V. et al. Patent # 2347104 Russian Federation, IPC F03D 3/06 (2006.1). Rotor of wind turbine with vertical axis of rotation (Rotor vetryanoi ustanovki s vertikal'noi os'yu vrashcheniya (varianty)). Applied on 12.05.2006. Available on: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059231888 (in Russ.).

[46] Grakhov Y.V., Solomin E.V. et al. Patent # 2443902 Russian Federation, IPC F03D3/06 (2006.01). Rotor of vertical axis wind turbine (Vetrokoleso vetroenergeticheskoi ustanovki s vertikal'noi os'yu vrashcheniya). Applied on 27.05.2010. Available on: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059266358 (in Russ.).

[47] Solomin E.V. Patent # 101105 Russian Federation, IPC F03D 9/02 (2006.01). Combined wind solar energy unit with LED lighter for public places (Kombinirovannaya vetrosolnechnaya energeticheskaya ustanovka so svetodiodnym prozhektorom dlya sotsial'nykh nuzhd) Applied on 09.08.2010 Available on:
http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1519059343881 (in Russ.).

[48] Sirotkin E.A., Martyanov A.S., Solomin E.V., Kozlov S.V. Emergency Braking System for the Wind Turbine. *Procedia Engineering Journal (ICIEAM)*, 2016; (PROENG27157. PII: S1877–7058(15)03968–5).

[49] Basic considerations for the safety of hydrogen systems. ISO/TR 15916:2015. International Organization for Standardization. Available on: https://www.iso.org/standard/56546.html?browse=tc [accessed 01.25.18].

[50] Pressure Equipment Directive 97/23/CE. European Commission. Available on:
https://ec.europa.eu/growth/sectors/pressure-gas/pressure-equipment/directive_en [accessed 01.25.18].

[51] Gusev A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2009;45(9–10):640.

[52] Gusev A.L., Kazaryan M.A. Manufacture Nanocomposites Membranes for clearing Chlorine//Work Meet-ing, Bayer MaterialScience AG, Leverkuzen, Germany, 12–15, August, 2007.

[53] Favier F.L., Walter E.C., Zach M.P., Benter T., Penner R.M. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays. *Science*, 2001;293(5538):2227–31.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[54] Gusev A.L., Belousov V.M., Bacherikova I.V., Lyashenko L.V., Rozhkova E.V. Hydrogen Sensor for Cryogenic Vacuum Objects. *Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides, 01/2002*: pp. 41–47. ISBN: 978-1-4020-0731-6, DOI:10.1007/978-94-010-0558-6_5.

[55] Gusev A.L., Belousov V.M., Bachericova I.V., Rozhkova E.V. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum ob-jects. *Abstacts book of NATO International Conference Katsiveli*, Yalta, Ukraine September 02–08, 1999, p.370; A.L. Gusev, V.M. Belousov, I.V. Bachericova, E.V. Rozhkova. Hydrogen Sensor for Cryogenic vacuum objects. Book full-text of NATO International Conference, 09/1999, p. 370.

[56] Eberle U., Mueller B., von Helmolt R. Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012. *Energy & Environmental Science*, 2012;5(10):8790–98.

[57] Gusev A.L. Thermodynamic peculiarities of low-temperature regeneration of cryosorption devices in heat-insulation cavities of hydrogenous cryogenic tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001;26(8):863-871. DOI 10.1016/S0360-3199(01)00024-6.

[58] Gusev A.L. Flaw detection of large cryogenic objects with regard for the effect of effusion induced hydrogen superinsulation instability. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2000;1:103–108.

[59] Gusev A.L. Anomalies of the residual superinsulation pressure under emergency conditions of cryogenic objects. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2000;1:55–75.

[60] Bratsch S.G. Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K. *J. Phys. Chem. Ref. Data. American Institute of Physics*, 1989;18(1):1–21.

[61] GOST (RF Standard) 3022-80. Hydrogen for industrial use. Specifications (Vodorod tekhnicheskii. Tekhnicheskie usloviya) (in Russ.).

[62] Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Simulation of a generator for a wind power unit. *Russian Electrical Engineering*, 2013;84(10):46–49. DOI:10.3103/S1068371213100076.

[63] Goltsov V.A., Veziroglŭ T.N. From hydrogen economy to hydrogen civilization (Ot vodorodnoi ekonomiki k vodorodnoi tsivilizatsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):25–32 (in Russ.). doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.025-032 (previously: *International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)*, 2001;26:909–915 (in Eng.).

[64] Galeev A.G., Gusev E.V., Zolotov A.A., Odelevskiy V.K., Rodchenko V.V. The method of optimization of maintenance and reliability of complex technical systems operating on oxygen-hydrogen fuel (Metodika optimizatsii parametrov tekhnicheskogo obsluzhivaniya i pokazatelei bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem, funktsioniruyushchikh na kislorodno-vodorodnom toplive). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(1–3):22–33. DOI:10.15518/isjaee.2017.01-03.022-033 (in Russ.).

[65] Naman S.A., Türe I.E., Veziroglŭ T.N. Industrial extraction pilot plant for stripping H_2S gas from black sea water (Pilotnaya promyshlennaya ustanovka po desorbtsii H_2S iz vody chernogo morya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(22–24):99–109. doi:10.15518/isjaee.2017.22-24.025-032 (in Russ.) (previously: *International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)*, 2008;33:6577–6585 (in Eng.).

[66] Research Focuses on Overcoming Challenges. Hydrogen Production: Electrolysis, Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy. Available on: https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis [accessed 01.25.18].

[67] Varkaraki E., Lymberopoulos N., Zoulias E. et al. Hydrogen based Uninterruptible Power Supply. 2nd European Hydrogen Energy Conference – EHEC 2005, Nov. 22–25, Zaragoza. Available on: http://www.cres.gr/kape/hmerida/files/ydrogen/Varkaraki_EHEC_05%20HELPS.pdf [accessed 01.24.18].

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 25.04.18. Ред. рег. № 1345-2751-1 The article has entered in publishing office 25.04.18. Ed. reg. No. 1345-2751-1

УДК 621.311

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ*

***С.Г. Обухов*[1], *И.А. Плотников*[1], *В.Г. Масолов*[2]**

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
д. 30, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия
тел.: +7 (3822) 60-63-33
[2]ООО «ВДМ-техника»
стр. 1, дом 23а, ул. Долгоруковская, Москва, 127006, Россия
тел.: +7 (3822) 56-35-01; e-mail: serob99@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067

Заключение совета рецензентов: 03.05.18 Заключение совета экспертов: 08.05.18 Принято к публикации: 15.05.18

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Представлены результаты сравнительного анализа режимов работы автономного гибридного энергетического комплекса с накопителем энергии и без накопителя. Предложена методика определения энергетических характеристик основных компонентов гибридного энергетического комплекса: потребителей электроэнергии, ветроэнергетических и фотоэлектрических установок, – построены их имитационные модели.

Установлено, что для компенсации сезонных колебаний мощности в автономных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии требуются накопительные устройства емкостью на десятки МВт·ч, способные обеспечивать хранение энергии длительностью до полугода, что позволит отказаться от накопительных устройств для сглаживания сезонных колебаний энергетического баланса.

Результаты анализа суточного энергетического баланса гибридной электростанции показали, что применение накопителей энергии для сглаживания суточных колебаний мощности в локальных энергосистемах является технически реализуемой задачей, обеспечивающей значительное повышение их энергетической эффективности. Анализ режимов работы накопителей энергии продемонстрировал, что для запаса и выдачи энергии на временных интервалах продолжительностью в несколько часов не требуются накопительные устройства с относительно высокими значениями зарядной и разрядной мощности, то есть для реализации функций сглаживания суточных пиков избытка и дефицита мощности можно использовать свинцово-кислотные аккумуляторные батареи глубокого разряда.

Определено, что в зарядно/разрядных токах накопителя энергии неизбежны низкочастотные и высокочастотные пульсации большой амплитуды, обусловленные изменениями выходной мощности установок возобновляемой энергетики и нагрузки. И если низкочастотные пульсации (период десятки минут) могут частично демпфироваться за счет ограничения максимального зарядного тока аккумуляторных батарей, то устранить высокочастотные пульсации (период десятки секунд) в энергетических системах с единственным накопителем энергии принципиально невозможно.

Установлено, что наилучшим образом требованиям автономных энергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии соответствует комбинированный накопитель энергии, имеющий характеристики аккумулятора в режимах приема и выдачи мощности на суточных временных интервалах и обладающий свойствами суперконденсатора в режимах приема и отдачи импульсов мощности на секундных отрезках времени.

Ключевые слова: гибридные энергетические системы; накопители энергии; аккумуляторная батарея; суперконденсатор.

*Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г. Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):55-67.

THE ANALYSIS OF OPERATION MODES OF ENERGY STORES IN AUTONOMOUS HYBRID POWER PLANTS WITH RENEWABLE ENERGY RESOURCES

S.G. Obukhov[1], I.A. Plotnikov[1], V.G. Masolov[2]

[1]National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia
tel.: +7 (3822) 60 63 33
[2]"VDM-tekhnika" LLC
23a/1 Dolgorukovskaya St., Moscow, 127006, Russia
tel.: +7 (3822) 56 35 01; e-mail: serob99@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067

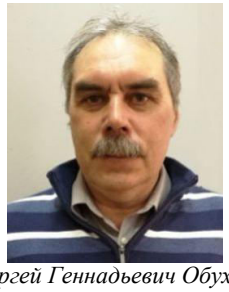
Referred 3 May 2018 Received in revised form 8 May 2018 Accepted 15 May 2018

The paper presents the results of the comparative analysis of operation modes of an autonomous hybrid power complex with/without the energy store. We offere the technique which defines the power characteristics of the main components of a hybrid power complex: the consumers of the electric power, wind power and photo-electric installations (the last ones have been constructed). The paper establishes that, in order to compensate the seasonal fluctuations of power in autonomous power systems with renewable energy resources, the accumulative devices are required, with a capacity of tens of MWh including devices that are capable to provide energy storage with duration about half a year. This allows abandoning the storage devices for smoothing the seasonal fluctuations in the energy balance.

The analysis of operation modes of energy stores has shown that for a stock and delivery of energy on time intervals, lasting several hours, the accumulative devices with rather high values of charging and digit power aren't required. It allows using the lead-acid rechargeable batteries of the deep category for smoothing the daily peaks of surplus and a capacity shortage. Moreover, the analysis of operation modes of energy stores as a part of the hybrid complexes has demonstrated that in charging/digit currents of the energy store the low-frequency and high-frequency pulsations of big amplitude caused by changes of size of output power of the renewable power installations and loading are inevitable. If low-frequency pulsations (the period of tens of minutes) can partially be damped due to the restriction of size of the maximum charging current of rechargeable batteries, then it is essentially impossible to eliminate high-frequency pulsations (the period of tens of seconds) in the power systems with the only store of energy. The paper finds out that the combined energy store having characteristics of the accumulator in the modes of receiving and delivery of power on daily time intervals, and at the same time having properties of the supercondenser in the modes of reception and return of impulses of power on second intervals of time is best suited to requirements of the autonomous power complexes with renewable energy resources.

Keywords: hybrid energy systems; energy storage; battery; supercapacitor.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Сергей Геннадьевич Обухов
Sergey Obukhov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики.

Образование: Томский политехнический университет (1985 г.).

Область научных интересов: энергетика; возобновляемая энергетика.

Публикации: более 100.

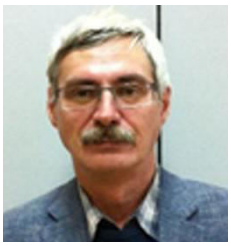
h-index: РИНЦ – 7, Scopus – 3.

Information about author: D.Sc. in Engineering, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Energy.

Education: Tomsk Polytechnic University, 1985.

Research interest: energy, renewable energy.

Publications: more than 100.



Игорь Александрович Плотников
Igor Plotnikov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики.

Образование: Томский политехнический университет (1984 г.).

Область научных интересов: энергетика; возобновляемая энергетика; силовая электроника.

Публикации: 79.

h-index: РИНЦ – 5, Scopus – 4.

Information about author: Ph.D. in Engineering, Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Energy

Education: Tomsk Polytechnic University, 1984.

Research interest: energy; renewable energy; power electronics.

Publications: 79.

Владимир Геннадьевич Масолов
Vladimir Masolov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, генеральный директор ООО «ВДМ-техника».
Образование: Московский горный институт (1983 г.).
Область научных интересов: возобновляемая энергетика; ветроэнергетика.
Публикации: 8.

Information about author: Ph.D. in Engineering, General Manager of "VDM-tekhnika" LLC (Moscow).
Education: Moscow Mining University, 1983.
Research interest: renewable energy; wind power engineering.
Publications: 8.

1. Введение

Одним из способов повышения энергетической эффективности систем децентрализованного электроснабжения является использование в энергетическом балансе регионов возобновляемых источников энергии (ВИЭ). С учетом того, что мощность, генерируемая установками ВИЭ, крайне изменчива во времени, а потребителям необходимо гарантировать бесперебойную подачу электроэнергии, перспективным вариантом построения автономных энергетических систем являются гибридные электростанции (ГС), включающие в себя дизель-генераторные установки (ДГУ) и энергетические установки на базе ВИЭ [1, 2].

Важным элементом большинства ГС, особенно с высоким уровнем замещения органического топлива, является накопитель энергии (НЭ), применение которого позволяет повысить энергетическую эффективность электростанции за счет аккумулирования излишков энергии в периоды ее избытка, и отдачи потребителю в периоды дефицита. Актуальной проблемой проектирования ГС является определение рационального типа и емкости накопительного устройства [3, 4]. Сложность данной задачи обусловлена тем, что текущие значения выходной электрической мощности генерирующих источников могут изменяться в широком диапазоне, а характер их изменений имеет стохастическую природу. Определить рациональный тип и емкость НЭ позволяет анализ их режимов работы.

Данное исследование посвящено анализу режимов работы накопителей энергии. В работе предложена методика анализа рабочих режимов изолированных ГС с ВИЭ, впервые выполнен детальный анализ режимов работы НЭ в составе таких электростанций. Кроме того, установлены технические требования к эксплуатационным характеристикам НЭ, обоснована необходимость применения в составе ГС с ВИЭ комбинированных НЭ на основе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов.

Список обозначений	
Буквы греческого алфавита	
η	коэффициент полезного действия, о.е.
Буквы латинского алфавита	
A	Площадь, м^2
C, K	Постоянные коэффициенты
G	Солнечная радиация, кВт/м^2
H	Солнечная инсоляция, кВт·ч/м^2
N	Число дней, модулей
P	Мощность, кВт
T	Температура, ºС, ºК
V	Скорость ветра, м/с
W	Энергия, кВт·ч
Индексы нижние	
AB	Аккумуляторная батарея
ave	Среднее значение
conv	Конвертер
FF	Коэффициент заполнения (фулфактор)
FM	Фотомодуль
load	Нагрузка
min	Минимум
max	Максимум
nom	Номинальное значение
PV	Фотоэлектрическая установка
sRES	Замещение возобновляемой энергией
WT	Ветроэнергетическая установка
WW	Ветроколесо

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Продолжение списка обозначений

Аббревиатуры	
DOD	Допустимая глубина разряда
SOC	Остаточная емкость
АБ	Аккумуляторная батарея
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
ГС	Гибридная электростанция
ДГУ	Дизель-генераторная установка
НЭ	Накопитель энергии
СБ	Солнечная батарея
ФМ	Фотоэлектрический модуль
ФЭУ	Фотоэлектрическая установка

2. Теоретическая часть

Выбору рационального типа и емкости НЭ для ГС с ВИЭ посвящено множество научных работ. Как правило, выбор параметров НЭ осуществляется в рамках многопараметрической оптимизации состава оборудования ГС по критериям минимума затрат, эксплуатационной надежности, требуемому уровню замещения топлива, эмиссии выхлопных газов. Для решения задачи на основе анализа энергетического баланса в электростанции на продолжительных интервалах времени (обычно год) используются: специализированное программное обеспечение [5, 6], классические алгоритмы оптимизации [7, 8], метаэвристические методы на базе генетических алгоритмов [9, 10], алгоритмы роя частиц [11, 12] и др.

Подробный обзор научных исследований, касающихся выбора оптимального состава оборудования ГС с ВИЭ, представлен в работе [13]. Другие технические аспекты применения и эксплуатации НЭ в составе ГС с ВИЭ рассмотрены в работах [14–17]. В статье [14] разобраны основные технические характеристики НЭ и определены перспективные типы для аккумулирования энергии на разных временных интервалах. Оценка влияния емкости НЭ на расход дизельного топлива в изолированной энергетической системе на основе анализа годового баланса мощности выполнена в работе [15]. Суточный баланс мощности и влияние емкости НЭ на расход топлива и эмиссию выхлопных газов оценены в работе [16]. Подробный анализ потоков мощности в автономной электростанции с количественной оценкой потерь энергии дан в работе [17].

Представленные методы и результаты исследований позволяют выбрать НЭ для эксплуатации в составе ГС с ВИЭ, однако в перечисленных исследованиях не рассматривается анализ рабочих режимов НЭ, что не позволяет установить технические требования к эксплуатационным характеристикам НЭ по приему и выдачи мощности для различных интервалов времени. Определение этих требований является необходимым условием разработки эффективных систем накопления энергии для ГС с ВИЭ, обеспечивающих повышение их надежности и технико-экономической эффективности.

3. Постановка задачи

В качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривался условная гибридная электростанция, территориально расположенная в районе г. Томска с географическими координатами 56.5˚ с.ш., 85˚ в.д. Типовая структурная схема электростанции с сопряжением генерирующих установок на шине постоянного тока (DC) показана на рис. 1.

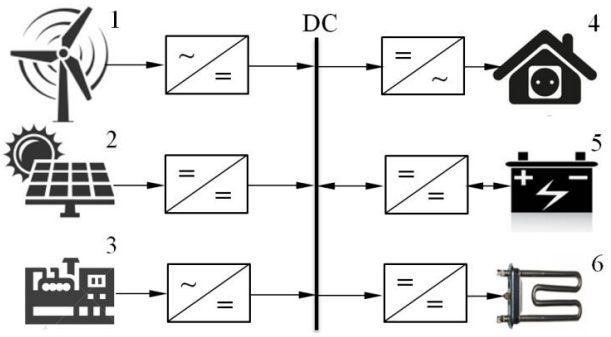


Рис. 1 – Типовая структурная схема гибридной электростанции с ВИЭ: *1* – ветроэнергетическая установка; *2* – фотоэлектрическая установка; *3* – дизель-генераторная установка; *4* – потребитель электроэнергии; *5* – накопитель энергии; *6* – балластная нагрузка

Fig. 1 – The standard block diagram of a hybrid power plant with renewable energy sources: *1* – wind turbine; *2* – PV systems; *3* – diesel generator set; *4* – electricity consumer; *5* – energy storage; *6* – dump load

В состав электростанции входят ДГУ, ветроэнергетические (ВЭУ) и фотоэлектрические (ФЭУ) установки, а также балластная нагрузка, подключенные к сборной шине через соответствующие преобразователи. Потребитель электроэнергии подключается к шине через автономный инвертор напряжения, а накопитель энергии, представляющий собой аккумуляторную батарею (АБ), – через реверсивный преобразователь.

Электростанция предназначена для электроснабжения коммунально-бытовых потребителей с суточным максимумом электрических нагрузок в январе $P_{\max}$ = 5 кВт. С помощью методики [18] были построены характерные суточные графики электрических нагрузок с часовой дискретизацией для каждого месяца года и определен годовой объем потребляемой электроэнергии, который составил W_{load} = 28 МВт·ч.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

В качестве исходных данных для определения энергетических характеристик рассматриваемой электростанции использовались статистические данные о средней скорости ветра V_{ave}, температуре окружающего воздуха T и среднесуточной инсоляции H из базы данных космического агентства США NASA SSE [19] за 22-х летний период наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

Значения средней скорости ветра, интенсивности солнечной радиации и температуры окружающего воздуха в г.Томске по данным NASA SSE [19]

Table 1

The values of average wind speed, intensity of solar radiation and the air temperature in Tomsk according to NASA SSE [19]

Месяц	V_{ave}, м/с	H, кВт·ч/м^2	T, °C
январь	3,49	0,69	–16,2
февраль	3,27	1,59	–14,5
март	3,14	2,94	–8,88
апрель	3,26	4,29	–0,99
май	3,28	5,48	11,1
июнь	2,94	5,79	17,1
июль	2,78	5,80	20,3
август	2,91	4,55	16,7
сентябрь	3,07	2,83	8,99
октябрь	3,30	1,58	1,19
ноябрь	3,42	0,83	–9,33
декабрь	3,45	0,46	–15,0

Задача исследования заключалась в определении требований к накопительным устройствам по объемам запасаемой энергии, режимам приема и отдачи мощности на продолжительных (месяцы, год), средних (часы, сутки) и коротких (секунды, минуты) интервалах времени.

4. Экспериментальная часть

4.1. Анализ годового энергетического баланса

Определим годовой энергетический баланс в гибридной электростанции при условии равенства объемов электроэнергии, отпущенной потребителю W_{load} и выработанной фотоэлектрическими W_{PV} и ветроэнергетическими W_{WT} установками (кВт·ч):

$$W_{load} = W_{PV} = W_{WT} . \quad (1)$$

Для расчёта общего количества электроэнергии, генерируемой ВЭУ в течение года, используем эмпирическое выражение [20]:

$$W_{WT} = \sum_{i=1}^{12} 2{,}92 \cdot 10^{-4} \cdot A_{WW} \cdot T_i \cdot V_{ave_i}^3 , \quad (2)$$

где A_{WW} – площадь ветроколеса, м^2; T_i – число часов эксплуатации ВЭУ в i-том месяце года; V_{ave_i} – среднемесячная скорость ветра в i-том месяце года, м/с.

Годовой объем электроэнергии, вырабатываемый ФЭУ, определяется по уравнению [21]:

$$W_{PV} = \sum_{i=1}^{12} H_i \cdot \eta \cdot A_{PV} \cdot N_i , \quad (3)$$

где H_i – среднесуточная интенсивность солнечной радиации в i-том месяце года, кВт·ч/м^2; η – общий коэффициент полезного действия солнечной батареи с преобразователями (в расчетах принят равным 0,14); A_{PV} – площадь солнечной батареи, м^2; N_i – число дней эксплуатации ФЭУ в i-том месяце года.

Расчетный годовой энергетический баланс гибридной электростанции при принятых условиях показан на рис. 2.

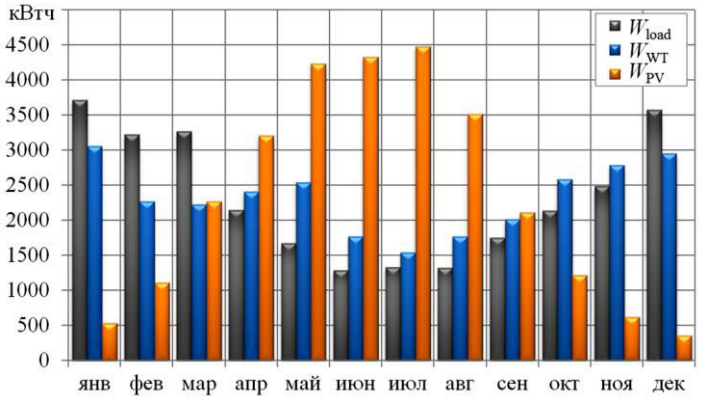


Рис. 2 – Гистограммы годового энергетического баланса гибридной электростанции с ВИЭ, территориально расположенной в г. Томске
Fig. 2 – Histograms of an annual power balance of a hybrid power plant territorially located in Tomsk

Расчеты показали, что для полного покрытия потребляемой за год энергии для данной электростанции необходимо использовать или 14 ВЭУ номинальной мощностью 5 кВт, или 110 ФМ мощностью 260 Вт. Однако, даже в этом случае, не будет никакой гарантии надёжного электроснабжения потребителей только от установок ВИЭ, так как объемы генерируемой и потребляемой энергии значительно различаются по месяцам года. Например, для ФЭУ максимальное значение генерируемой энергии наблюдается в июле и составляет 4,5 МВт·ч, что практически в 3,5 раза превышает объем энергии, потребляемой нагрузкой в данном месяце. Максимальный дефицит энергии ФЭУ имеется в декабре и составляет 3,2 МВт·ч, то есть около 90 % от требуемого объема. Совместное использование в составе

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

электростанции ВЭУ и ФЭУ позволяет улучшить ситуацию по объемам избытка и дефицита энергии по сезонам года, но полностью проблему не решает. Для полного сглаживания сезонных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии для данной электростанции требуется НЭ емкостью около 10 МВт·ч, способный обеспечить хранение энергии в течение полугода. Но на современном этапе развития технологий применение накопителей энергии с такими характеристиками или технически невозможно, или экономически нецелесообразно [22, 23].

4.2. Анализ суточного энергетического баланса

Рассматривался суточный энергетический баланс в ГС с 5-ю ВЭУ VDM-2 [24] производства ООО «ВДМ-техника» суммарной установленной мощностью 10 кВт и ФЭУ, построенной на базе 40 ФМ JAP6-60-250 [25] суммарной мощностью 10 кВт. В качестве объекта электроснабжения был принят условный потребитель с максимальной электрической нагрузкой P_{max} = 5 кВт и типичным графиком электрических нагрузок децентрализованных потребителей.

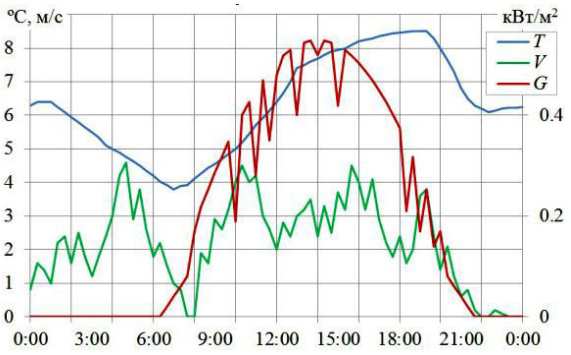


Рис. 3 – Климатические ряды изменения основных метеорологических факторов в г. Томске 9 мая 2017 года
Fig. 3 – Climatic change ranks of the major meteorological factors in Tomsk on May 9, 2017

Для проведения анализа привлекались данные архивов погоды за 9 мая 2017 года, полученные с сайта «Расписание погоды» [26]. На основе статистических архивных данных для этого дня года с интервалом в 20 мин были сгенерированы климатические ряды изменения основных метеорологических факторов: температуры окружающего воздуха (T, ºС), скорости ветра (V, м/с) и солнечной радиации (G, кВт/м^2) (рис. 3). При построении суточного хода солнечной радиации применялась методика, подробно изложенная в [27].

Вычисление текущих значений выходной электрической мощности ФЭУ осуществлялось с помощью эмпирического выражения, полученного A.D. Jones и C.P. Underwood и обеспечивающего хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований [28]:

$$P_{PV} = C_{FF} \cdot N_{FM} \cdot \eta_{conv} \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G)/T_{FM}\,, \qquad (4)$$

где N_{FM} – число фотоэлектрических модулей (ФМ) в солнечной батарее; C_{FF} – постоянный коэффициент; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м^2; T_{FM} – текущая температура ФМ, ºК.

Численные значения переменных в уравнении (4) были определены по данным технической спецификации ФМ [25] с выражениями, приведенными в [29].

Для описания энергетических характеристик ВЭУ использовалась система уравнений, позволяющая определить выходную электрическую мощность по известной рабочей характеристике ВЭУ [30]:

$$P_{WT} = \begin{cases} P_{nom} \cdot \dfrac{V - V_{min}}{V_{nom} - V_{min}} & \text{if} \quad V_{min} \le V \le V_{nom} \\ P_{nom} & \text{if} \quad V_{nom} \le V \le V_{max} \\ 0 & \text{if} \quad V < V_{min} \text{ or } V > V_{max} \end{cases} \qquad (5)$$

где P_{nom} – номинальная мощность ВЭУ, заявленная производителем.

Расчетные зависимости изменения мощностей ВЭУ, ФЭУ и электрической нагрузки в течение рассматриваемого дня показаны на рис. 4.

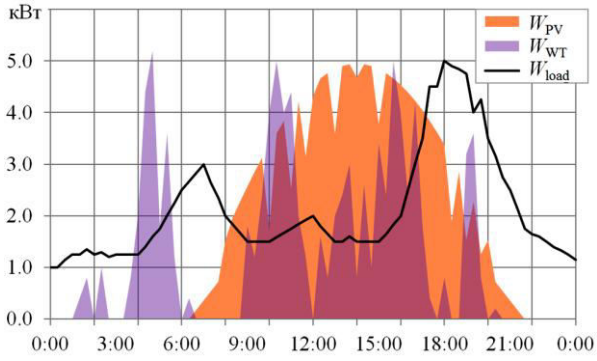


Рис. 4 – Расчетные зависимости изменения мощностей ВЭУ, ФЭУ и электрической нагрузки в течение суток
Fig. 4 – Predicted dependences of capacity change of the wind power installation, the photopower station, and electric loading within a day

На основании проведенных расчетов установлено, что генерируемая за сутки электроэнергия W_{WT} = 31,3 кВт·ч, W_{PV} = 43,8 кВт·ч, а значение потребленной энергии W_{load} = 51,3 кВт·ч. Однако, несмотря на то что суммарная энергия, генерируемая установками ВИЭ, намного превышает потребляемую энергию, на суточном графике изменения мощностей (рис. 4) отчетливо видны временные интервалы, на которых суммарная мощность установок ВИЭ не обеспечивает полного покрытия электрической нагрузки. Расчетные диаграммы избытка и дефицита мощности электростанции без НЭ для рассматриваемых суток приведены на рис. 5.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

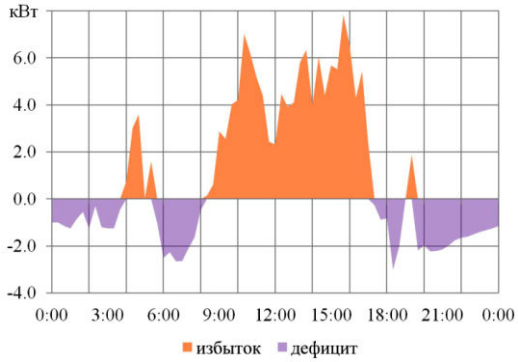


Рис. 5 – Суточные диаграммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции без накопителя энергии
Fig. 5 – Daily charts of surplus and a capacity shortage in a hybrid power plant without the energy store

НЭ для данной электростанции выбирался по заданному суточному значению максимума нагрузки $P_{\max}$ = 5 кВт, при этом типичное для коммунально-бытовых потребителей значение коэффициента максимума нагрузки $K_{\max}$ принималось равным 2,25. Среднесуточная нагрузка P_{ave} (кВт) определялась по выражению:

$$P_{ave} = \frac{P_{\max}}{K_{\max}} = \frac{5}{2,25} = 2,22. \quad (6)$$

Далее определяли необходимую емкость АБ для данной электростанции W_{AB} (кВт·ч) из условий, по которым время автономной работы от накопителя должно составлять не менее ΔT = 4 ч, а его допустимая глубина разряда DOD = 50 %:

$$W_{AB} \geq \frac{P_{ave} \cdot \Delta T}{\mathrm{DOD}} = \frac{2,22 \cdot 4}{0,5} \geq 17,8. \quad (7)$$

Затем емкость АБ W_{AB} приняли равной 20 кВт·ч.

При выполнении оценочных энергетических расчетов для вычисления остаточной емкости АБ (SOC) использовали простую формулу без учета КПД преобразователя и саморазряда АБ:

$$\mathrm{SOC}(t + \Delta t) = \mathrm{SOC}(t) \pm P_{AB} \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где P_{AB} – зарядная (разрядная) мощность АБ (кВт), или мощность, которая забирается (отдается) с шины DC на интервале Δt.

В первом приближении рассматривался энергетический баланс в ГС с ВИЭ, которая укомплектована идеализированной АБ, способной аккумулировать все имеющиеся излишки мощности (рис. 6). Остаточная емкость АБ на начало суток принята равной 75 % от номинальной емкости SOC = 15 кВт·ч.

Анализ энергетического баланса, представленного на рис. 6, показывает, что введение в состав электростанции НЭ обеспечивает повышение ее энергетической эффективности. Коэффициент замещения возобновляемой энергией на рассматриваемом суточном интервале K_{sRES} = 1,0. Это означает, что все потребители данной электростанции обеспечиваются электроэнергией только за счет ВИЭ (без ДГУ).

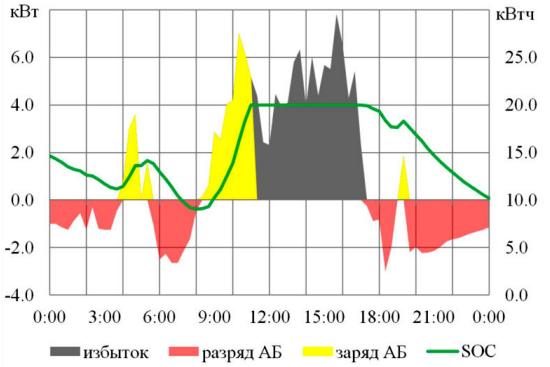


Рис. 6 – Суточный энергетический баланс в гибридной электростанции с идеализированным накопителем энергии
Fig. 6 – Daily power balance in a hybrid power plant with the idealized energy store

Далее оценивались рабочие режимы НЭ с точки зрения требований к его зарядно-разрядным характеристикам. В соответствии с рис. 6 при работе накопителя в составе ГС с ВИЭ режимы заряда чередуются с режимами разряда с меняющимися в широком диапазоне значениями зарядной/разрядной мощности. Максимальная зарядная мощность в рассматриваемом примере составила более 30 % от номинальной емкости АБ, а разрядная мощность во всех режимах не превышала 15 %.

Такие значения разрядной мощности могут обеспечивать практически все типы электрохимических аккумуляторов, однако, способностью к приему относительно высоких значений зарядной мощности без существенной деградации характеристик обладают только определенные типы АБ, например литий-ионные.

Для сравнительной оценки необходимости применения в ГС с ВИЭ накопительных устройств с высокими значениями зарядной мощности следует рассмотреть энергетический баланс в электростанции, где в качестве накопителя используются свинцово-кислотные АБ (рис. 7).

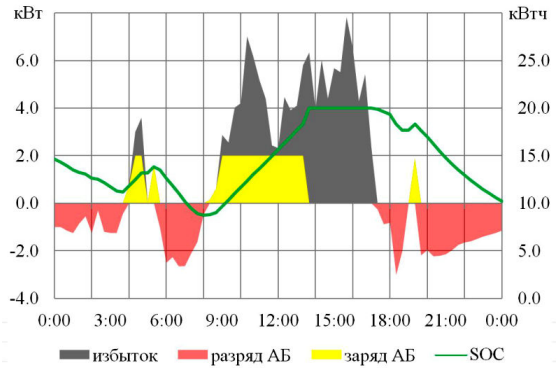


Рис. 7 – Суточный энергетический баланс в гибридной электростанции с накопителем энергии из свинцово-кислотных аккумуляторов
Fig. 7 – Daily power balance in a hybrid power plant with the energy store from the lead-acid accumulators

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

При проведении расчетов, представленных на рис. 7, максимальная зарядная мощность АБ была ограничена 10 % от их номинальной емкости, что соответствует рекомендациям производителей свинцово-кислотных АБ. В представленном энергетическом балансе (см. рис. 7) накопитель энергии на базе свинцово-кислотных АБ обеспечивает выполнение всех функций идеализированного накопителя, но при этом его стоимость будет гораздо меньшей, как и мощность реверсивного преобразователя. На временном интервале избытка мощности свинцово-кислотный накопитель успевает зарядиться до номинальной емкости, что позволяет ему также эффективно, как и идеализированному накопителю, компенсировать все режимы дефицита мощности. Относительно высокие значения саморазряда свинцово-кислотных АБ также не критичны, поскольку, если они заряжены до полной емкости, в электростанции имеется избыток мощности – в этом случае легко обеспечить для АБ режим поддерживающего заряда.

Необходимо отметить, что по окончании рассматриваемого суточного интервала остаточные емкости идеализированного и свинцово-кислотного накопителей практически одинаковы. Это свидетельствует о том, что никаких практических выгод от использования накопителя с большой зарядной мощностью в данной энергосистеме не получают.

Кроме того, нет необходимости применять в гибридных электростанциях с ВИЭ накопительные устройства, характеризуемые высокими значениями разрядной мощности (например, литий-ионные АБ). В рассмотренных примерах максимальная разрядная мощность накопителя составила не более 15 % от его номинальной емкости, при этом в расчетах использовался накопитель относительно небольшой емкости, рассчитанный всего на 4 часа автономной работы (с увеличением емкости накопителя пропорционально растет и его разрядная мощность). С учетом того что допустимая разрядная мощность свинцово-кислотных АБ, при которой обеспечивается их максимальный жизненный цикл, не должна превышать значений 0,2 ÷ 0,3С, это условие в большинстве практических случаев будет легко выполнимо.

Таким образом, на основании результатов представленных исследований можно сделать вывод о том, что зарядно-разрядные характеристики свинцово-кислотных АБ, как правило, удовлетворяют требованиям ГС с ВИЭ по аккумулированию и хранению энергии на средних (несколько часов) временных интервалах.

Рассмотренный энергетический баланс выполнен на примере одной конкретной электростанции в течение одних суток, однако с высокой долей уверенности можно утверждать, что он является типичным для большинства подобных энергетических систем.

Весомым аргументом в пользу данного утверждения может служить тот факт, что энергетические потенциалы ветра и солнечного излучения в большинстве случаев имеют выраженную сезонную составляющую, которая обязательно учитывается при проектировании ГС. Для хороших энергетических характеристик ГС необходимо обеспечить покрытие основной доли потребляемой энергии за счет энергии, генерируемой установками возобновляемой энергетики. В связи с этим выбор основного генерирующего оборудования ГС производят с учетом данного условия в месяце года с наихудшим энергетическим потенциалом ВИЭ, то есть большую часть года в ГС с ВИЭ будет избыток мощности. Кроме того, допустимый уровень DOD для свинцово-кислотных АБ небольшой, и даже для АБ глубокого циклирования уровень DOD обычно принимается не более 40 ÷ 50 %, что обеспечивает их заряд до полной емкости током 0,1 С за 4 ÷ 5 часов.

4.3. Анализ режимов приема и выдачи мощности

Характерной особенностью гибридных электростанций с ВИЭ являются значительные колебания генерируемой мощности на коротких временных интервалах длительностью в несколько секунд. Для анализа подобных режимов использовались фактические данные эксплуатации ВЭУ VDM-2 в г. Санкт-Петербурге, которые представлены на сайте ООО «ВДМ-техника» [24]. На рис. 8 приведены результаты мониторинга рабочего режима ВЭУ, снятые 23 января 2017 г.

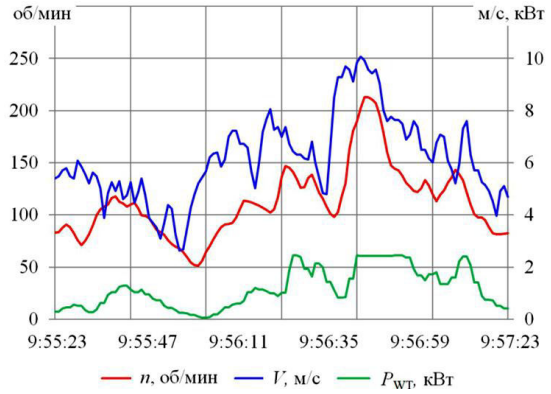


Рис. 8 – Результаты мониторинга рабочего режима ВЭУ VDM-2 23 января 2017 г.
Fig. 8 – Results of monitoring of an operating mode of the wind power installation VDM-2 on January 23, 2017

На рис. 8 на двухминутном временном интервале с односекундной дискретизацией представлены графики изменения следующих величин: V – скорость ветра, м/с; n – частота вращения ротора ВЭУ, об/мин; P_{WT} – выходная электрическая мощность ВЭУ, кВт.

Регистограмма частоты вращения ВЭУ (рис. 8) показывает, что высокочастотные флуктуации скорости ветра (доли Гц) практически не влияют на ее выходную мощность, так как демпфируются инерционными массами вращающихся частей ВЭУ. При этом колебания скорости ветра с частотами, соизмеримыми с инерционной постоянной ВЭУ, определяют ее выходную мощность.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Инерционная постоянная ВЭУ VDM-2 равна 7 сек., и, соответственно, выходная электрическая мощность на близких к этому значению отрезках времени может изменяться в очень широком диапазоне, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 8.

Таким образом, при наличии ВЭУ в составе автономных электростанций высока вероятность появления режимов избытка и дефицита мощности не только на относительно продолжительных (минуты, часы), но и очень коротких интервалах времени (секунды). На этом этапе следует выполнить анализ данных режимов на примере электростанции, в составе которой есть одна ВЭУ VDM-2, работающая в режиме, представленном на рис. 8. Для удобства сопоставления новых данных с результатами представленных выше исследований, осуществим масштабирование основных параметров генерирующих источников и накопителя. Принятые для исследования параметры электростанций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры гибридных электростанций, принятые в исследованиях

Table 2

The parameters of hybrid power plants accepted in the researches

Наименование параметра	Электростанция на базе 5 ВЭУ VDM-2	Электростанция на базе 1 ВЭУ VDM-2
Номинальная мощность ВЭУ, P_{WT}	10 кВт	2 кВт
Максимум электрической нагрузки, P_{max}	5 кВт	1 кВт
Номинальная емкость накопителя, W_{AB}	20 кВт·ч	4 кВт·ч

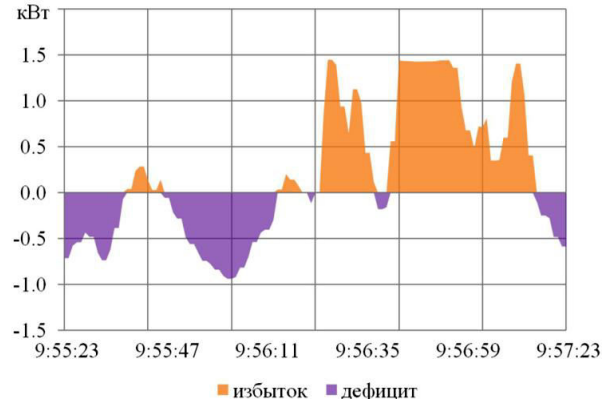


Рис. 9 – Гистограммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции без накопителя энергии
Fig. 9 – Histograms of surplus and shortage of capacity in a hybrid power plant without the energy store

Расчетные гистограммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции, единственным генерирующим источником которой является ВЭУ VDM-2 (электрическая нагрузка P_{load} принята неизменной и равной 1 кВт), на двухминутном временном интервале представлены на рис. 9.

Анализ гистограмм (рис. 9) показал, что и по относительным значениям колебаний мощности, и характеру их изменения они подобны суточным гистограммам на рис. 5.

Результаты расчета энергетического баланса в ГС с НЭ емкостью W_{AB} = 4 кВт·ч и зарядным током 0,1 С представлены на рис. 10.

Результаты расчета энергетического баланса показали, что НЭ на базе АБ позволяет компенсировать режимы дефицита мощности, возникающие в системе, при этом разрядная мощность НЭ не превышает допустимых значений. Однако, зарядная мощность, как на суточных графиках (рис. 7), остается переменной, и режимы заряда чередуются с режимами разряда. Необходимо отметить, что чередование режимов заряда/разряда накопителя, построенного на базе АБ, на коротких временных интервалах является особенно губительным для эксплуатационного ресурса аккумуляторов. Как известно, ресурс АБ определяется числом зарядно/разрядных циклов, а на рис. 10 видно, что всего за 120 сек. накопитель энергии подвергается 4 неполным зарядно/разрядным циклам, что приведет к заметному сокращению его ресурса.

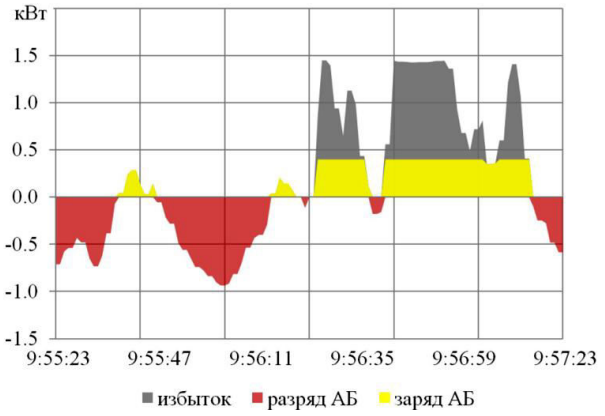


Рис. 10 – Энергетический баланс в гибридной электростанции с накопителем энергии
Fig. 10 – Power balance in a hybrid power plant with the energy store

Кроме того, на рис. 10 видно, что ввиду ограничений максимального зарядного тока накопитель энергии на базе АБ не может принять все избытки мощности, имеющиеся в системе, на коротких интервалах времени. Это приводит к снижению коэффициента замещения возобновляемой энергии в ГС и, соответственно, к ухудшению общей энергетической эффективности электростанции.

Аналогичные результаты можно получить и для ГС, основным генерирующим источником которой является ФЭУ, так как значения солнечной радиации, как и скорость ветра, могут изменяться в широком диапазоне за небольшие интервалы времени. А

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

поскольку стандартная ФЭУ, в отличие от ВЭУ, не имеет инерционных механических элементов, ее выходная электрическая мощность будет изменяться практически мгновенно и пропорционально солнечной инсоляции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что накопители энергии на базе АБ плохо удовлетворяют требованиям ГС с ВИЭ по приему и выдачи мощности на коротких временных интервалах длительностью до нескольких минут.

5. Результаты и их обсуждение

Анализ режимов работы ГС с ВИЭ показал, что они характеризуются значительными колебаниями потребляемой и генерируемой мощности на продолжительных (месяцы, год), средних (часы, сутки) и коротких (секунды, минуты) интервалах времени.

Наиболее значительные изменения мощности характерны для продолжительных временных интервалов и обусловлены ярко выраженной зависимостью энергетического потенциала ВИЭ от сезонов года. Для компенсации сезонных колебаний мощности в ГС с ВИЭ требуются накопительные устройства емкостью на десятки МВт·ч, способные обеспечивать хранение энергии длительностью до полугода.

Среди накопительных устройств данным требованиям отвечают только гидро- и пневмоаккумуляторы, размеры и стоимость которых для автономных энергетических систем небольшой мощности будут несоизмеримо большими. Относительно невысокая плотность энергии всех других известных типов НЭ [22, 23] и неизбежные потери при ее длительном хранении обусловливают техническую и экономическую нецелесообразность применения накопительных устройств для сглаживания сезонных колебаний энергетического баланса в ГС с ВИЭ, по крайней мере, на современном этапе развития технологий.

Требуемый уровень надежности электроснабжения потребителей в ГС с ВИЭ должен обеспечиваться основными генерирующими источниками, при выборе которых необходим учет сезонной составляющей изменения энергетического баланса. Основными факторами, определяющими вырабатываемую мощность (энергию) установками ВИЭ на длительных временных интервалах являются географические координаты и климатические условия месторасположения ГС. Так как большинство метеорологических факторов имеют стохастическую природу, достоверный прогноз их изменения на продолжительных временных отрезках может быть получен только на основе статистической обработки фактических данных метеонаблюдений длительностью не менее 10 лет.

Для компенсации колебаний мощности на средних интервалах времени требуются накопители, обеспечивающие запас энергии в несколько десятков кВт·ч со сроком хранения около суток. Этим требованиям наилучшим образом отвечают накопители энергии на основе электрохимических АБ. Проведенный анализ режимов работы НЭ в составе ГС с ВИЭ показал, что для запаса и выдачи энергии на временных интервалах продолжительностью в несколько часов не требуются АБ с относительно высокими значениями зарядной и разрядной мощности. Это позволяет использовать свинцово-кислотные АБ глубокого разряда серий Gel и AGM в целях сглаживания суточных пиков избытка и дефицита мощности.

Для компенсации кратковременных, но частых колебаний режимов ГС, вызванных порывом ветра или затенением части СБ налетевшим облаком, требуются НЭ, способные обеспечить быстрый прием и отдачу меняющихся в широких пределах значений мощности. Из известных типов накопителей энергии данным требованиям соответствуют суперконденсаторы (СК) [31]. Высокая удельная мощность, широкий диапазон рабочих температур, большое допустимое число циклов заряда/разряда, герметичность и экологичность конструкции определяют хорошую перспективу применения СК в самых различных областях техники, в том числе в энергетических системах с ВИЭ [31, 32]. Существенным недостатком, ограничивающим практическое применение СК в качестве основного накопителя энергии в ГС с ВИЭ, является низкая удельная плотность энергии.

6. Заключение

Проведенный анализ режимов работы накопителей в составе ГС с ВИЭ показал, что в зарядно/разрядных токах АБ неизбежны низкочастотные и высокочастотные пульсации большой амплитуды, обусловленные изменениями величины выходной мощности установок ВИЭ и нагрузки. И если низкочастотные пульсации (период десятки минут) могут частично демпфироваться за счет ограничения максимального зарядного тока АБ с помощью преобразователя, то устранить высокочастотные пульсации (период десятки секунд) в ГС с единственным накопителем энергии принципиально невозможно. В силу инерционности протекания химических реакций АБ плохо приспособлены для работы с импульсными токами. Наличие пульсаций в зарядно/разрядных токах АБ приводит к повышению их температуры, выкипанию электролита и коррозии электродов [33, 34]. Для обеспечения гарантированного срока службы АБ большинство производителей рекомендуют использовать двухуровневый режим заряда «постоянный ток – напряжение» и осуществлять перевод АБ в режим разряда только после ее полной зарядки. Однако с помощью накопителя энергии на базе АБ невозможно устранить чередование неполных режимов заряда с режимами разряда, особенно пагубных для АБ на коротких интервалах времени.

Для ГС с ВИЭ требуется накопитель энергии, имеющий характеристики аккумулятора в режимах приема и выдачи мощности на суточных временных интервалах и в то же время обладающий свойствами СК в режимах приема и отдачи импульсов мощности

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

на секундных отрезках времени. Такой тип накопителя можно создать только искусственным путем, объединив с помощью преобразователей в одном накопительном устройстве АБ и СК.

Комбинированный НЭ данного типа обеспечивает реализацию целого ряда важных функций: сглаживание пульсаций зарядно/разрядных токов АБ, оптимизацию режима заряда и остаточной емкости АБ, повышение эффективности использования энергии, генерируемой установками ВИЭ и др.

В конечном итоге применение комбинированных НЭ в ГС с ВИЭ позволяет добиться следующих положительных результатов: повышение надежности и энергетической эффективности электростанции, снижение эксплуатационных затрат и уменьшение себестоимости генерируемой электроэнергии.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор работ – RFMEFI57617X0098 (соглашение № 14.576.21.0098 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года).

Acknowledgments

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The unique identifier is RFMEFI57617X0098 (agreement No. 14.576.21.0098 dated 26 September 2017).

Список литературы

[1] Shivarama, K.K. A review on hybrid renewable energy systems [Text] / K.K. Shivarama, K.K. Sathish // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 52. – P. 907–916.

[2] Chauhan, A. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control [Text] / A. Chauhan, R.P. Saini // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 99–120.

[3] Chong, L.W. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems [Text] / L.W. Chong [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 66. – P. 174–189.

[4] Jing, W. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review [Text] / W. Jing [et al.] // IET Renewable Power Generation. – 2017. – Vol. 11. – No. 4. – P. 461–469.

[5] Rahman, M.M. A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community [Text] / M.M. Rahman [et al.] // Energy. – 2016. – Vol. 97. – P. 151–160.

[6] Upadhyay, S. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems [Text] / S. Upadhyay, M.P. Sharma // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 47–63.

[7] Rubio-Maya, C. Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources [Text] / C. Rubio-Maya [et al.] // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – No. 2. – P. 449–457.

[8] Kaabeche, A. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system [Text] / A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtiouen // Energy. – 2011. – Vol. 36(2). – P. 1214–1222.

[9] Koutroulis, E. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms [Text] / E. Koutroulis [et al.] // Solar Energy. – 2006. – Vol. 80(9). – P. 1072–1088.

[10] Senjyu, T. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy [Text] / T. Senjyu [et al.] // Renewable Energy. – 2007. – Vol. 32. – P. 1917–1933.

[11] Askarzadeh, A. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran [Text] / A. Askarzadeh, L. Coelho // Solar Energy. – 2015. – Vol. 112. – P. 83–96.

[12] Clarke, D.P. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination [Text] / D.P. Clarke, Y.M. Al-Abdeli, G. Kothapalli // Energy. – 2015. – Vol. 88. – P. 457–468.

[13] Tezera, T. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems [Text] / T. Tezera, R. Yaman, G. Yaman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 73. – P. 840–863.

[14] Barton, J.P. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [Text] / J.P. Barton, D.G. Infield // Transactions on energy conversion. – 2004. – Vol. 19. – P. 441–448.

[15] Gan, L.K. Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland [Text] / L.K. Gan, J.K.H. Shek, M.A. Mueller // Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 106. – P. 479–494.

[16] Bianchini, A. Optimization of a PV-wind-diesel hybrid system for a remote stand-alone application [Text] / A. Bianchini [et al.] // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 81. – P. 133–145.

[17] Ani, V. Design of a reliable hybrid (PV/Diesel) power system with energy storage in batteries for remote residential home [Text] / V. Ani // Journal of Energy. – 2016, article ID 6278138, 16 pages.

[18] Обухов, С.Г. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами [Текст] / С.Г. Обухов, З.П. Хошнау // Электрические станции. – 2012. – № 11. – С. 43-47.

[19] The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/ – (Дата обращения: 21.04.2018).

[20] Каргиев, В.М. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / В.М. Каргиев, С.Н. Мартиросов и др. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind_energy.pdf – (Дата обращения: 21.04.2018).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[21] Mohamed, M.A. Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems [Text] / M.A. Mohamed, A.M. Eltamaly, A.I. Alolah // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2015. – Vol. 7. – P. 1–18.

[22] Oberhofer, A. Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration / A. Oberhofer – Global Energy Network Institute (GENI), July, 2012. – 42 p.

[23] Akinyele, D.O. Review of energy storage technologies for sustainable power networks [Text] / D.O. Akinyele, R.K. Rayudu // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2014. – Vol. 8. – P. 74–91.

[24] Сайт ООО «ВДМ-техника». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vdmtech.ru/ – (Дата обращения: 21.04.2018).

[25] Сайт компании «JA SOLAR». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.jasolar.com/ – (Дата обращения: 21.04.2018).

[26] Российский метеорологический сайт «Расписание погоды». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rp5.ru/ – (Дата обращения: 21.04.2018).

[27] Обухов, С.Г. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России [Текст] / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 16–18. – С. 43–56.

[28] Jones, A.D. A thermal model for photovoltaic systems [Text] / A.D. Jones, C.P. Underwood // Solar Energy. – 2001. – Vol. 70. – No. 4. – P. 349–359.

[29] Обухов, С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации [Текст] / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.

[30] Bhandari, B. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review [Text] / B.Bhandari, K.Lee, G.Lee [et al.] // International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology. – 2015. – Vol. 2. – No. 1. – P. 99–112.

[31] Guerrero, M.A. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems [Text] / M.A. Guerrero [et al.] // Wydawca Wydawnictwo SIGMA-NOT, Czasopismo Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik. – 2009. – Vol. 85. – No. 10. – P. 188–195.

[32] Wang, Z. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation [Text] / Z. Wan [et al.] // Zhimin Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE Year: 2015 Pages: 1 – 5.

[33] Hu, X, Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach [Text] / X. Hu, C.M. Martinez, Y. Yang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 87. – No. 15. – P. 4–16.

[34] Kan, S.Y. The use of battery-capacitor combinations in photovoltaic powered products [Text] / S.Y. Kan, M. Verwaal, H. Broekhuizen // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 162. – No. 2. – P. 971–974.

References

[1] Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;52:907–916.

[2] Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;38:99–120.

[3] Chong L.W., Wong Y.W., Rajkumar R.K., Rajkumar R.K., Isa D. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;66:174–189.

[4] Jing W., Lai C.H., Wong W.S.H., Wong M.L.D. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. *IET Renewable Power Generation*, 2017;11(4):461–469.

[5] Rahman M.M., Khan M.M., Ullah M.A., Zhang X., Kumar A. A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community. *Energy*, 2016;97:151–160.

[6] Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;38:47–63.

[7] Rubio-Maya C., Uche-Marcuello J., Martínez-Gracia A., Bayod-Rújula A.A. Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources. *Applied Energy*, 2011;88(2):449–457.

[8] Kaabeche A., Belhamel M., Ibtiouen R. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system. *Energy*, 2011;36(2):1214–1222.

[9] Koutroulis E., Kolokotsa D., Potirakis A., Kalaitzakis K. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. *Solar Energy*, 2006;80(9):1072–1088.

[10] Senjyu T., Hayashi D., Yona A., Urasaki N., Funabashi T. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. *Renewable Energy*, 2007;32:1917–1933.

[11] Askarzadeh A., Coelho L. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran. *Solar Energy*, 2015;112:83–96.

[12] Clarke D.P., Al-Abdeli Y.M., Kothapalli G. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination. *Energy*, 2015;88:457–468.

[13] Tezera T., Yaman R., Yaman G. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017; 73:840–863.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[14] Barton J.P., Infield D.G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *Transactions on energy conversion*, 2004;19:441–448.

[15] Gan L.K., Shek J.K.H., Mueller M.A. Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland. *Energy Conversion and Management*, 2015;106:479–494.

[16] Bianchini A., Magnelli N., Ferrara G., Carnevale E.A., Ferrari L. Optimization of a PV-wind-diesel hybrid system for a remote stand-alone application. *Energy Procedia*, 2015;81:133–145.

[17] Ani V. Design of a reliable hybrid (PV/Diesel) power system with energy storage in batteries for remote residential home. *Journal of Energy*, 2016, article ID 6278138, 16 pages.

[18] Obukhov S.G., Hochnau Z.P. Forecasting modes of electric energy consumption by autonomous power systems (Prognozirovanie rezhimov potrebleniya ehlektricheskoj ehnergii avtonomnymi ehnergeticheskimi sistemami). *Ehlektricheskie stancii*, 2012;11:43–47 (in Russ.).

[19] The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. Available on: http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/ (21.04.2018).

[20] Kargiev V.M., Martirosov S.N. et al. Wind power. Guidance on the application of small and medium-sized wind turbines (Vetroehnergetika. Rukovodstvo po primeneniyu vetroustanovok maloj i srednej moshchnosti). Available on: http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind_energy.pdf/ (21.04.2018) (in Russ.).

[21] Mohamed M.A., Eltamaly A.M., Alolah A.I. Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015;7:1–18.

[22] Oberhofer A. Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration. Global Energy Network Institute (GENI), 2012, 42 p.

[23] Akinyele D.O., Rayudu R.K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014;8:74–91.

[24] Web site "VDM-tekhnika" LLC. Available on: http://vdmtech.ru/ (21.04.2018) (in Russ.).

[25] Web site "JA SOLAR". Available on: http://www.jasolar.com/ (21.04.2018).

[26] Web site Weather Schedule. Available on: http://www.rp5.ru/ (21.04.2018) (in Russ.).

[27] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Mathematical model of the arrival of solar radiation on an arbitrary-oriented surface for any region of Russia (Matematicheskaya model' prihoda solnechnoj radiacii na proizvol'no-orientirovannuyu poverhnost' dlya lyubogo regiona Rossii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(16–18):43–56 (in Russ.).

[28] Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2001;70(4):349–359.

[29] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of modes of operation of an autonomous photovoltaic station taking into account actual operating conditions (Imitacionnay model rezhimov raboty avtonomnoj fotoehlektricheskoj stancii s uchetom realnyh uslovij ehkspluatacii). *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources*, 2017;328(6):38–51 (in Russ.).

[30] Bhandari B., Lee K., Lee G. et al. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review. *International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 2015;2(1):99–112.

[31] Guerrero M.A., Romero E., Barrero F., Milanés M.I., González E. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009;85(10):188–195.

[32] Wang Z., Qin L., Gu C., Li F. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation. *Power & Energy Society General Meeting*, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286114.

[33] Hu X., Martinez C.M., Yang Y. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017;87(15):4–16.

[34] Kan S.Y., Verwaal M., Broekhuizen H. The use of battery-capacitor combinations in photovoltaic powered products. *Journal of Power Sources*, 2006;162(2):971–974.

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 25.04.18. Ред. рег. № 1316-2657-5 The article has entered in publishing office 25.04.18. Ed. reg. No. 1316-2657-5

УДК 621.039:62-622

ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЗАМКНУТОГО ВОДОРОДНОГО ЦИКЛА ГОРЕНИЯ*

Р.З. Аминов, А.Н. Егоров

ФГБУН «Саратовский научный центр» Российской академии наук
д. 24, ул. Рабочая, Саратов, 410028, Россия
тел.: +7(8452)27-14-36, факс: (8452)27-14-36; e-mail: sncransar@san.ru, wwwean@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.068-079

Заключение совета рецензентов: 07.05.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 25.05.18

Рассмотрены вопросы сжигания водорода в кислородной среде для получения высокотемпературного пара, который можно задействовать в производстве электроэнергии на различных энергоустановках, в том числе на атомных электростанциях (АЭС). Так, использование водородно-кислородного парогенератора в составе водородного энергетического комплекса позволяет повысить мощность и эффективность АЭС в эксплуатационном режиме за счет пароводородного перегрева основного рабочего тела паротурбинной установки. Кроме того, в условиях роста доли АЭС водородный энергетический комплекс помогает адаптировать эти станции к переменным графикам электрических нагрузок и развивать экологически чистые технологии производства электроэнергии. Предложено решение проблемы эффективного и безопасного использования энергии водородного топлива на АЭС с водородным энергокомплексом.

Технические решения по сжиганию водорода в кислородной среде, применяющие непосредственный впрыск охлаждающей воды или водяного пара в продукты сгорания, имеют существенный недостаток – эффект «закалки» при впрыске воды или водяного пара, который приводит к снижению эффективности рекомбинации в процессе охлаждения продуктов сгорания, что выражается в увеличении доли неконденсирующихся газов. В этом случае подача такой смеси в паросиловой цикл небезопасна, так как может привести к опасному росту концентрации несгоревшего водорода в проточной части паротурбинной установки. В статье для решения данной проблемы предложен замкнутый водородный цикл и система водородного перегрева пара на его основе. Проведено исследование замкнутой системы сжигания водорода, которая позволяет полностью исключить попадание водорода в рабочее тело парового цикла и обеспечить полное его окисление за счет некоторого избытка циркулирующего кислорода.

Рассмотрены два типа водородно-кислородных камер сгорания для системы безопасного водородного перегрева пара в цикле АЭС посредством замкнутой системы сжигания водорода в кислородной среде. В результате математического моделирования процессов горения и тепломассообмена определены требуемые параметрические показатели водородно-кислородного парогенератора с учетом температурного режима работы. Определен мощностной ряд водородно-кислородных парогенераторов с предлагаемой конструкцией камеры сгорания.

Ключевые слова: водород; перегрев пара; атомная электростанция; водородно-кислородная камера сгорания; замкнутый водородный цикл; метод конечных элементов; ANSYS.

* *Аминов Р.З., Егоров А.Н.* Водород-кислородный парогенератор для замкнутого водородного цикла горения // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):68-79.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

HYDROGEN-OXYGEN STEAM GENERATOR FOR A CLOSED HYDROGEN COMBUSTION CYCLE

R.Z. Aminov, A.N. Egorov

Saratov Scientific Center of Russian Academy of Sciences
24 Rabochaya St., Saratov, 410028, Russia
tel.: +7(8452)27 14 36, fax: (8452)27 14 36, e-mail: sncransar@san.ru, wwwean@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.068-079

Referred 7 May 2018 Received in revised form 15 May 2018 Accepted 25 May 2018

The paper analyzes the problems of combustion hydrogen in an oxygen medium for produce high-temperature steam that can be used to produce electricity at various power plants. For example, at the nuclear power plants, the use of a H_2-O_2 steam generator as part of a hydrogen energy complex makes it possible to increase its power and efficiency in the operational mode due to steam-hydrogen overheating of the main working fluid of a steam-turbine plant. In addition, the use of the hydrogen energy complex makes it possible to adapt the nuclear power plants to variable electric load schedules in conditions of increasing the share of nuclear power plants and to develop environmentally friendly technologies for the production of electricity. The paper considers a new solution of the problem of effective and safe use of hydrogen energy at NPPs with a hydrogen energy complex.

Technical solutions for the combustion of hydrogen in the oxygen medium using direct injection of cooling water or steam in the combustion products have a significant drawback – the effect of "quenching" when injecting water or water vapor which leads to a decrease in the efficiency of recombination during cooling of combustion products that is expressed in an increase fraction of non-condensable gases. In this case, the supply of such a mixture to the steam cycle is unsafe, because this can lead to a dangerous increase in the concentration of unburned hydrogen in the flowing part of the steam turbine plant. In order to solve this problem, the authors have proposed a closed hydrogen cycle and a hydrogen vapor overheating system based on it, and carried out a study of a closed hydrogen combustion system which completely eliminates hydrogen from entering the working fluid of the steam cycle and ensures its complete oxidation due to some excess of circulating oxygen.

The paper considers two types of hydrogen-oxygen combustion chambers for the system of safe generating of superheated steam using hydrogen in nuclear power plant cycle by using a closed system for burning hydrogen in an oxygen medium. As a result of mathematical modeling of combustion processes and heat and mass transfer, we have determined the required parameters of a hydrogen-oxygen steam generator taking into account the temperature regime of its operation, and a power range of hydrogen-oxygen steam generators with the proposed combustion chamber design.

Keywords: hydrogen; steam superheating; nuclear power plant; hydrogen-oxygen combustion chamber; closed hydrogen cycle; finite element method; ANSYS.

Рашид Зарифович Аминов
Rashid Aminov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

Образование: Саратовский политехнический институт (1961 г.).

Область научных интересов: энергетические системы на органическом топливе; водородная энергетика; ядерная и радиационная безопасность; радиоэкология.

Публикации: 315.

h-index: 7; ORCID: 0000-0003-1549-5133
Scopus Author ID: 7006689108
Research ID: O-3305-2014

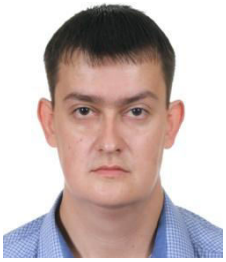
Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Chief Researcher at Saratov Scientific Center of RAS, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Saratov Polytechnic Institute, 1961.

Research interests: energy systems on organic fuel; hydrogen energy; nuclear and radiation safety; radiation ecology.

Publications: 315.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Александр Николаевич Егоров
Aleksandr Egorov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

Образование: Саратовский государственный технический университет (2010 г.).

Область научных интересов: водородная энергетика; атомная энергетика; проблемы создания энергетического оборудования; энерго- и ресурсосберегающие, экологически чистые химико-технологические процессы; моделирование технических систем; термодинамические процессы в технических системах; процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники и системы прямого преобразования энергии.

Публикации: 31.

h-index: 5; ORCID: 0000-0002-0943-859X
Scopus Author ID: 56343107200
Research ID: B-7899-2015

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Researcher at Saratov Scientific Center of RAS, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Saratov State Technical University, 2010.

Research interests: hydrogen energy; nuclear energy; problems building of energy equipments; energy resourses savings, ecological clean and chemical-technological processes; modeling of technical systems; thermodinamics processes in technical systems; processes thermal and mass exchange; renewable and systems of direct transform energy.

Publications: 31.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

Сжигание водорода в кислородной среде позволяет получать высокотемпературный пар, который можно использовать для производства электроэнергии на различных энергоустановках. Например, на атомных электростанциях (АЭС) применение этой технологии имеет ряд преимуществ. Парогенератор в составе водородного энергетического комплекса за счет пароводородного перегрева основного рабочего тела паротурбинных установок повышает мощность и эффективность АЭС в эксплуатационном режиме [1–3]. В аварийных ситуациях с обесточиванием водородно-кислородный парогенератор может служить источником пара для генерации электроэнергии, необходимой для поддержания в рабочем состоянии активных аварийных систем расхолаживания реакторных установок [4–6]. Водород также обеспечивает аккумулирование невостребованной ночной электроэнергии. Кроме того, поскольку при сжигании водорода в кислородной среде образуется только водяной пар, этот вид топлива является экологически чистым энергоносителем, что делает дальнейшее увеличение доли АЭС в энергосистемах страны более безопасным [7–11].

В водородно-кислородном парогенераторе в процессе окисления кислородом происходит преобразование энергии водородного топлива в тепловую энергию в виде водяного пара высоких параметров. В зависимости от требуемых условий применения водородного энергетического комплекса и условий сжигания топлива температура неохлажденного пара может достигать 3 500 ÷ 3 600 К при давлении 6 МПа [12], поэтому существенное влияние на эффективность работы парогенератора будет оказывать способ охлаждения продуктов сгорания. Все технические решения для снижения температуры подразумевают непосредственный впрыск охлаждающей воды или водяного пара в продукты сгорания и подачу образующейся смеси в паросиловой цикл [13–14]. Возникающий при этом эффект «закалки» [15–16] приводит к снижению эффективности рекомбинации в процессе охлаждения продуктов сгорания, что выражается в увеличении доли неконденсирующихся газов. В связи с этим подача такой смеси в паросиловой цикл небезопасна, так как может привести к опасному росту концентрации несгоревшего водорода в проточной части паротурбинной установки. Таким образом, разработка новых эффективных и безопасных способов и систем сжигания водорода в кислородной среде для водородного перегрева пара в цикле АЭС становится актуальной задачей, в рамках которой необходимо провести исследование процессов горения и тепломассобмена в таких системах.

Список обозначений	
Буквы греческого алфавита	
k-ε	Модель турбулентности
$\sigma_{0,2}$	Предел текучести, МПа
Аббревиатуры	
FVM	Метод конечных объёмов (Finite Volumes Method)
FEM	Метод конечных элементов (Finite Elements Method)
FDM	Метод конечных разностей (Finite Difference Method)
CFD	Вычислительная гидродинамика (Computational fluid dynamics)
АЭС	Атомная электростанция
ПТУ	Паротурбинная установка
ПГ	Парогенератор

	Продолжение списка обозначений
ПВД	Подогреватель высокого давления
КС	Камера сгорания
МКЭ	Метод конечных элементов
БрХ1	Хромистая бронза

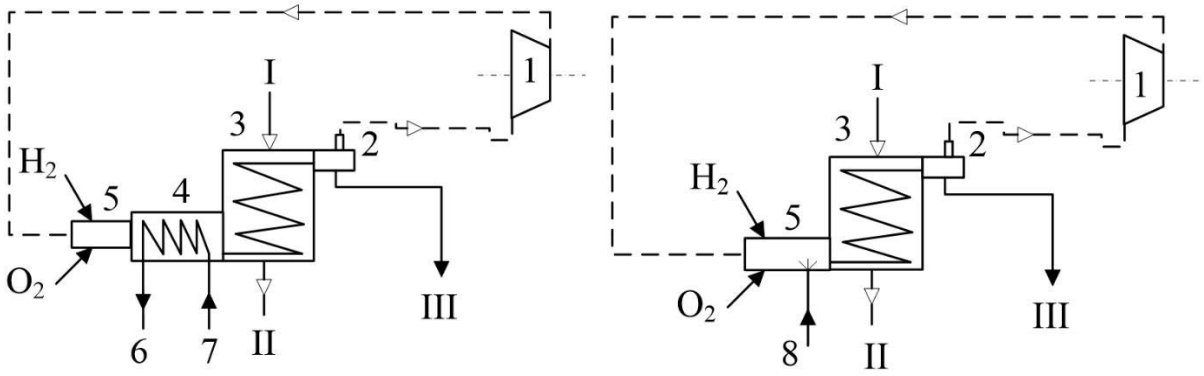
2. Теоретический анализ

Процессы тепло- и массообмена с точки зрения механики сплошных сред могут быть описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которую принято называть уравнениями Навье – Стокса [17]. Эта система включает в себя уравнения неразрывности, движения, энергии и диффузии [18]. Если в потоке происходят химические реакции, задача усложняется введением уравнений модели протекания данных реакций. Уравнения Навье – Стокса могут быть решены в общем виде лишь в некоторых случаях и при ряде допущений. Развитие получили три основных подхода к численному решению данных уравнений: метод конечных разностей (FDM), метод конечных объёмов, или метод контрольного объёма, (FVM) и метод конечных элементов (МКЭ) (FEM) [19–21]. В настоящей статье применялся метод МКЭ, суть которого заключается в приближенном решении вариационной задачи.

Для оценки термодинамических параметров продуктов сгорания и охлаждающей среды, температуры стенок камеры сгорания и моделирования процесса горения применялся конечно-элементный метод расчета с CFD-кодом [22–23] на базе пакета ANSYS [24]. В рамках такого моделирования с учетом геометрии камеры сгорания проводился расчет скорости, состава и термодинамических параметров продуктов сгорания, охлаждающей среды, а также температуры стенок камеры сгорания со стороны продуктов сгорания и охлаждающей среды. Для расчета процесса горения и параметров продуктов сгорания (смеси водяного пара с продуктами диссоциации) использовалась модель диффузионного горения предварительно не перемешанных горючего и окислителя [25–26]. При этом процесс горения в водородно-кислородном парогенераторе, как и в классических камерах сгорания газовых турбин, является турбулентным. Для описания модели турбулентной жидкости применялась стандартная двухпараметрическая k-ε модель [27–28], доступная в пакете ANSYS Fluent.

3. Экспериментальная часть. Водородно-кислородная камера сгорания

Решить проблему эффективного и безопасного сжигания водорода в кислородной среде может использование замкнутого водородного цикла и системы водородного перегрева пара (рис. 1), так как замкнутый цикл позволяет полностью исключить попадание водорода в рабочее тело парового цикла и обеспечить полное его окисление за счет некоторого избытка циркулирующего кислорода.



a *b*

Рис. 1 – Принципиальная схема водородного перегрева пара на АЭС на основе замкнутого водородного цикла с системой охлаждения продуктов сгорания (*a*) и с впрыском воды в продукты сгорания (*b*): *1* – компрессор; *2* – конденсатосборник с отводом неконденсирующихся газов из продуктов сгорания; *3* – водородный перегреватель; *4* – охладитель продуктов сгорания; *5* – камера сгорания; *6* – возврат воды в цикл; *7* – подача питательной воды (конденсата) из паросилового цикла АЭС; *8* – подача воды на впрыск в камеру сгорания; I – пар из ПГ; II – в ПТУ; III – в бак-аккумулятор

Fig. 1 – Schematic diagram of hydrogen steam overheating at a nuclear power plant based on a closed hydrogen cycle with the cooling system of the combustion products (a), with the injection of water into combustion products (b): *1* – compressor; *2* – condensate collector with discharge of non-condensing gases from combustion products; *3* – hydrogen superheater; *4* – coolant of combustion products; *5* – combustion chamber; *6* – return of water to the cycle; *7* – supply of feed water (condensate) from the steam-power cycle of the nuclear power plant; 8 – water supply for injection into the combustion chamber; I – steam from SG; II – to the STU; III – to the accumulator tank

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Сухой насыщенный пар из парогенератора (ПГ) поступает в котел-пароперегреватель *3*, где за счет сжигания водородного топлива в кислороде, подаваемых в смесительное устройство *5*, осуществляется перегрев пара. После котла-пароперегревателя *3* перегретый пар поступает в основную паротурбинную установку (ПТУ) для выработки мощности. Для снижения температуры продуктов сгорания и предотвращения прожога теплообменных поверхностей котла-пароперегревателя *3* и исключения недожога в смесительное устройство *5* подается избыточное количество кислорода. Продукты сгорания на выходе из котла-пароперегревателя *3* направляются в конденсатосборник *2*, где за счет конденсации водяного пара происходит отделение непрореагировавшего кислорода от водяного пара, образующегося при сжигании водорода. Сконденсировавшийся водяной пар в виде горячей воды направляется в бак-аккумулятор или в систему регенеративного подогрева основной ПТУ, а отделенный кислород посредством компрессора *1* рециркулирует в смесительное устройство *5* для реализации процесса горения. Для охлаждения продуктов сгорания перед котлом-пароперегревателем *3* установлен охладитель *4*, тепло от которого отводится питательной воде паротурбинного цикла АЭС, тем самым обеспечивается дополнительное повышение вырабатываемой мощности за счет вытеснения отборов пара на ПВД. Для сжигания водорода по данной схеме предполагается использовать водородно-кислородную камеру сгорания (КС), изображенную на рис. 2.

В данной камере сгорания происходит сжигание водорода в кислородной среде, при этом расход окислителя *1* подается с некоторым избытком для снижения недожога и повышения эффективности камеры сгорания. Для защиты стенок камеры сгорания от перегрева применяется водяное охлаждение через каналы *4* внутри стенок. Каналы *4* для движения охлаждающей воды образованы внутренней стенкой камеры сгорания и внешним кожухом, который изготавливается из более прочного и менее термостойкого материала для придания жесткости камере сгорания. Образовавшиеся в результате сгорания водорода продукты сгорания направляются в систему охлаждения, которая представляет собой трубный пучок *7* (на рис. 2 показан не полностью), набранный из нескольких труб, вваренных в днище камеры сгорания в шахматном порядке. Отвод тепла от продуктов сгорания на этом этапе осуществляется охлаждающей водой, подаваемой в межтрубное пространство. Одновременно тепло отводится и с внешней стороны днища камеры сгорания. В качестве охлаждающей воды наиболее подходящим вариантом является питательная вода или основной конденсат из парового цикла АЭС, так как в этом случае отводимое через стенки тепло от продуктов сгорания можно использовать.

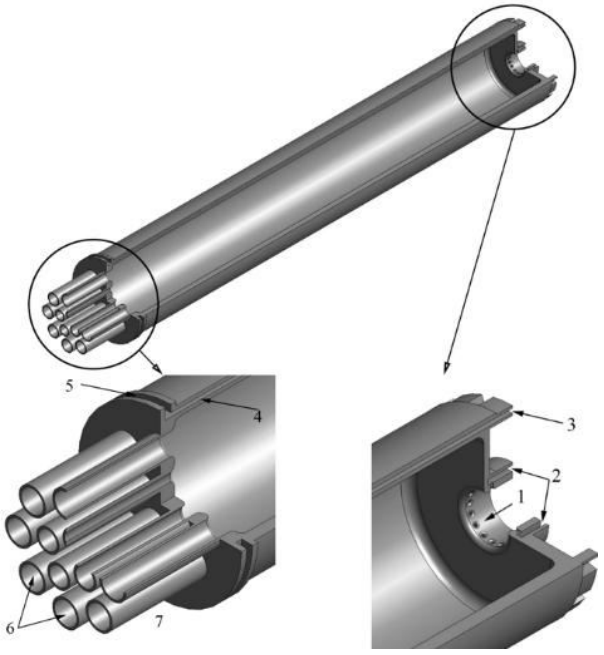


Рис. 2 – Трехмерный вид-разрез водородно-кислородной камеры сгорания (I тип): *1* – подача кислорода; *2* – подача водорода; *3*, *4* – подача охлаждающей воды; *5* – выход охлаждающей воды; *6* – выход продуктов сгорания; *7* – система охлаждения продуктов сгорания

Fig. 2 – Three-dimensional view-section of the hydrogen-oxygen combustion chamber (type I): *1* – oxygen supply; *2* – hydrogen supply; *3*, *4* – supply of cooling water; *5* – outlet of cooling water; *6* – outlet of combustion products; *7* – cooling system of combustion products

Одним из факторов, влияющих на температурный режим камеры сгорания, являются теплофизические свойства металла стенок. В предложенной конструкции корпус камеры сгорания выполняется из хромистой бронзы (сплав БрХ1), обладающей высоким коэффициентом теплопроводности, что обеспечивает эффективный отвод тепла для недопущения прогара стенки камеры сгорания. При этом для компенсации избыточного давления снаружи камеры сгорания установлен стальной кожух (на рис. 2 не показан). В табл. 1 представлены теплофизические свойства сплава БрХ1.

Таблица 1

Теплофизические свойства металла [29]

Table 1

Thermophysical properties of metal [29]

Марка металла	Плотность, кг/м^3	Теплоемкость, Дж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Температура плавления, К
БрХ1	8 825	367	173	1 354

Средние значения в диапазоне температур 22 ÷ 800 ºС

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

В качестве охлаждающей среды в данном водородно-кислородном парогенераторе может использоваться вода из основного паросилового цикла АЭС со следующими параметрами (табл. 2):

Таблица 2

Теплофизические параметры охлаждающей среды

Table 2

Thermophysical parameters of coolant

Расход, кг/с	Давление, МПа	Температура, К
5	6	300

Для конструкции камеры сгорания I типа (см. рис. 2) расход охлаждающей воды принят с учетом рекомендуемой скорости течения охлаждающей среды 4 ÷ 9 м/с [30].

Итак, при тепловой мощности 6 МВт камера сгорания будет иметь следующие параметры: длина – 1 200 мм; внутренний диаметр – 205 мм; толщина внутренней стенки – 3 мм; толщина корпуса – 5 мм; толщина днища – 15 мм; диаметр форсунок: топливо – 7 мм; окислитель – 30 мм; тепловая мощность брутто – 6 МВт.

Данная конструкция камеры сгорания и ее геометрические размеры были выбраны с учетом достижения минимального недожога, а также приемлемой температуры стенок камеры сгорания и трубок охлаждения продуктов сгорания. При этом расход окислителя превышает необходимый стехиометрический расход кислорода на 10 %. Поскольку непрореагировавший кислород в составе смеси неконденсирующихся газов (см. рис. 2) направляется через компрессор обратно в камеру сгорания, выработка избыточного количества кислорода не требуется.

Альтернативным вариантом конструкции камеры сгорания водородно-кислородного парогенератора может быть использование впрыска охлаждающей воды в продукты сгорания, что позволит снизить температуру продуктов сгорания на выходе из парогенератора без системы водяного охлаждения продуктов сгорания. Схема такого парогенератора представлена на рис. 3.

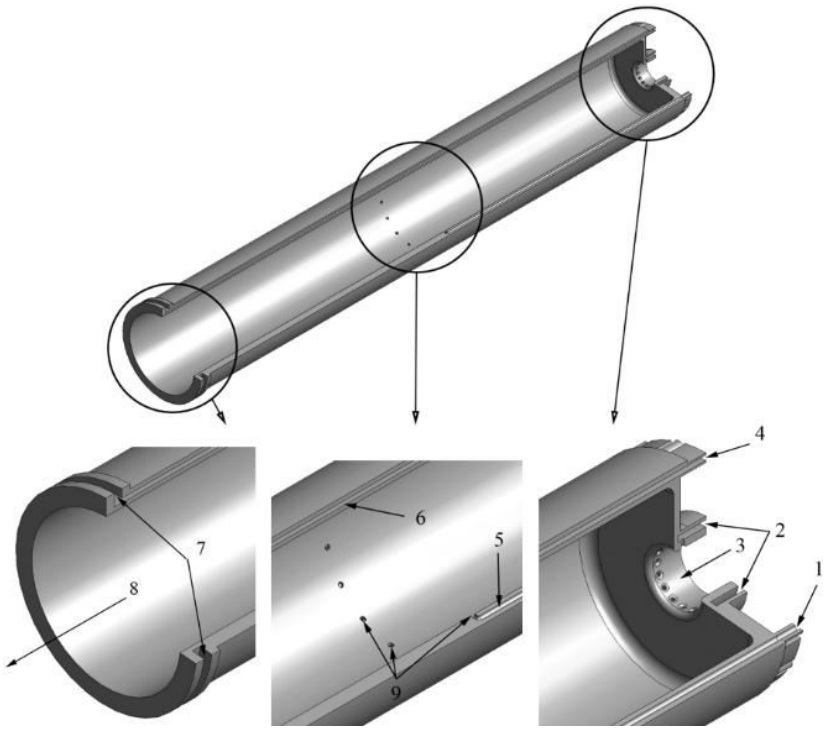


Рис. 3 – Трехмерный вид (в разрезе) водородно-кислородной камеры сгорания с системой впрыска воды (II тип): *1* – подача воды на впрыск; *2* – подача водорода; *3* – подача кислорода; *4* – подача охлаждающей воды; *5* – канал подачи воды на впрыск; *6* – канал подачи охлаждающей воды; *7* – выход охлаждающей воды; *8* – выход продуктов сгорания; *9* – форсунки впрыска воды

Fig. 3 – Three-dimensional sectional view of the hydrogen-oxygen combustion chamber with water injection (type II): *1* – water supply for injection; *2* – hydrogen supply; *3* – oxygen supply; *4* – supply of cooling water; *5* – water supply channel for injection; *6* – cooling water supply channel; *7* – outlet of cooling water; *8* – outlet of combustion products; *9* – injectors of water injection

В отличие от камеры сгорания, изображенной на рис. 2, здесь дополнительно используется канал подачи воды *5* для впрыска, который идет параллельно каналам охлаждения *6* стенок камеры сгорания. Подаваемая по этому каналу вода через форсунки *9* впрыскивается в реакционный объем камеры сгорания, что позволяет снизить температуру продуктов сгорания. Кроме того, такое расположение каналов *5* даёт возможность дополнительно увеличить площадь охлаждения стенок камеры сгорания, а вся конструкция – отказаться от системы водяного охлаждения продуктов сгорания. В остальном принцип работы данной камеры повторяет принцип работы камеры, изображенной на рис. 2.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

На данном этапе необходимо провести исследование водородно-кислородной камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания с точки зрения температурного режима металла и требуемых параметров охлаждающей среды, а также конструктивных особенностей. Для этого проведем компьютерное математическое моделирование процессов горения водородно-кислородной смеси, теплообмена и нагрева стенок камеры сгорания, а также охлаждения продуктов сгорания.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Расчет процессов в горелочном устройстве I типа (рис. 2)

С помощью численного моделирования на базе CFD-кода были получены результаты расчета температурного режима работы водородно-кислородной камеры сгорания с водой в качестве охлаждающей среды (табл. 3–5). Для сравнительной оценки проведен расчет для давлений в камере сгорания 6 МПа, 8 МПа и 10 МПа.

Таблица 3

Параметры охлаждающей воды

Table 3

Cooling water parameters

	Температура, К	Давление, МПа	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
На входе	300	6,023	4,182
На выходе	329,1	6	4,182

На основании данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что нагрев охлаждающей воды составляет 29,1 К, или 608,5 кВт отведенной тепловой мощности – этого достаточного для удержания максимальной температуры стенки камеры сгорания в приемлемых пределах.

Таблица 4

Параметры продуктов сгорания на входе в систему водяного охлаждения

Table 4

Parameters of combustion products at the inlet to the water cooling system

Давление в камере сгорания, МПа	Температура, К	Относительное остаточное содержание водорода	Относительное остаточное содержание кислорода	Скорость, м/с	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
6	3 470	0,0161	0,0812	5,04	3,190
8	3 486	0,0153	0,0745	5,26	3,184
10	3 514	0,0132	0,0707	5,46	3,165

Как видно из табл. 4, температура продуктов сгорания на входе в систему охлаждения составляет в среднем 3 490 К. Для того чтобы продукты сгорания можно было использовать в высокотемпературном паро-паровом перегревателе для перегрева рабочего тела паросиловой установки АЭС, необходимо произвести их дальнейшее охлаждение до температуры 1 200 ÷ 1 400 К. При этом с повышением давления незначительно растёт и температура пара за счет снижения недожога в камере сгорания, что объясняется увеличением выхода конечных продуктов при повышении давления реагирующей смеси по закону химического равновесия.

Таблица 5

Параметры продуктов сгорания на выходе из системы водяного охлаждения

Table 5

Parameters of combustion products at the outlet of the water cooling system

Давление в камере сгорания, МПа	Температура, К	Остаточное содержание водорода	Остаточное содержание кислорода	Скорость, м/с	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
6	1 408	$3{,}40 \cdot 10^{-8}$	0,086	5,13	2,431
8	1 419	$3{,}43 \cdot 10^{-8}$	0,085	4,74	2,447
10	1 439	$3{,}52 \cdot 10^{-8}$	0,082	3,78	2,458

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Остаточное содержание водорода в продуктах сгорания на выходе из системы охлаждения оказывается пренебрежимо мало, что позволяет безопасно осуществлять конденсацию водяного пара из продуктов сгорания (см. табл. 5). Это достигается за счет выбранного способа отвода тепла от продуктов сгорания при их движении в небольших каналах, при этом процессы рекомбинации несгоревшего топлива и продуктов диссоциации не нарушаются. Таким образом, в процессе движения продуктов сгорания по системе охлаждения осуществляется отвод тепловой мощности в количестве 2 825 кВт (в среднем).

Такие результаты можно получить благодаря значительной теплообменной поверхности для отвода тепла от продуктов сгорания. В рассматриваемом случае для заданного коэффициента теплоотдачи 30 000 Вт/м^2·К от поверхности системы охлаждения к охлаждающей воде потребуется 8,25 м^2 теплообменной поверхности данной конфигурации. Результаты оценки температурного режима работы камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания представлены в табл. 6, а механические свойства хромовых бронз – в табл. 7.

Таблица 6

Максимальная температура стенок камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания

Table 6

Maximum temperature of combustion chamber walls and combustion products cooling system

	Камера сгорания	**Охлаждение продуктов сгорания**
При охлаждении основным конденсатом	708 К	758 К
При охлаждении питательной водой	708 К	864 К

Таблица 7

Механические свойства хромовых бронз при высоких температурах

Table 7

Mechanical properties of chrome bronzes at high temperatures

	Температура, К					
	293	573	673	773	873	973
Временное сопротивление σ_b, МПа	500	390	350	300	250	100
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	450	370	340	290	240	90

Как видно из табл. 6 и 7, максимальные температуры стенок камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания при использовании основного конденсата оказываются значительно ниже температуры, при которой происходит существенное снижение значения временного сопротивления разрушению и начинается пластическая деформация сплава БрХ1, что доказывает возможность применения этого материала для данной конструкции. Использование питательной воды из цикла АЭС также возможно, но при этом температура стенки будет значительно выше, хотя и не достигнет температуры плавления. Значение расчетного напряжения в системе охлаждения продуктов сгорания составило 175 МПа (в аварийной ситуации при отсутствии уравновешивающего давления в камере сгорания), что меньше допустимых значений с коэффициентом запаса 1,45 (см. табл. 7). В этом случае для охлаждения наиболее подверженной термическим напряжениям камеры сгорания целесообразно применять основной конденсат для интенсивного теплоотвода за счет обеспечения значительного температурного напора.

4.2. Расчет процессов в горелочном устройстве II типа (рис. 3)

Для охлаждения продуктов сгорания в парогенераторе с КС II типа используется впрыск воды, поступающей по каналам в стенке КС (см. рис. 3). Для парогенератора тепловой мощностью 6 МВт расчетным путем был определен необходимый дополнительный расход воды на впрыск в продукты сгорания для их охлаждения до температуры 1 400 К, который составил 1,003 кг/с. Скорость воды в каналах составила 8,6 м/с при диаметре кольцевого канала 6 мм. Следует отметить, что впрыск воды в реакционный объем камеры сгорания неизбежно приводит к росту недожога водородного топлива за счет смещения химического равновесия в сторону исходных продуктов реакции, а также за счет физического разбавления реагирующей смеси. Увеличение доли неконденсирующихся газов в продуктах сгорания приводит также к снижению эффективности теплообменных процессов в водородном пароперегревателе. При этом увеличение расхода высокотемпературных продуктов сгорания (за счет впрыска воды) позволяет увеличить количество тепла, используемого для перегрева острого пара в паросиловом цикле АЭС.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Наличие камеры сгорания с впрыском воды позволяет отказаться от системы водяного охлаждения продуктов, подверженной значительным термическим нагрузкам, и тем самым повысить надёжность работы системы водородного перегрева пара.

С помощью рассмотренной методики расчета процессов теплообмена и горения был создан расчетный мощностной ряд водородно-кислородных камер сгорания I и II типа (рис. 4).

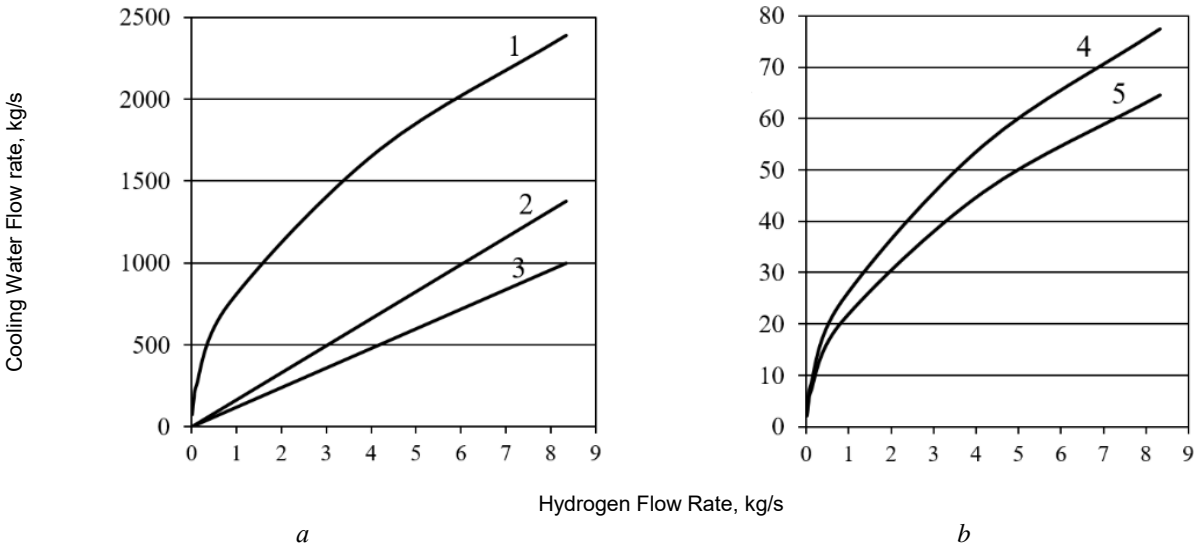


Рис. 4 – Расчетный мощностной ряд водородно-кислородных камер сгорания I и II типа.
Параметры водородно-кислородной камеры сгорания (*a*) и расход охлаждающей воды (*b*): *1* – внутренний диаметр камеры сгорания, мм; *2* – площадь теплообмена системы охлаждения продуктов сгорания, м^2; *3* – мощность камеры сгорания, МВт; *4* – суммарный расход воды для впрыска и охлаждения КС II типа, кг/с; *5* – расход воды для охлаждения КС I типа, кг/с
Fig. 4 – Estimated power series of hydrogen-oxygen combustion chambers I and II type. Parameters of the hydrogen-oxygen combustion chamber (a), cooling water flow rate (b): *1* – internal diameter of the combustion chamber, mm; *2* – heat exchange area of the combustion products cooling system, m^2; *3* – power of the combustion chamber, MW; *4* – total consumption of water for injection and cooling of CC type II, kg/s; *5* – water consumption for cooling of CC type I, kg/s

При единичной тепловой мощности 1 000 МВт внутренний диаметр камеры сгорания водородно-кислородного парогенератора достигнет 2 388 мм (см. рис. 4*a*). Это сделает установку громоздкой и потребует увеличения толщины стенок камеры сгорания, что приведет к росту металлоёмкости. Кроме того, большая единичная мощность снижает маневренные возможности системы, поэтому целесообразнее набирать требуемую мощность за счет установки нескольких камер сгорания. При использовании камеры сгорания II типа потребуется больший расход охлаждающей воды из-за необходимости впрыска воды в продукты сгорания.

Заключение

Авторами данной статьи были предложены два типа водородно-кислородных камер сгорания для системы безопасного водородного перегрева пара в цикле АЭС за счет использования замкнутой системы сжигания водорода в кислородной среде. Данная система позволяет исключить попадание водорода в основной паросиловой цикл АЭС, при этом непрореагировавший кислород повторно используется для сжигания.

В результате математического моделирования процессов горения и тепломассообмена определены параметры продуктов сгорания и параметрические показатели поверхностей теплообмена для давления высокотемпературного пара от 6 МПа до 10 МПа. Как показали расчеты, повышение давления приводит к снижению остаточного содержания водорода на 18 % (с 0,0161 до 0,0132). При этом для водородно-кислородного парогенератора мощностью в диапазоне $1 \div 100$ МВт потребуется $1{,}37 \div 137{,}5$ м^2 теплообменной поверхности для охлаждения продуктов сгорания.

Сплав БрХ1 позволяет удерживать максимальную температуру стенок системы водяного охлаждения продуктов сгорания водородно-кислородного парогенератора на уровне 758 К и 864 К при охлаждении основным конденсатом и питательной водой из цикла АЭС соответственно.

Определен мощностной ряд водородно-кислородных парогенераторов с предлагаемой конструкцией камеры сгорания. Показано, что при тепловой мощности 1 000 МВт внутренний диаметр камеры сгорания составит 2 388 мм, поэтому целесообразно использовать несколько установок с меньшей единичной мощностью для повышения маневренности и снижения металлоемкости (расход охлаждающей воды составил до 64,6 кг/с и 77,5 кг/с для камеры сгорания первого и второго типа соответственно).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Использование камеры сгорания с впрыском воды позволяет отказаться от системы водяного охлаждения продуктов сгорания, но при этом неизбежно возрастет недожог водородного топлива и снизится эффективность процессов тепломассообмена за счет увеличения доли неконденсирующихся газов в продуктах сгорания.

Таким образом, в ходе данного исследования были обоснованы и получены показатели эффективности предлагаемой замкнутой системы сжигания водорода в кислороде для использования в составе водородного энергетического комплекса в комбинировании с АЭС. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития технологий экологически чистого производства электроэнергии на базе водородного энергетического комплекса и АЭС.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 15-19-10027).

Acknowledgments

The given research was funded by Russian Science Foundation (agreement No. 15-19-10027).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список литературы

[1] Аминов, Р.З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов. – М.: Наука, 2016. – 254 с.

[2] Aminov, R.Z. Performance evaluation of hydrogen production based on off-peak electric energy of the nuclear power plant / R. Z. Aminov, A. N. Bairamov // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 21617–21625.

[3] Aminov, R.Z. On the issue of investi-gating the kinetics of processes in dissociated water steam / R.Z. Aminov, A.I. Schastlivtsev, A. N. Bairamov // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 20843–20848.

[4] Aminov, R. Emergency cooling system for water-cooled reactors / R. Aminov, A. Egorov, V. Yurin // Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Energy and Clean Technology". – Albena. – 2017. – P. 3–10.

[5] Aminov, R.Z. Hydrogen cycle based backup for NPP internal needs during a blackout / R.Z. Aminov, A.N. Egorov, V.E. Yurin // Atomic Energy. – 2013. – Vol. 114. – Iss. 4. – P. 289–292.

[6] Aminov, R.Z. Multifunctional Backup for NPP Internal Needs / R.Z. Aminov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121. – Iss. 5. – P. 327–333.

[7] Шпильрайн, Э.Э. Применение водорода в энергетике и в энерготехнологических комплексах / Э.Э. Шпильрайн, Ю.А. Сарумов, О.С. Попель // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1982. – Вып. 4. – С. 5–22.

[8] Малышенко, С.П. Некоторые термодинамические и технико-экономические аспекты применения водорода как энергоносителя в энергетике / С.П. Малышенко, О.В. Назарова, Ю.А. Сарумов // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1986. – Вып. 7. – С. 105–126.

[9] Forsberg, C.W. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production [Электронный ресурс] / C.W. Forsberg, G. Haratyk // International Congress on Energy. – 2011. – New York. – Режим доступа: https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production – (Дата обращения 18.04.2018).

[10] Forsberg, C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy / C.W. Forsberg // International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management. – 2007. – Boston. – Режим доступа: http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf – (Дата обращения: 18.04.2018).

[11] Forsberg, C.W. Hydrogen futures and technologies / C.W. Forsberg // Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer. – 2003. – Massachusetts. – Режим доступа: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FORSBERG.pdf?sequence=1 – (Дата обращения: 18.04.2018).

[12] Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М., 1972. – 720 с.

[13] Schastlivtsev, A.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production / A.I. Schastlivtsev, V.I. Borzenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012213.

[14] Malyshenko, S.P. High-pressure H_2/O_2 – steam generators and they possible applications / S.P. Malyshenko, A.N. Gryaznov, N.I. Filatov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 589–596.

[15] Malyshenko, S.P. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class / S.P. Malyshenko [et al.] // High Temperature. – 2012. – Vol. 50. – Iss. 6. – P. 765/773.

[16] Pribaturin, N.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen-oxygen and methane–oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam / Pribaturin N.A. [et al.] // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63. – Iss. 5. – P. 336–341.

[17] Темам, Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – М.: Мир, 1981. – 408 с.

[18] Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

[19] Дульнев, Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г Парфенов, А.В Сигалов. – М.: Высшая Школа, 1990. – 207 с.

[20] Соловейчик, Ю.Г. Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач / Ю.Г. Соло-

вейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 896 с.

[21] Патанкар, С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / С. В. Патанкар. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

[22] D. Anderson, Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications. / D. Anderson, Jr. – McGraw-Hill Inc, 1995. – 383 p.

[23] Романова, Е.В. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребреного рекуператора / Е.В. Романова, А.Н. Колиух, Е.А. Лебедев // Вестник ТГТУ. – 2017. – № 3. – С. 420–427.

[24] Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

[25] Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий – М.: Наука, 1987. – 502 с.

[26] Poinsot, T. Theoretical and Numerical Combustion / T. Poinsot, D. Veynante. – R.T. Edwards Inc., 2012. – 588 p.

[27] Коркодинов, Я.А. Обзор семейства k–ε моделей для моделирования турбулентности / Я.А. Коркодинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – М.: Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15. – №. 2. – С. 5–16.

[28] Солнцева, Е.Д. Компьютерное моделирование процесса горения газообразного топлива в горелке ГРС-150 / Е.Д. Солнцева, А.Н. Лошкарев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VI Всероссийской научно практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием (Екатеринбург, 11–12 мая 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ. –2017. – С. 124–128.

[29] Масленников С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник / С.Б. Масленников. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

[30] Александренков, В.П. Расчет наружного проточного охлаждения камеры ЖРД. Электронное учебное издание / В.П. Александренков. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.

References

[1] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Combination of hydrogen energy cycles with nuclear power plants (Kombinirovanie vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami). Moscow: Nauka Publ., 2016, 254 p. (in Russ.)

[2] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production based on off-peak electric energy of the nuclear power plant. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:21617–21625.

[3] Aminov R.Z., Schastlivtsev A.I., Bairamov A.N. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:20843–20848.

[4] Aminov R., Egorov A., Yurin V. Emergency cooling system for water-cooled reactors. *Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Energy and Clean Technology"*, Albena, 2017, pp. 3–10.

[5] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E. Hydrogen cycle based backup for NPP internal needs during a blackout. *Atomic Energy*, 2013;114(4):289–292.

[6] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E., V.N. Bessonov Multifunctional Backup for NPP Internal Needs. *Atomic Energy*, 2017;121(5):327–333.

[7] Shpilrain E.E., Sarumov Yu.A., Popel O.S. Application of hydrogen in power engineering and in energy technology complexes (Primenenie vodoroda v energetike i v energotekhnologicheskikh kompleksakh). *Atomic-hydrogen power engineering and technology*, 1982;4:5–22 (in Russ.).

[8] Malyshenko S.P., Nazarova O.V., Sarumov Yu.A. Some thermodynamic, technical and economic aspects of the use of hydrogen as an energy carrier in the energy sector (Nekotorye termodinamicheskie i tekhniko-ekonomicheskie aspekty primeneniya vodoroda kak energonositelya v energetike). *Atomic-hydrogen power engineering and technology*, 1986;7:105–126 (in Russ.).

[9] Forsberg C.W., Haratyk G. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production, International Congress on Energy, 2011, New York. Available on: https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production (04.18.2018).

[10] Forsberg C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy, International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management, 2007, Boston. Available on: http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf (04.18.2018).

[11] Forsberg C.W. Hydrogen futures and technologies, Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer, 2003, Massachusetts. Available on: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FORSBERG.pdf?sequence=1 (04.18.2018).

[12] Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids (Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei). Moscow, 1972 (in Russ.).

[13] Schastlivtsev A.I., Borzenko V.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production. *Journal of Physics*: Conference Series, 2017;891:012213.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[14] Malyshenko S.P., Gryaznov A.N., Filatov N.I. High-pressure H_2/O_2 – steam generators and they possible applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:589–596.

[15] Malyshenko S.P., Prigozhin V.I., Savich A.R., Schastlivtsev A.I., Il'ichev V.A., Nazarova O.V. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class. *High Temperature*, 2012;50(6):765–773.

[16] Pribaturin N.A., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Sorokin A.L., Fedorov V.A., Azikhanov S.S., Shevyrev S.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen-oxygen and methane–oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam. *Thermal Engineering*, 2016;63(5):336–341.

[17] Temam R. The Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis (Uravneniya Nav'e-Stoksa. Teoriya i chislennyi analiz). Moscow: Mir Publ., 1981 (in Russ.).

[18] Landau L.D., Lifshitz E.M. Hydrodynamics (Gidrodinamika). Moscow: Nauka Publ., 1988 (in Russ.).

[19] Dul'nev. G.N. Parfenov V.G., Sigalov A.V. Application of a computer for solving heat exchange problems (Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena). Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1990 (in Russ.).

[20] Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. Finite Element Method for Scalar and Vector Problems (Metod konechnykh elementov dlya skalyarnykh i vektornykh zadach). Novosibirsk: NGTU, 2007 (in Russ.).

[21] Patankar S.V. Numerical solution of the problems of heat conduction and convective heat transfer during flow in canals (Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh). Moscow: Publishing house MPEI, 2003 (in Russ.).

[22] Anderson D. Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications, McGraw-Hill Inc, 1995, 383 p.

[23] Romanova E.V., Koliukh A.N., Lebedev E.A. Application of the ANSYS package in the investigation of the hydraulic resistance of the finned recuperator (Primenenie paketa ANSYS pri issledovanii gidravlicheskogo soprotivleniya orebrenogo rekuperatora). *Vestnik TGTU*, 2017;3:420–427 (in Russ.).

[24] Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. Fundamentals of work in ANSYS 17 (Osnovy raboty v ANSYS 17). Moscow: DMK Press Publ., 2017 (in Russ.).

[25] Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics (Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike). M.: Nauka Publ., 1987 (in Russ.).

[26] Poinsot T. Theoretical and Numerical Combustion, R.T. Edwards Inc., 2012:588.

[27] Korkodinov Ya.A. An overview of the k-ε turbulence models for simulation (Obzor semeistva k–ε modelei dlya modelirovaniya turbulentnosti). M.: Mashinostroenie, materialovedenie Publ., 2013;15(2):5–16 (in Russ.).

[28] Solntseva, E.D. Computer simulation of the combustion process of gaseous fuel in the GRS-150 burner (Komp'yuternoe modelirovanie protsessa goreniya gazoobraznogo topliva v gorelke GRS-150), *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov VI Vserossiiskoi nauchno prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2017) s mezhdunarodnym uchastiem*. Ekaterinburg, 11–12 May, 2017), 2017:124–128 (in Russ.).

[29] Maslennikov S.B. Heat-resistant steels and alloys: Reference book (Zharoprochnye stali i splavy: Spravochnik). M.: Metallurgiya Publ., 1983 (in Russ.).

[30] Aleksandrenkov V.P. Calculation of the external flow-through cooling of the liquid rocket engine. Electronic educational edition (Raschet naruzhnogo protochnogo okhlazhdeniya kamery ZhRD. Elektronnoe uchebnoe izdanie), Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2012 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА
HYDROGEN ECONOMY

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА
HYDROGEN STORAGE

Статья поступила в редакцию 01.06.17. Ред. рег. № 2594 The article has entered in publishing office 01.06.17. Ed. reg. No. 2594

УДК 541.136/.136.88

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ БОРОГИДРИДА НАТРИЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЩЕЛОЧНЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ*

Х. Селиккан[1], М. Сахин[2], М. Левент Аксу[3]*, Т.Н. Везироглу[4]

[1]Университет Гази, факультет естественных наук, кафедра химии, Текникокуллар, Анкара, 06500, Турция
[2]Турецкий Институт исследования и разведки полезных ископаемых, Балгат, Анкара, 06520, Турция
[3]Университет Гази, Факультет образования, кафедра химии, Текникокуллар, Анкара, 06500, Турция
[4]Институт чистой энергии, Университет Майями, Корал-Гейблс, Майями, Флорида, 33124, США

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.080-086

Заключение совета рецензентов: 28.06.17 Заключение совета экспертов: 12.10.17 Принято к публикации: 21.12.17

Данное исследование связано с электрохимическим окислением $NaBH_4$ на электродах из Au, Pt, Pd и Ni с помощью циклической вольтамперометрии и вольтамперометрии с прямоугольным сигналом. Установлено, что наиболее эффективным металлом для окисления борогидрида натрия является Au. Электроды из Pt и Pd также показали определенную действенность, в то время как Ni не был эффективен. Наблюдалось, что соединение дает два последовательных шага окисления с переносом 6 и 2 электронов. Проведенные эксперименты при удержании напряжения на уровне –0,8 В показали, что полученное соединение адсорбируется на поверхности электрода и постепенно снижает его каталитическую активность.

Ключевые слова: борогидрид натрия; электрохимия; водный раствор.

THE INVESTIGATION OF THE ELECTROOXIDATION OF SODIUM BOROHYDRIDE ON VARIOUS METAL ELECTRODES IN AQUEOUS BASIC SOLUTIONS

Huseyin Celikkan[1], Mukerrem Sahin[2], M. Levent Aksu[3]*, T. Nejat Veziroğlu[4]

[1]Gazi University, Faculty of Science, Department of Chemistry, Teknikokullar, Ankara, 06500, Turkey
[2]Turkish Mineral Research and Exploration Institute , Balgat, Ankara, 06520, Turkey
[3]Gazi University, Faculty of Education, Department of Chemistry, Teknikokullar, Ankara, 06500, Turkey
[4]Clean Energy Institute, University of Miami, Coral Gables, Miami, FL, 33124, USA

Селиккан Х., Сахин М., Аксу М.Л., Везироглу Т.Н. Исследование процессов электролитического окисления борогидрида натрия на электродах из различных металлов в щелочных водных растворах // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):80-86.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2007;32:588-593. © 2006 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.; автор-корреспондент: тел.: +90 312 2126470x3758; e-mail: maksu@gazi.edu.tr (М.Л. Аксу).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.080-086

Referred 28 June 2017 Received in revised form 12 October 2017 Accepted 21 December 2017

This study is related to the electrochemical oxidation of $NaBH_4$ on Au, Pt, Pd and Ni electrodes by the use of cyclic and square wave voltammetry. The most effective metal for the oxidation of sodium borohydride was found to be Au. Pt and Pd electrodes also showed certain activity while Ni was not effective. The compound was observed to give two consecutive oxidation steps with 6 and 2 electron transfers. The experiments conducted while keeping the potential at −0.8V showed that the resulting compound is adsorbed upon the electrode surface and gradually decrease its catalytic activity.

Keywords: sodiumborohydride; electrochemistry; aqueous solution.

Турхан Н. Везироглу
T.N. Veziroglu

Сведения об авторе: д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

Образование: Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

Награды: лауреат нескольких международных наград.

Опыт работы: профессор, заведующий кафедрой технического факультета в университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергии (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.); почетный профессор университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время); почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).

Область научных интересов: неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

Публикации: более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохранит Землю».

Information about the author: Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, a member of 18 scientific organizations.

Education: the City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, advanced studies in engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

Awards: recipient of several international awards.

Experience: University of Miami, Engineering faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, Fl, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).

Research interests: two-phase flow instabilities; interstitial heat transfer; solar energy; global warming; environmental problems; renewable energy sources and hydrogen energy system.

Publications: more than 350, editor of 160 books and proceedings, co-author of the book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

International Publishing House for scientific periodicals “Space”

Международный издательский дом научной периодики “Спейс”

1. Введение

В последние годы поиск альтернативной формы энергии ускорился в связи с тем, что источники органического топлива критически истощены, и в будущем их будет недостаточно для удовлетворения общемирового спроса. Исследования в этой области направлены в основном на поиск экологически безопасной, рентабельной и эффективной формы энергии. Использование газообразного водорода в транспортных средствах позволит значительно снизить выбросы в атмосферу вредных оксидов серы и азота, а также смога. Единственными отходами, образующимися в результате сгорания водорода в двигателях, является вода. Самая большая проблема при использовании водорода в качестве топлива – сложность его хранения. А хранение жидкого водорода в резервуарах является и сложным, и дорогостоящим. Решить эту проблему можно за счёт гидридов металлов, таких как NaH, AlH_3, LiH, $NaBH_4$ [1], $LiBH_4$ [2] и $NaAlH_4$, или за счёт хранения водорода в углеродных нанотрубках или активированном углероде [3]. Борогидриды, которые обладают высокой способностью накопления водорода, имеют очевидное преимущество в сравнении с другими соединениями для хранения водорода.

Уже существуют прототипы автомобилей с водородными топливными элементами, использую-

щими $NaBH_4$ [4]. При гидролизе половина водорода поступает из $NaBH_4$, а другая половина − из воды. При подходящих условиях количество водорода, которое можно получить из 1 грамма гидрида, составляет: из $NaBH_4$ − 0,213 г, из NaH − 0,084 г; из LiH − 0,254 г [5].

Борогидрид натрия высокочувствителен к влаге и быстро распадается во влажных условиях. Однако в сильнощелочных растворах борогидрид натрия высокостабилен и может храниться в течение продолжительного времени. Реакция борогидрида натрия в растворе при подходящем катализаторе дает газообразный водород, и гидрид превращается в метаборат натрия ($NaBO_2$) [5–7]. Полученный метаборат можно перевести обратно в борогидрид натрия [8]. На производство $NaBH_4$ имеется множество патентов [9−11], изучение которых показало, что электрохимическое производство $NaBH_4$ является наиболее экономичным и перспективным способом [12].

Первый этап электрохимического синтеза соединения – определение его электрохимического поведения. Данная работа посвящена исследованию электрохимического поведения $NaBH_4$ в щелочных средах на различных металлических электродах с использованием циклической вольтамперометрии (ЦВ) и вольтамперометрии с прямоугольным сигналом (ВПС). Помимо этих методов электрохимические параметры системы изучались с помощью вращающегося дискового электрода (ВДЭ) с Pt-диском диаметром 2 мм.

2. Эксперимент

Исследования проводились в 0,5 М растворе NaOH (вод.) с использованием обернутых тефлоном электродов из Au, Pt (2 мм в диаметре) и электродов из Pd и Ni размером 1,13 $см^2$. Хроноамперометрические исследования проводились с использованием платинового дискового ультрамикроэлектрода (УМЭ) диаметром 10 мкм. Контрольным и интегрирующим электродами соответственно были Ag/AgCl (3 М KCl) и Pt-проволока. Все растворы были приготовлены с дистиллированной водой, а электроды полировали оксидом алюминия 0,3 μм, раствор продували очищенным азотом в течение 15 минут и накрывали после каждого эксперимента.

Все электрохимические эксперименты проводились на электрохимическом анализаторе CH Instruments 660 B и стенде BAS C и BAS RDE с Pt-электродом.

2.1. Методы

Исследования с циклической вольтамперометрией (ЦВ). Исследования ЦВ проводились с использованием рабочих электродов из Pt, Pd, Au и Ni в растворе NaOH 0,5 М, содержащем 1 мМ $NaBH_4$. Кроме того, исследовалось изменение пикового тока при концентрации $NaBH_4$.

Исследования с вольтамперометрией с прямоугольным сигналом (ВПС). Были взяты вольтамперограммы 1 мМ $NaBH_4$ в 0,5 М растворе NaOH на электродах из Au, Pt и Pd. Система поддерживалась при –0,8 В на электроде из Au, который показал самую высокую плотность пикового тока для определенных периодов и был просканирован в положительном направлении.

Хроноамперометрические исследования (ХАИ). Для определения коэффициентов диффузии и числа переданных электронов использовались хроноамперометрические угловые коэффициенты Коттрелла для 1 мМ ферроцианида (который давал обратимый перенос 1 электрона) и для 1 мМ $NaBH_4$ на Pt УМЭ.

Исследования вращающегося дискового электрода (ВДЭ). Для определения значений D_o и n использовались кривые ВДЭ для 1 мМ контрольного раствора ферроцианида (в 0,5 М водного KNO_3) и для 1 мМ $NaBH_4$ при скорости вращения 1 000 об/мин.

3. Результаты и обсуждение

Циклические вольтамперометрические кривые для борогидрида натрия на Au-электроде изображены на рис. 1. Отмечено, что $NaBH_4$ окислялся при −0,40 В на Au-электроде при низких скоростях сканирования (рис. 1). Наблюдалось, что этот потенциал смещался до −0,32 В при высоких скоростях сканирования (5 В/с). Было отмечено, что $NaBH_4$, обладавший характером полностью необратимого окисления при низких скоростях сканирования, показал небольшой пик уменьшения около −0,42 на высоких скоростях сканирования. Это указывает на то, что полностью обратимое окисление не происходило при высоких скоростях сканирования, и полученный метаборат не был преобразован в гидрид бора. Наблюдалось смещение потенциалов окисления борогидрида в сторону отрицательных потенциалов по мере увеличения скорости сканирования (рис. 1).

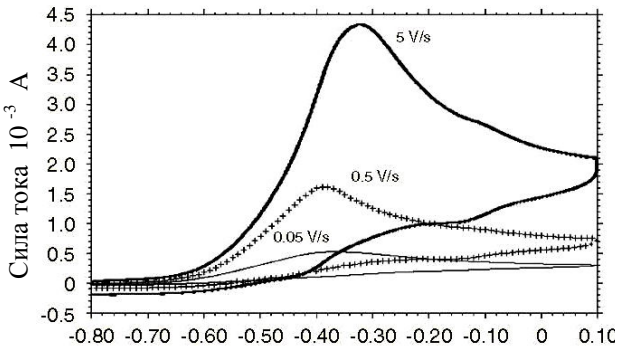


Рис. 1 – Окисление 1,8 × 10^{-5} М $NaBH_4$ на Au-электроде при разных скоростях сканирования
Fig. 1 – The oxidation of 1.8 × 10^{-5} M $NaBH_4$ on Au electrode at different scan rates

Небольшие симметричные пики, наблюдаемые при −0,2 В, указывают на слабую адсорбцию реагента. Тот факт, что катодный и анодный пики не сим-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

метричны, свидетельствует о наличии квазиобратимой реакции. Приведенное ниже уравнение Рэндлса − Шевчика полезно для определения того, контролируется ли электрохимическая реакция диффузией. Линейность графика $i_p - v^{1/2}$ является проверкой диффузионного контроля (рис. 2).

$$i_p = 2,69\times10^5 n^{3/2} D_o^{1/2} C_o v^{1/2}.$$

Это соотношение показывает, что пиковый потенциал изменяется линейно с концентрацией электроактивного соединения. Тот факт, что пик при 0,4 В, который относится к электроокислению борогидрида натрия, изменяется линейно с концентрацией борогидрида, указывает на то, что его удобно было бы использовать при электроаналитическом определении борогидрида натрия (рис. 3 и 4).

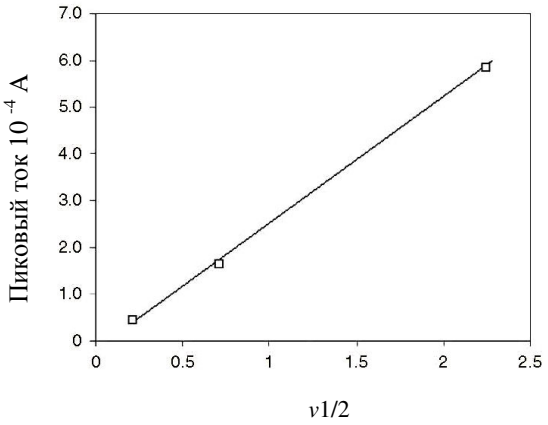


Рис. 2 – $i_p - v^{1/2}$ график 1,8 × 10^{-5} M $NaBH_4$ на Au-электроде
Fig. 2 – $i_p - v1/2$ plot of 1.8 × 10^{-5} M $NaBH_4$ on Au electrode

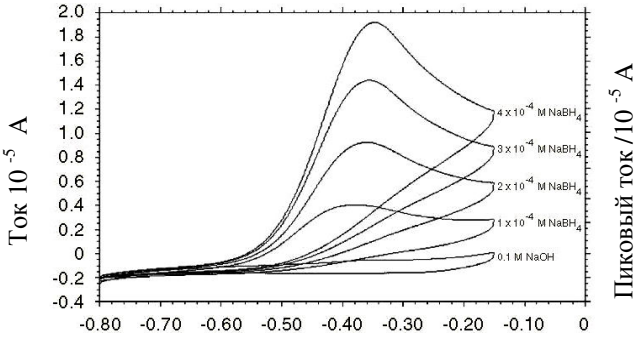


Рис. 3 – Циклическая вольтамперометрическая кривая окисления $NaBH_4$ на Au при различных концентрациях (*v* = 50 мВ/с)
Fig. 3 – The cyclic voltammetric oxidation curve of $NaBH_4$ on Au at different concentrations (v = 50mV/s)

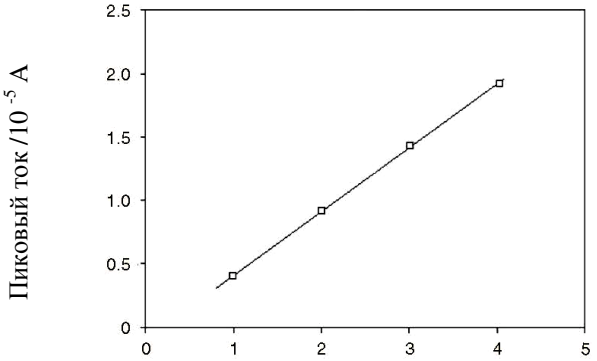


Рис. 4 – Изменение пиковых токов с концентрацией $NaBH_4$ на Au-электроде
Fig. 4 – The change of peak currents with $NaBH_4$ concentration on Au electrode

Исследование циклических вольтамперометрических кривых $NaBH_4$ на Pt-электроде в щелочных средах показало, что $NaBH_4$ в основном окисляется в области десорбции водорода Pt-электрода (рис. 5).

На рисунке показано, что каталитические поверхностные оксиды Pt не были активны в отношении окисления $NaBH_4$.

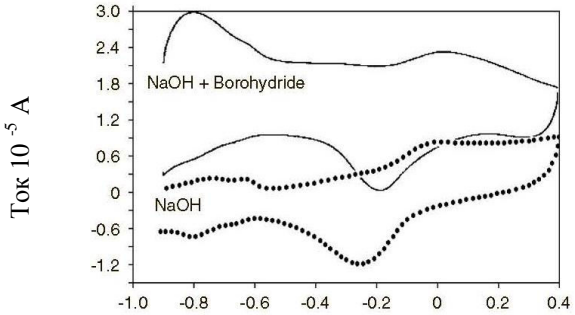


Рис. 5 – Циклические вольтамперограммы 0,5 M NaOH и 0,5 M 1,8 × 10^{-3} M $NaBH_4$ на Pt-электроде со скоростью сканирования 50 мВ/с
Fig. 5 – The cyclic voltammograms 0.5M NaOH and 0.5M NaOH + 1.8 × 10^{-3} M $NaBH_4$ on Pt electrode at a scan rate of 50 mV/s

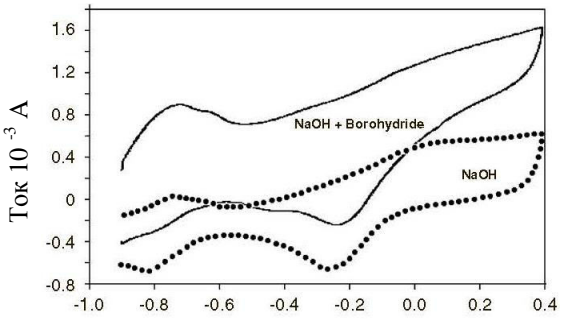


Рис. 6 – Циклические вольтамперограммы 0,5 M NaOH и 1,8 × 10^{-3} M $NaBH_4$ на Pd-электроде со скоростью сканирования 50 мВ/с
Fig. 6 – The cyclic voltammograms 0.5M NaOH and 0.5M NaOH + 1.8 × 10^{-3} M $NaBH_4$ on Pd electrode at a scan rate of 50 mV/s

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

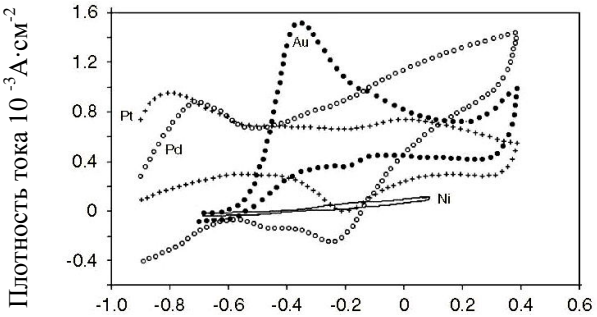


Рис. 7 – Сравнение окисления $NaBH_4$ на электродах из Au, Pt, Pd и Ni
Fig. 7 – The comparison of the oxidation of $NaBH_4$ on Au, Pt, Pd and Ni electrodes

Ситуация на Pd-электроде подобна той, что наблюдалась для Pt-электрода. Однако область двойного слоя гораздо более эффективна в случае электрода Pd (рис. 6). Сравнение каталитической активности электродов из Au, Pt, Pd и Ni показывает, что Au демонстрирует наибольшую активность, в то время как Pt и Pd ведут себя одинаково. Было отмечено, что Ni был неактивен в электрокаталитическом окислении $NaBH_4$ (рис. 7).

Вольтамперограммы $NaBH_4$ с прямоугольным сигналом, полученные в анодном и катодном направлениях, указывают на то, что Au-электрод был наиболее активным электродом при окислении $NaBH_4$. Pt и Pd показали определенную активность в водородной области, в то время как Ni был совершенно неактивен (рис. 8–10).

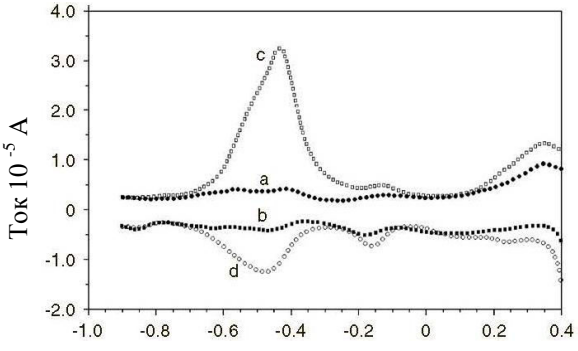
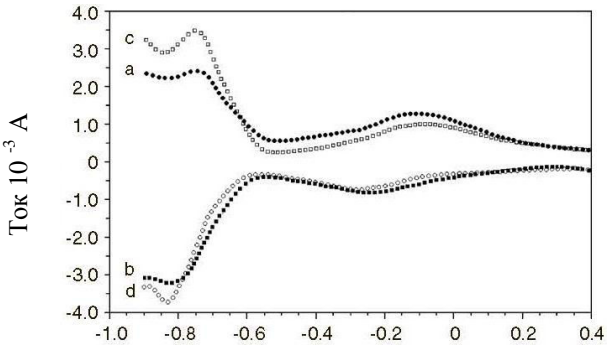


Рис. 8 – Квадратно-волновые вольтамперограммы $NaBH_4$ на Au-электроде (вкл. *E.* = 0, 001 В, амп. имп. = 25 мВ): *a* – для NaOH в анодном направлении; *b* – для NaOH в катодном направлении; *c* – для $NaBH_4$ в анодном направлении; *d* – для $NaBH_4$ в катодном направлении
Fig. 8 – The square wave voltammograms of $NaBH_4$ on Au electrode (Inc *E.* = 0, 001 V, pulse amp. = 25 mV): (a) for NaOH in anodic direction; (b) for NaOH in cathodic direction; (c) for $NaBH_4$ in anodic direction; (d) for $NaBH_4$ in cathodic direction



Было установлено, что потенциал окисления $NaBH_4$ равен −0,4 на всех кривых ЦВ. Количество электронов, перенесенных в пиках, наблюдаемых на вольтамперограммах, определялось с помощью УМЭ, ХАИ и ВДЭ.

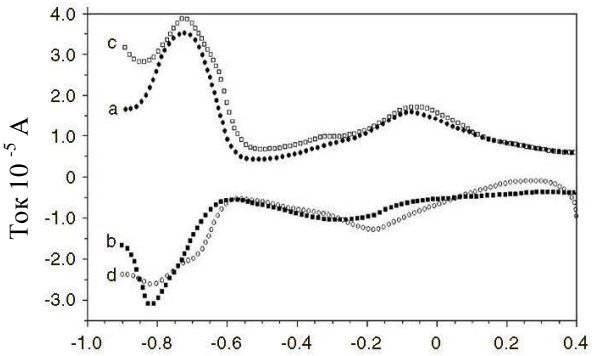


Fig. 9 – Квадратно-волновые вольтамперограммы $NaBH_4$ на Pt-электроде (вкл. *E.* = 0, 001 В, амп. имп. = 25 мВ): *a* – для NaOH в анодном направлении; *b* – для NaOH в катодном направлении; *c* – для $NaBH_4$ в анодном направлении; *d* – для $NaBH_4$ в катодном направлении
Fig. 9 – The square wave voltammograms of $NaBH_4$ on Pt electrode (Inc *E.* = 0, 001 V, pulse amp. = 25 mV): (a) for NaOH in anodic direction; (b) for NaOH in cathodic direction; (c) for $NaBH_4$ in anodic direction; (d) for$NaBH_4$ in cathodic direction

Рис. 10 – Квадратно-волновые вольтамперограммы $NaBH_4$ на Pd-электроде (вкл *E.* = 0, 001 В, амп. имп. = 25мВ): *a* – для NaOH в анодном направлении; *b* – для NaOH в катодном направлении; *c* – для $NaBH_4$ в анодном направлении; *d* – для $NaBH_4$ в катодном направлении
Fig. 10 – The square wave voltammograms of $NaBH_4$ on Pd electrode (Inc *E.* = 0, 001 V, pulse amp. = 25 mV): (a) for NaOH in anodic direction; (b) for NaOH in cathodic direction; (c) for $NaBH_4$ in anodic direction; (d) for $NaBH_4$ in cathodic direction

Для сравнения на рис. 11 и 12 показаны хроноамперометрические кривые Коттрелла и кривые УМЭ для ферроцианида и борогидрида.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

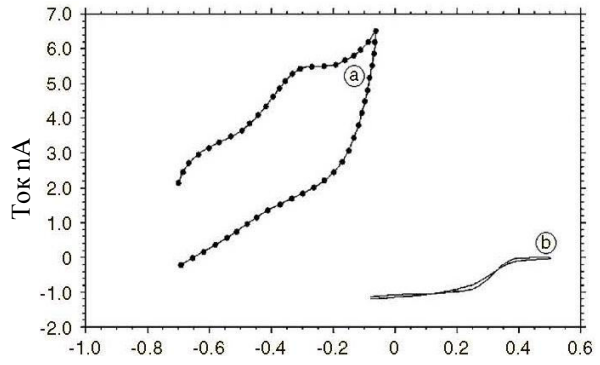


Рис. 11 – Поведение $NaBH_4$ (a) и ферроцианида (b) на золотом УМЭ
Fig. 11 – The behaviors of $NaBH_4$ (a) and ferrocyanide (b) on gold UME

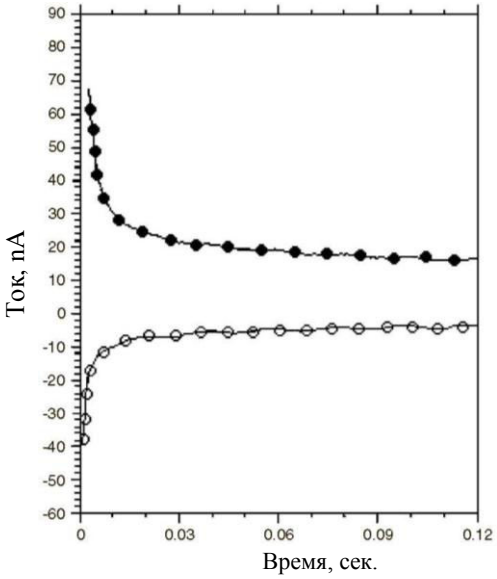


Fig. 12 – Хроноамперометрические кривые для $NaBH_4$ (-•-) и ферроцианида (-◦-)
Fig. 12 – The chronoamperometric curves for $NaBH_4$ (-•-) and ferrocyanide (-◦-)

Коэффициенты диффузии можно легко определить с помощью хроноамперометрического уравнения Коттрелла:

$$i = \frac{nFAC_oD_o^{1/2}}{\pi^{1/2}t^{1/2}}$$

и установившегося ультрамикротока, определенного Барански [13]:

$$i_{ss} = 4rFnC_oD_o,$$

где A, r and D_o обозначают площадь рабочего электрода, диаметр УМЭ и коэффициент диффузии соединения. Было найдено, что значения D_o ферроцианида и $NaBH_4$ равны $4{,}20 \times 10^{-6}$ см^2 s^{-1} и $4{,}02 \times 10^{-6}$ см^2 s^{-1}.

Принцип метода ВДЭ довольно прост. Предельный ток переноса одного электрона (в данном случае в ферроцианиде) сравнивается с предельным током исследуемого соединения. Если такие параметры, как концентрация, скорость вращения, площадь электрода остаются постоянными, то количество передаваемых электронов будет зависеть только от предельного тока и коэффициентов диффузии в соответствии с уравнением Левича, приведенным ниже. Кривые ВДЭ для $NaBH_4$ и ферроцианида при скорости вращения 1 000 об/мин показаны на рис. 13.

$$i_L = 0,29nFD_o^{2/3}w^{-1/2}v^{-1/6}C_o .$$

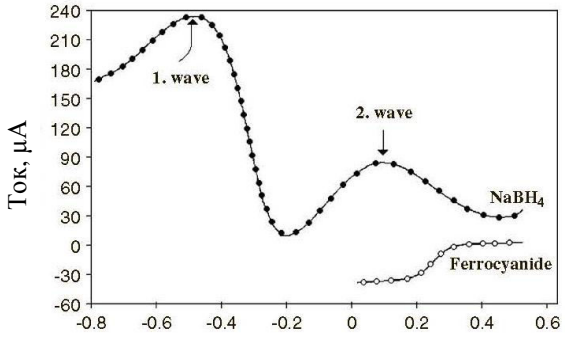


Рис. 13 – Кривые ВДЭ для $NaBH_4$ (-•-) и ферроцианида (-◦-)
Fig. 13 – The RDE curves for $NaBH_4$ (-•-) and ferrocyanide (-◦-)

Было установлено, что предельные токи первой и второй волн окисления равны 225 μA и 87 μA соответственно.

Предельный ток для ферроцианида составляет 40 μA (рис. 13). Используя уравнение Левича и предполагая, что кинематическая вязкость воды не изменяется, эти предельные токи могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{i_{(l)Ferrocyanide}}{i_{(l)Borohydride}} = \frac{1\times(D^0_{Ferrocyanide})^{3/2}}{n\times(D^0_{Borohydride})^{3/2}} .$$

С помощью этого уравнения было определено, что число электронов, переданных этими волнами, равно 6,01 и 2,32 соответственно. Поэтому можно записать следующий механизм окисления $NaBH_4$ в щелочной среде:

$$BH_4^- + H_2O \rightarrow 3H_2 + BH(OH)_3^- \quad 6e^- \textit{ transfer},$$

$$BH(OH)_3^- + + H_2O \rightarrow BO_2^- + H_2 \quad 2e^- \textit{ transfer}.$$

Предыдущие исследования утверждают, что в первую очередь происходит перенос 2e [13].

Данные ВДЭ показали, что сначала было два последовательных переноса электронов с реакцией

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

гидролиза 6e, за которой последовала 2e, как показано выше при сравнении пиковых токов с ферроценом, который, как известно, дает полностью обратимую волну переноса 1e. Тот факт, что передача 6e рассматривается как одна волна, показывает, что имели место быстрые реакции переноса электронов, следующие друг за другом.

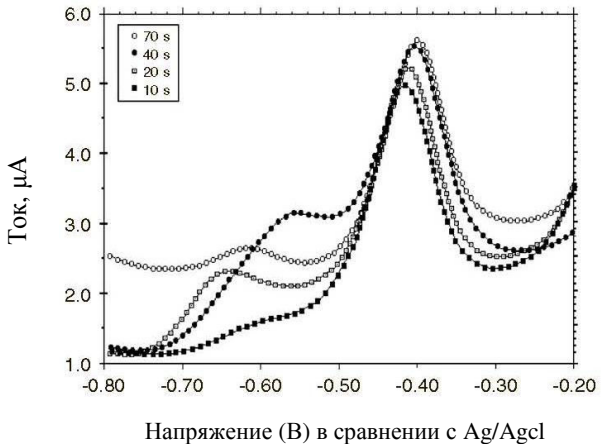


Рис. 14 – Поведение ВПС $NaBH_4$ при −0,8 В в разные периоды
Fig. 14 – The SWV behavior of $NaBH_4$ kept at −0.8V for different periods

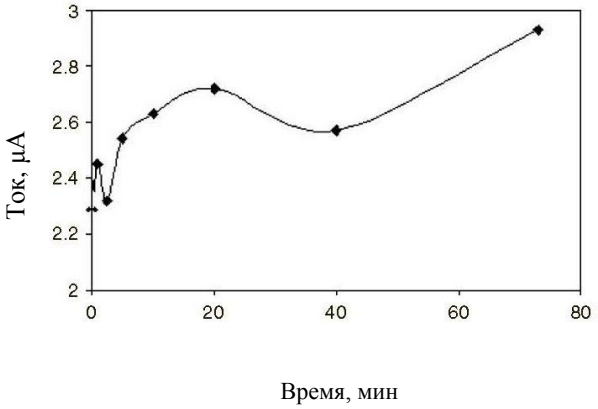


Рис. 15 – Изменение текущих значений $NaBH_4$ по сравнению с периодом ожидания при 0,8 В
Fig. 15 – The change of current values of $NaBH_4$ against the waiting period at 0.8V

$NaBH_4$ удерживался на −0,8 В, значении выше его окислительного потенциала, в разные периоды (рис. 14). Установлено, что токи увеличиваются, а напряжения смещаются в сторону положительных значений с увеличением периода. График времени ожидания по отношению к пиковым значениям тока увеличивается экспоненциально (рис. 15). Это показывает, что соединение адсорбируется на поверхности и уменьшает свою электрокаталитическую способность.

4. Заключение

Установлено, что наиболее эффективным металлом для окисления борогидрида натрия является Au. Электроды из Pt и Pd также показали определенную активность, в то время как Ni был неэффективен. Наблюдалось, что соединение проходит два последовательных шага окисления с 6 и 2 переносами электрона. Эксперименты, проведенные с удержанием напряжения на −0,8 В, показали, что полученное соединение адсорбируется на поверхности электрода и постепенно снижает его каталитическую активность.

References

[1] Amendola S.C., Sharp-Goldman S.L., Janjua M.S., Kelly M.T., Petillo P.J., Binder M. A safe, portable hydrogen gas generator using aqueous borohydride solution and Ru catalyst. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2000;25:969–75.

[2] Kojima Y., Kawai Y., Kimbara M., Nakanishi H., Matsumoto S. Hydrogen generation by hydrolysis reaction of lithium borohydride. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004;29:1213–7.

[3] Fakioglŭ E., Yürüm Y., Veziroglŭ T.N. A review of hydrogen storage systems based on boron and its compounds. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004;29:1371–6.

[4] http://www.millenniumcell.com/solutions/natrium.html

[5] Kojima Y., Suzuki K., Fukumoto K., Sasaki M., Yamamoto T., Kawai Y., Hayashi H. Hydrogen generation using sodium borohydride solution and metal catalyst coated on metal oxide. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2002;27:1029–34.

[6] Kim J., Lee H., Han S., Kim H., Song M., Lee J. Production of hydrogen from sodium borohydride in alkaline solution: development of catalyst with high performance. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004;29:263–7.

[7] Amendola S., Binder M., Sharp-Goldman S., Kelly M., Petillo P. Process for making a hydrogen generation catalyst. US Patent 6,683,025; 26 October 2004.

[8] Kojima Y., Haga T. Recycling process of sodium metaborate to sodium borohydride. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2003;28:989–93.

[9] Li Z.P., Morigazaki N., Liu B.H., Suda S. Preparation of sodium borohydride by the reaction of MgH_2 with dehydrated borax through ball milling at room temperature. *J. Alloys Comp*., 2003;349:232–6.

[10] James B.D., Wallbridge M.G.H. Metal tetrahydroborates. *Prog. Inorg. Chem*., 1970;11:99–231.

[11] Snover J., Wu Y. Recycle of discharged sodium borate fuel. US Patent 6,706,909; 12 May 2003.

[12] Cooper B.H. Electrolytic process for the production of alkali metal borohydrides. US Patent 3,734,842; 22 May, 1973.

[13] Baranski A.S., Fawcett W.R., Gilbert C.M. Use of microelectrodes for the rapid determination of the number of electrons involved in an electrode reaction. *Anal. Chem*., 1985;57:166.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 03.05.18. Ред. рег. № 2660 The article has entered in publishing office 03.05.18. Ed. reg. No. № 2660

УДК 544.6

НЕРАВНОВЕСНАЯ ПОРОЭЛЕКТРОЭЛАСТИЧНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛИМЕРНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ*

А.А. Калинников [1], С.А. Григорьев [2], Д.Г. Бессарабов [3,*]

[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
д. 1, пл. Академика Курчатова, Москва, 123182, Россия
тел.: +7 (499) 196-73-22
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ»
д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел.: +7 (495) 362-72-06
[3]Центр водородной инфраструктуры, Северо-западный университет
г. Потчефструм, 2520, Южная Африка
*e-mail: Dmitri.Bessarabov@nwu.ac.za

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.087-112

Заключение совета рецензентов: 07.05.18 Заключение совета экспертов: 10.05.18 Принято к публикации: 15.05.18

Представлена неравновесная пороэлектроэластичная теория полимерного электролита в условиях электролиза воды с целью дальнейшего теоретического описания процессов массопереноса в слоях мембранно-электродного блока. Проведен обзор и анализ моделей электрохимических и массообменных процессов в электролизерах, изучены проблемы физико-химического описания этих моделей. Сделан вывод о необходимости использования моделей сорбции воды и свеллинга полимерного электролита (здесь и далее вместо термина «набухание» применительно к мембране употребляется более близкий по смыслу термин «свеллинг», от англ. swelling). Проанализированы модели сорбции воды и свеллинга полимерного электролита. В результате сделан вывод о том, что существующая пороэлектроэластичная теория после модификации является наиболее пригодной для применения в неравновесных условиях в процессе электролиза. Рассмотрено базовое уравнение баланса давлений классической равновесной пороэлектроэластичной теории для полимерного электролита. Проведена модификация данной теории с целью дальнейшего моделирования процессов массообмена. На основе экспериментальных данных, доступных в открытых источниках, проанализированы свойства и особенности упругих сил в полимерном электролите, затем уточнены зависимости упругих сил в полимерном электролите от свеллинга и температуры. С учетом существующих экспериментальных данных по проницаемости газов в полимерном электролите и характера свеллинга полимерного электролита при контакте с жидкой водой получены параметры неравновесной пороэлектроэластичной теории применительно к условиям электролиза воды.

Ключевые слова: электролиз воды; полимерная электролитическая мембрана; электрокаталитический слой; мембранно-электродный блок; математическое моделирование; пороэлектроэластичная теория.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

NON-EQUILIBRIUM POROELECTROELASTIC THEORY OF POLYMER ELECTROLYTE WITHIN THE CONDITIONS OF WATER ELECTROLYSIS

A.A. Kalinnikov[1], S.A. Grigoriev[2], D.G. Bessarabov[3*]

[1]National Research Centre "Kurchatov Institute"
1 Kurchatov Sq., Moscow, 123182, Russia
tel.: +7 499 196 73 22

Калинников А.А., Григорьев С.А., Бессарабов Д.Г. Неравновесная пороэлектроэластичная теория полимерного электролита в условиях электролиза воды // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):87-112.

[2]National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia
tel.: +7 495 362 72 06
[3]HySA Infrastructure Center of Competence, North-West University
Potchefstroom, 2520, South Africa
*e-mail: Dmitri.Bessarabov@nwu.ac.za

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.087-112

Referred 7 May 2018 Received in revised form 10 May 2018 Accepted 15 May 2018

The paper considers a non-equilibrium poroelectroelastic theory of a polymer electrolyte under the conditions of water electrolysis with the purpose of further use for a theoretical description of mass transfer processes in layers of a membrane-electrode assembly. Moreover, this paper carries out the review and analysis of the models of electrochemical and mass-exchange processes in the electrolyzers, and analyzes the problems of their physicochemical description. We make a conclusion about the need to use models of water sorption and scaling of polymer electrolyte and analyze the models of water sorption and swelling of the polymer electrolyte. It is concluded that the existing poroelectroelastic theory is the most suitable for its modification for use in non-equilibrium conditions during electrolysis. The basic equation of the balance of pressures of the classical equilibrium poroelectroelastic theory for polymer electrolyte is considered. A modification of the poroelectroelastic theory has been carried out in order to its use in non-equilibrium conditions of water electrolysis for the purpose of further modeling of mass transfer processes. Based on experimental data available in open sources, the paper makes an analysis of the properties and features of elastic forces in the polymer electrolyte, and then refines the dependencies of the elastic forces in the polymer electrolyte from the swelling and temperature. Taking into account the existing experimental data on the permeability of gases in a polymer electrolyte and the feature of swelling of the polymer electrolyte in a contact with liquid water, parameters of the non-equilibrium poroelectroelastic theory have been obtained for the water electrolysis conditions.

Keywords: water electrolysis; polymer electrolyte membrane; electrocatalytic layer; membrane-electrode assembly; mathematical modeling; poroelectroelastic theory.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Александр Александрович Калинников
Alexander Kalinnikov

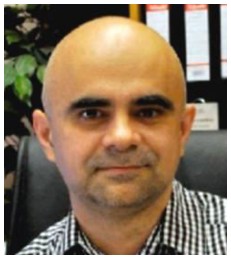
Сведения об авторе: начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт».
Образование: Московский инженерно-физический институт, инженер-физик (1975 г.).
Область научных интересов: водородные технологии.
Публикации: более 100.
h-index: 6 (Web of Science); 6 (Scopus); 5 (РИНЦ)
Scopus Author ID: 8565398700
Orcid ID: 0000-0001-8555-9089
Researcher ID: A-9136-2014

Information about the author: Head of Laboratory, National Research Centre "Kurchatov Institute".
Education: Moscow Engineering and Physical Institute, Engineer-Physicist, 1975.
Research interests: hydrogen technologies.
Publications: more than 100.

Сергей Александрович Григорьев
Sergey Grigoriev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"».
Образование: Московский авиационный институт (МАИ), инженер-системотехник (1996 г.).
Область научных интересов: водородные технологии.
Публикации: более 350.
h-index: 19 (Web of Science); 21 (Scopus); 20 (РИНЦ)
SPIN: 2137-0116
Scopus Author ID: 7005827347
Orcid ID: 0000-0002-5043-7409
Researcher ID: A-1655-2014

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at National Research University "Moscow Power Engineering Institute".
Education: Moscow Aviation Institute (MAI), Systems Engineer, 1996.
Research interests: hydrogen technologies.
Publications: more than 350.



Дмитрий Георгиевич Бессарабов
Dmitri Bessarabov

Сведения об авторе: канд. хим. наук, директор национального центра «Водород ЮАР» при Северо-Западном университете, ЮАР.

Образование: МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет (1991 г.); университет Стеленбоша, ЮАР (1996 г.).

Область научных интересов: мембраны; топливные элементы; водород; диффузия.

Публикации: более 100.
Scopus *h*-index: 17

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, DST National Center: HySA Infrastructure: Director, North-West University, Potchefstroom, South Africa.

Education: Moscow State University, 1991; University of Stellenbosch, South Africa, 1996.

Research interests: membranes; fuel cells; hydrogen; diffusion.

Publications: more than 100.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

В настоящее время водород рассматривается в качестве одного из основных энергоносителей. Высокоэффективным способом производства водорода является электролиз воды с полимерной электролитической мембраной. Более того, данный метод хорошо интегрируется с энергоустановками на основе возобновляемых источников энергии и атомными станциями [1–3] в силу широкого диапазона потребляемой мощности, экологической безопасности и прочих преимуществ [4].

Основными элементами электролизера рассматриваемого типа являются твердополимерная мембрана, электрокаталитические слои и коллекторы тока [5]. Цель данного исследования заключается в разработке модели процессов переноса водорода, кислорода и воды в каталитических слоях и полимерной электролитической мембране электролизного элемента (ЭЭ) в рамках пороэлектроэластичной теории (ПЭЭТ) [6]. При этом можно однозначно утверждать, что не существует адекватной теоретической модели для описания физико-химических процессов в ЭЭ на основе твердополимерного электролита. Подавляющее большинство электрохимических моделей ЭЭ базируются на чисто термодинамическом описании электрохимических параметров ячейки (обратимый потенциал, катодный и анодный токи обмена, числа анодного и катодного переноса) [7–11]. Процессы, связанные с масс-транспортом в порах полимерного электролита (ПЭ), как правило, рассматриваются упрощённо (например, в работе [12]) или вообще не рассматриваются. Между тем, параметры водно-газовой смеси в порах ПЭ (парциальные давления воды и газа) определяются характерными процессами взаимодействия воды и ионообменных центров ПЭ. В результате такие модели позволяют рассчитывать значение напряжения на ЭЭ в зависимости от плотности тока (вольтамперная характеристика). Как правило, получается достаточно точное совпадение рассчитанных напряжений на ЭЭ с экспериментальными данными. Совпадение объясняется тем, что для испытываемого ЭЭ, как правило, отсутствуют независимые экспериментальные данные по плотности тока обмена и числам переноса, поэтому в моделях фактически используются варьируемые параметры для минимального отклонения расчетных от экспериментальных данных. Недостаток этого подхода очевиден: применение таких моделей ограничено заданной конфигурацией ЭЭ и небольшими вариациями рабочих условий. Далее будут указаны более существенные недостатки эмпирических моделей.

В данной работе впервые предпринята попытка модифицирования существующих моделей сорбции воды и свеллинга ПЭ. Это необходимо для моделирования неравновесных условий с целью описания процессов массопереноса в слоях ЭЭ. Наиболее пригодной для решения задачи оказалась ПЭЭТ, недостатком которой является использование значительного количества неизвестных параметров. В настоящей работе эти параметров определяются применительно к условиям в ЭЭ.

Список обозначений	
Буквы греческого алфавита	
α, β	Параметры
ξ	Переменная интегрирования
θ	Угол смачивания
η	Отношение объема пор к объему сухого ПЭ (параметр свеллинга), отн.
λ	Число молекул воды на 1 ионно-обменный центр в ПЭ, отн.
μ	Динамическая вязкость
σ	Поверхностная плотность заряда на стенках пор, Кл·м$^{-2}$
ρ	Плотность, кг·м$^{-3}$
Φ	Потоки газа через мембрану (моль/м^2/с)
χ	Относительная объемная доля воды в ПЭ, отн.
γ	Коэффициент поверхностного натяжения воды, Па·м
Буквы латинского алфавита	
C	Концентрация, моль·м$^{-3}$

	Продолжение списка обозначений
E	Модуль Юнга, Па
F	Постоянная Фарадея, F ≈ 96 485Кл·моль$^{-1}$
G	Модуль сдвига, Па
i	Плотность тока, А/см^2
L	Средняя длина пор, м·м$^{-3}$
P	Давление, Па
R	Универсальная газовая постоянная, R ≈ 8,315Дж·моль$^{-1}$К$^{-1}$
R	Радиус
T	Абсолютная температура, ^{o}К
t	Температура, ^{o}С
V	Напряжение,
X	Относительное массовое содержание
Буквы русского алфавита	
Г	Коэффициент растворимости Генри, отн.
П	Упругое давление, Па
Индексы нижние	
act	Активация
cell	Ячейка
diff	Диффузионный
g	Газовая фаза
l	Жидкая фаза
ohmic	Омический
p	Пора и полимер
rev	Обратимый
sat	Насыщенный водяной пар
s	Поверхность
v	Объем
w	Вода
Аббревиатуры	
КТ	Каталитический слой
НПЭЭТ	Неравновесная пороэлектроэластичная теория
ПЭ	Полимерный электролит
ПЭЭТ	Пороэлектроэластичная теория
ЭЭ	Электролизный элемент

2. Теоретический анализ

2.1. Моделирование электролизных ячеек. Анализ литературных данных

Как правило, работы по моделированию электрохимических процессов в электролизных ячейках сводятся к эмпирическому описанию вольтамперной характеристики ЭЭ в виде [13–22]:

$$V_{cell} = V_{rev} + \eta_{act} + \eta_{omhic} + \eta_{diff}\,, \qquad (1)$$

где V_{cell} – напряжение на ячейке; V_{rev} – обратимый потенциал; η_{act} – перенапряжение активации; η_{ohmic} – омические потери; η_{diff} – диффузионное перенапряжение.

Иногда диффузионное перенапряжение игнорируется ([13]), в [14–16, 19–20] вместо этого рассматривается межфазное перенапряжение, которое по смыслу совпадает с диффузионным.

Наиболее подробно рассмотрена типичная методика расчета диффузионного перенапряжения в работе [17], где данный расчет проводился формально исходя из уравнения Нернста, в котором учитывалась только концентрация кислорода C_O (анод) и концентрация водорода C_H (катод):

$$\begin{cases} \eta_{diffa} = \dfrac{RT}{4F}\ln\dfrac{C_O}{C_{O0}}, \\ \eta_{diffc} = \dfrac{RT}{4F}\ln\dfrac{C_H}{C_{H0}}. \end{cases} \qquad (2)$$

По крайней мере, для анода такой подход не совсем корректен, так как очевидно, что скорость разложения воды определяется в основном концентрацией воды, а концентрация кислорода, растворенного в воде, на 2–3 порядка ниже. Кроме того, концентрации газов в КС полагаются однородными (не зависящими от координат). Данная методика применялась в работах [17, 18, 22].

Другой подход к расчету диффузионного перенапряжения состоит в аппроксимации экспериментальных данных эмпирической зависимостью [23]:

$$\eta_{diff} = i\left(\beta_1 \frac{i}{i_L}\right)^{\beta_2}, \qquad (3)$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

где i – плотность тока; i_L – предельное значение плотности тока; β_1, β_2 – параметры.

Этот способ расчета применялся в работе [21]. Первоначально соотношение (3) было получено при экзегетическом анализе эффективности топливного элемента в работе [24]. Параметры формулы (3) подбирались при анализе данных экспериментальных исследований конкретных топливных элементов. В частности, значение предельной плотности тока $i_L = 2 \cdot 10^4$ А/м^2 было получено именно для топливного элемента. Несмотря на это, в работах [13, 21] данное значение было использовано при анализе процесса электролиза. Следует отметить, что в работе [25] было получено значение плотности тока ЭЭ на порядок больше $i_L = 2 \cdot 10^5$ А/м^2. Этот пример также показывает, что в настоящее время не существует корректного и адекватного подхода к моделированию массообмена в процессе электролиза воды.

Таким образом, рассмотренные модели ЭЭ могут служить только для симуляции чисто электрических характеристик ЭЭ и обычно применяются для вычисления влияния изменения в небольшом диапазоне плотности тока обмена, толщины мембраны, рабочих условий (в частности, температура) на вольтамперную характеристику ЭЭ [18–20]. Пример использования моделей такого типа для увеличения эффективности электролизной системы в целом можно найти в работе [21]. Здесь, однако, необходимо подчеркнуть, что эффективность электролизного модуля определяется не только вольтамперной характеристикой, но и фарадеевской эффективностью (эффективность по току), особенно при повышенных давлениях. Вместе с тем именно фарадеевская эффективность никак не учитывается большинством существующих моделей.

2.1.1. Проблемы при моделировании массопереноса в слоях электролизного элемента

Реальные проблемы возникают при попытке моделирования процессов, приводящих к понижению фарадеевской эффективности и появлению водорода в кислороде анодных проточных каналов. Эти явления непосредственно связаны с транспортом водорода и кислорода через мембранно-электродный блок (так называемый кроссовер) [5, 26–28], поэтому результаты моделирования этих явлений могут служить показателем уровня понимания процессов транспорта в ЭЭ.

В работе [22] был проведен расчет значений фарадеевской эффективности ЭЭ в зависимости от толщины мембраны, давления в анодном и катодном проточных каналах, температуры и плотности тока. Расчет проводился по общей формуле:

$$\eta_F = 1 - 2F\frac{\Phi_{H_2}}{i} - 4F\frac{\Phi_{O_2}}{i}, \qquad (4)$$

где Φ_{H_2}, Φ_{O_2} – потоки водорода и кислорода через мембрану соответственно (моль/м^2/с); i – плотность тока (А/м^2); η_F – фарадеевская эффективность.

Потоки водорода Φ_{H_2} и кислорода Φ_{O_2} рассчитывались с учетом процессов диффузии, электроосмотического переноса растворенных газов водой, а также конвективного переноса в порах электролита за счет разности давлений в аноде и катоде. Необходимые параметры для всех коэффициентов переноса были взяты из работы [22]. Основные результаты показаны в виде графиков зависимости фарадеевской эффективности от плотности тока при различной толщине мембраны. Приведено несколько графиков, рассчитанных при различных значениях температуры и давления в анодном и катодном проточных каналах. Обращает на себя внимание отсутствие влияния температуры на фарадеевскую эффективность (выход по току), в то же время зависимость коэффициентов переноса от температуры значительна [32, 33]. Однако в рамках обсуждаемого вопроса последнее не важно. Существенна только зависимость фарадеевской эффективности от давления. Если при толщине мембраны 150 мкм, плотности тока 1 А/см^2 и давлении 0,1 МПа $1-\eta_F \approx 0{,}003$, то при давлении 5,0 МПа $1-\eta_F \approx 0{,}1$. Вместе с тем, согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [28], при толщине мембраны 150 мкм, плотности тока 1 А/см^2 и давлении 0,1 МПа $1-\eta_F \approx 0{,}03$, то при давлении 3,0 МПа $1-\eta_F \approx 0{,}08$. Если при больших значениях давления совпадение есть, то при малых – расхождение на порядок. В частности, расхождение расчетных значений может быть объяснено тем, что на границе «мембрана – КС» существует избыточное давление, которое обеспечивает выход электролитических газов через КС. Тогда расчет потоков следует проводить, используя не давление газов в проточных каналах, как это было сделано в [22], а некоторое эффективное давление на границе «мембрана – КС».

К сожалению, провести экспериментальное измерение выходов по току очень сложно, и работ по этой теме почти нет. Значительно легче ставить эксперименты по измерению концентрации водорода в электролитическом кислороде. Значение концентрации водорода в кислороде также связано с транспортом водорода через мембранно-электродный блок ЭЭ.

Наиболее полно экспериментальные данные по концентрации водорода в кислороде представлены в работе [35]. Цель данной работы состояла в том, чтобы смоделировать процессы, приводящие к появлению водорода в кислороде, для того чтобы оптимизировать структуру и режим работы обратимого элемента. В результате было получено много экспериментальных данных по концентрации водорода в кислороде ЭЭ при различных плотности тока, температуре и давлении. Эти данные использовались для вычисления экспериментальных значений потока водорода в анодный проточный канал.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Согласно модели, разработанной в статье [32] и задействованной в [35], движущей силой транспорта водорода является эффективное давление водорода P_{H}:

$$P_{\text{H}_2}^{cat} = P^{cat} + \alpha_{\text{H}_2} i - P_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (5)$$

где P_{cat} – давление в катоде; α_{H} – параметр; $P_{\text{H}_2\text{O}}$ – парциальное давление водяного пара.

Помимо этого, учитывалась вероятность того, что водород проходит анодный КС, не вступая в электрохимическую реакцию:

$$\text{H}_2 \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}^+ + 2e^-. \quad (6)$$

Протеканию реакции (6) способствует знак анодного перенапряжения.

В результате формула, выражающая зависимость потока водорода в анод, в модели выглядела следующим образом:

$$\Phi_{\text{H}} = (1-k_r)\frac{\varepsilon_{\text{H}}}{d} P_{cat} + \alpha_{\text{H}}(1-k_r)\frac{\varepsilon_{\text{H}}}{d}, \quad (7)$$

где k_r – параметр, который, по сути, есть вероятность окисления водорода по реакции (6); ε_{H} – проницаемость водорода через ПЭ мембраны.

Использование параметра $k_r < 1$ вполне обосновано, так как известно [36], что скорость реакции электрохимического окисления водорода на иридиевом катализаторе с увеличением перенапряжения более 0,15 В ток, соответствующий реакции (6), падает, что связано с образованием оксидов и адсорбцией анионов на поверхности катализатора. В несколько меньшей степени то же самое справедливо и для платинового катализатора.

В процессе аппроксимации данных выяснилось, что при максимальном давлении (1,0 МПа) точность аппроксимации удовлетворительна. Однако с понижением давления точность ухудшалась и при давлении 0,1 МПа становилась недопустимой. При этом давление P_{H} достигало $3{,}0 \div 10{,}0$ МПа. Данное обстоятельство указывает на то, что зависимость для эффективного давления (5) неверна.

Большой обзор по проницаемости газов в перфторированных мембранах был опубликован в работах [29, 30]. Измерения концентрации водорода в кислороде проведены также в работах [34, 28]. Полученные результаты по порядку величины совпадают с результатами, полученными в [35], однако, при одинаковых плотностях тока и рабочих условиях почти всегда больше, чем указано в [35]. Это свидетельствует только о том, что концентрация водорода в кислороде определяется структурой и составом анодного катализатора – из работы [35] следует, что вероятность окисления водорода по реакции (6) менее чем 0,7.

Таким образом, проведенный анализ работ показал, что понимание и адекватное моделирование процессов масс-транспорта в ЭЭ на основе твердополимерного электролита отсутствует. Единственным достижением работ, проводимых в данном направлении, является удачный эмпирический подход к моделированию электрических характеристик ЭЭ. Однако этого явно недостаточно. В частности, попытки моделирования кроссовера водорода и кислорода, приводящих к падению фарадеевской эффективности и появлению водорода в кислороде и обусловленных непосредственно масс-транспортом, не привели к успеху. Вместе с тем эти процессы определяют эффективность и водородную безопасность электролизных модулей в целом, особенно при значительных давлениях.

2.1.2. Оценка давления в полимерном электролите каталитических слоев электролизного элемента

Оценим предварительно движущую силу масс-транспорта газовых компонентов через КС ЭЭ. Для примера рассмотрим масс-транспорт кислорода через анодный КС, который состоит из активного катализатора, в данном случае иридия (Ir), погруженного в ПЭ. Принимаются следующие параметры модельного анодного КС:

– удельная масса Ir в слое $M_{\text{Ir}} = 3$ мг/см^2 = 0,03 кг/м^2;

– относительное массовое содержание ПЭ $X_p = 0{,}05$.

Тогда структурные и геометрические параметры слоя рассчитываются следующим образом:

Толщина слоя

$$h_a = \frac{M_{\text{Ir}}}{\rho_{\text{Ir}}}\left(1 + \frac{\rho_{\text{Ir}}}{\rho_p}\frac{X_p}{1-X_p}\right), \quad (8)$$

где $\rho_{\text{Ir}} \approx 22\ 400$ кг/м^3 и $\rho_p \approx 2\ 000$ кг/м^3 – плотности иридия и полимерного электролита соответственно. В данном случае $h_a \approx 2{,}13 \cdot 10^{-6}$ м = 2,13 мкм;

Объемная доля ПЭ

$$\varepsilon_{pv} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\text{Ir}}}{\rho_p}(X_p^{(-1)} - 1)}. \quad (9)$$

В данном случае $\varepsilon_{pv} \approx 0{,}32$.

Поток кислорода Φ_{O} может быть оценен исходя из разности парциальных давлений кислорода ΔP_{O} на границе «мембрана – анодный КС» и на внешней границе КС следующим образом:

$$\Phi_{\text{O}} = 2K_{p\text{O}} h_a^{-1} \Delta P_{\text{O}} = \frac{i}{4F}, \quad (10)$$

где $K_{p\text{O}}$ – эффективное значение коэффициента проницаемости ПЭ по кислороду [моль/с/м/Па].

Множитель 2 учитывает, что ток генерируется равномерно по толщине анодного КС.

Эффективное значение коэффициента проницаемости ПЭ может быть рассчитано исходя из экспе-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

риментально полученных данных (подробный обзор [16, 20]) с коррекцией Бруггермана по формуле:

$$K_{p\mathrm{O}} = K_{p\mathrm{O}}^{(0)}\,\varepsilon_{pV}^{1,5}\,, \tag{11}$$

где $K_{p\mathrm{O}}^{(0)} \approx 3\cdot 10^{-14}\,\dfrac{mol}{m\cdot s\cdot Pa}$ – экспериментальные данные, полученные при температуре 60 ºС и полностью увлажненном ПЭ в контакте с жидкой водой.

Исходя из соотношения (10) можно получить выражение для разности парциальных давлений кислорода ΔP_{O}:

$$\Delta P_{\mathrm{O}} = \frac{i}{8F}\,\frac{h_a}{K_{p\mathrm{O}}^{(0)}}\,\varepsilon_{pV}^{-1,5}\,. \tag{12}$$

При плотности тока 1 А/см^2 = 10^4 А/м^2 расчет по формуле (12) дает ΔP_{O} = 4,6 МПа. Значение избыточного давления сравнимо со значением осмотического давления в ПЭ, обусловленного разделением зарядов в порах ПЭ в присутствии воды. Следовательно, моделирование процесса разложения воды в ЭЭ на основе ПЭ должно учитывать изменение свойств самого ПЭ: транспортных свойств для воды, кислорода, водорода, проводимости, содержания воды. Примечательно, что самая первая публикация, описывающая изменение газопроницаемости перфторированных мембран в зависимости от плотности тока, была опубликована уже в 1982 г. [31].

2.3. Моделирование процессов сорбции и свеллинга полимерного электролита

К настоящему времени сложилось два основных подхода к моделированию процессов сорбции воды и разбуханию ПЭ.

Первоначально сложился подход на основе термодинамических условий фазового равновесия между мембраной и внешней газо-жидкостной фазой [38–41]. Для выражения фазового равновесия использовался формализм, основанный на химических потенциалах. Ниже данный подход к моделированию будет называться формальным.

Одна из первых физико-химических моделей, которая описывала процессы сорбции воды в ПЭ, была опубликована в 2003 г. [38]. Главная цель работы – объяснение парадокса Шредера [50]. Фундаментом физико-химической модели являлось основное уравнение баланса, которое выражало равенство химических потенциалов воды внутри и снаружи ПЭ:

$$LN\left(\frac{a_{i,M}^{F}}{a_{i,L}}\right) = -\frac{V_i}{RT}\;\Pi_M + \Pi_\sigma\;, \tag{13}$$

где $a_{i,\mathrm{M}}^{F}, a_{i,L}$ – активности воды в мембране и водяного пара во внешней среде (для жидкой воды и насыщенного водяного пара a = 1); Π_{M} – упругое давление; Π_σ – давление капиллярных сил на внешней поверхности.

Парадокс Шредера объяснялся просто. При контакте ПЭ с жидкой водой в уравнении баланса (13) член, связанный с давлением капиллярных сил Π_σ, отсутствует. При контакте ПЭ с газовой фазой на наружных порах возникает межфазная граница «газ – вода», которая обусловливает появление дополнительного капиллярного давления. Это давление противоположно по знаку осмотическому давлению. Сумма давлений в результате уменьшает разбухание мембраны и, соответственно, уменьшает количество воды в порах электролита. В данной физико-химической модели электроосмотическое давление явно отсутствует, но неявно учитывается при использовании величины активности воды в порах ПЭ.

Остальные модели данного направления [39–41] рассматривали различные подходы к описанию компонентов уравнения баланса (13): активности воды в полимере, упругого давления и внешних капиллярных сил. В принципе формальный подход прост, поскольку не предусматривает рассмотрение конкретных физических явлений, которые в неявном виде содержатся в выражении для химического потенциала. Но при этом процесс разработки модели не приводит к пониманию процессов, приводящих к сорбции воды и свеллингу ПЭ. Кроме того, довольно трудно получать все необходимые экспериментальные данные для эмпирического описания химического потенциала. В любом случае формальный подход не содержит в себе никаких противоречий с более явной и наглядной ПЭЭТ.

Второе направление моделирования процессов сорбции воды и разбухания мембран на базе ПЭ основано на так называемой пороэлектроэластичной теории [6, 51, 52]. Суть этой теории заключается в подробном рассмотрении баланса давлений в ПЭ, что не требует формализации через химический потенциал, поэтому ПЭЭТ более прозрачна и наглядна. Базой для ПЭЭТ является работа [47], в которой приведены результаты изучения капиллярных пор и сорбционных свойств мембран типа Nafion®. Здесь применялся стандартный порозиметрический метод (SPM) для изучения капиллярных пор и сорбционных свойств Nafion®. Результатом работы являлось, в частности, распределение пор мембраны Nafion® по размеру, которое оказалось близко к логнормальному распределению. Методика порозиметрии состояла в измерении количества сорбированной воды в зависимости от ее активности в пористой среде. При этом для гидрофильных пор справедлива формула Кельвина – Лапласа, связывающая давление, при котором начинается капиллярная конденсация, с размером пор:

$$P_V = P_S \exp\left(-\frac{2\gamma V_w \cos\theta}{R_g T R_p}\right), \tag{14}$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

где P_v, P_s – давление насыщенных паров воды в порах и открытой среде соответственно; γ – коэффициент поверхностного натяжения воды; $\overline{V_w}$ – молярный объем воды; R_g – универсальная газовая постоянная; R_p – радиус пор мембраны.

Таким образом, распределение по размерам пор, полученное в работе [47], определяет капиллярное давление в порах:

$$P_l = P_g + \frac{R_g T}{V_w} \ln\left(\frac{P_v}{P_s}\right), \quad (15)$$

а также изопиестическую кривую адсорбции воды в мембране типа Nafion®, которая аппроксимируется зависимостью:

$$\lambda = 3,0\left(\frac{P_v}{P_s}\right)^{0.2} + 11,0\left(\frac{P_v}{P_s}\right)^{4}. \quad (16)$$

В своем первоначальном виде модели не рассматривали электрических сил вообще и сил, связанных с пограничными явлениями (капиллярность) [51, 52]. Поэтому сторонники данного направления теории сорбции и свеллинга отрицали наличие парадокса Шредера. Даже появилась экспериментальная работа [42], которая объясняла наличие парадокса различием в предыстории обработки различных мембран. Однако такой вывод делался на основе только одного экспериментального результата среди множества данных, приведенных в работе [42]. Позже в работе Freger'a [43] парадокс Шредера был восстановлен, и была разработана ПЭЭТ в современном виде.

В окончательном виде ПЭЭТ рассматривает баланс давлений в виде общего уравнения [6]:

$$P_{el} = P_l + P_{osm}, \quad (17)$$

где P_{el} – давление, создаваемое упругими силами полимера; P_{osm} – электроосмотическое давление; P_l – давление жидкой воды в порах полимера, обусловленное силами межфазного взаимодействия на границе полимера.

В различных вариантах ПЭЭТ используются различные формы представлений упругих и электроосмотических сил.

3. Модификация ПЭЭТ для полимерного электролита в области насыщения водой в неравновесных условиях

Описанная ниже модификация ПЭЭТ для ПЭ не претендует на полноту описания всех аспектов процессов сорбции, разбухания полимера, транспорта воды и неконденсирующихся газов. Главная цель состоит в том, чтобы адекватно описать процессы транспорта в электрохимическом устройстве, поэтому условия, для которых была разработана модификация ПЭЭТ, соответствуют максимальному содержанию воды в полимере. При этом многие параметры рассчитываются исходя из доступных экспериментальных измерений, проведенных при условиях, близких к полному насыщению ПЭ водой.

3.1 Баланс давлений в полимерном электролите в НПЭЭТ

В данной работе рассматриваются локальные квазиравновесные состояния ПЭ, воды и газового компонента, которые определяются балансом всех давлений, действующих в ПЭ:

$$P_{ext} + P_{el} + P_{out} = P_{osmv} + P_l, \quad (18)$$

где P_{el} – давление, создаваемое упругими силами деформированного ПЭ; P_{osmv} – объемное осмотическое давление; P_l – давление воды в порах полимера; P_{out} – давление внешней среды полимера; P_{ext} – давление, создаваемое внешними силами.

В равновесии при отсутствии масс-транспорта воды и растворенных газов для давления жидкой воды P_l выполняется соотношение:

$$P_l - P_{out} = P_{osms} + P_{cap}, \quad (19)$$

где P_{osms} – осмотическое давление, связанное с наличием градиента плотности заряда на внешней поверхности ПЭ; P_{cap} – капиллярное давление на границе поры ПЭ с внешней средой (для гидрофильной поверхности пор ПЭ $P_{cap} < 0$).

Капиллярное давление определяется обычным образом – $P_{cap} = \frac{2\gamma\cos\theta}{R_p}$, а радиус пор R_p – условиями на внешней границе ПЭ, в частности влажностью внешней среды.

Таким образом, уравнение баланса давлений в равновесных условиях имеет вид, характерный для равновесной ПЭЭТ:

$$P_{ext} + P_{el} = P_{osmv} + P_{osms} + P_{cap}. \quad (20)$$

В неравновесных условиях при наличии масс-транспорта уравнение баланса давлений в объеме ПЭ справедливо в форме (18), а на внешней границе – в форме (20).

Обычно рассматривается равновесное, стационарное состояние ПЭ, которое не предполагает наличия масс-транспорта воды и неконденсирующихся газов. Данная модель рассматривает локальное квазиравновесное состояние ПЭ, причём предполагается, что локально всегда существует равновесие по давлениям. В то же самое время равновесие по со-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

держанию воды и газов отсутствует, что возможно при наличии внутри полимера соответствующих источников. Это обстоятельство обусловливает наличие масс-транспорта воды и неконденсирующихся газов. В данной постановке решение задачи пригодно для моделирования работающих электрохимических устройств.

Принципиально новым компонентом баланса давлений в НПЭЭТ по сравнению с классической ПЭЭТ является учет давления P_g, создаваемого растворенным газом (водород или кислород). Кроме того, допускается, что давление жидкой воды в порах полимера P_l отличается от равновесного значения, определяемого как сумма давлений, обусловленных наличием сил межфазного взаимодействия на границе полимера с внешней средой.

В НПЭЭТ предполагается, что давление воды в порах ПЭ состоит из двух компонентов:

$$P_l = P_w + P_g , \tag{21}$$

P_g – давление, создаваемое растворенным газом (водород или кислород); P_w – парциальное давление воды без учета растворенного газа.

В условиях ограниченного объема без газовой фазы давление P_g определяется следующим образом:

$$P_g = \frac{C_g}{C_w \Gamma_g}, \tag{22}$$

где C_g, C_w – плотность воды и растворенного газа соответственно [моль/м^3]; Γ_g – растворимость газа в воде в единицах [Па$^{-1}$].

Рассмотрим каждый компонент давления подробнее.

3.2. Упругие силы в полимерном электролите

Упругие силы используются в балансе давлений как в формальной, так и пороэлектроэластичной моделях сорбции воды и свеллинга ПЭ.

Обычно для описания зависимости упругого напряжения в ПЭ от относительного изменения объема при набухании применяется подход Freger'a [51], предназначенный для неаффинной деформации перфторированного полимера. Freger вывел выражение для свободной энергии полимера с водой, предполагая сохранение объема стенок полимерной матрицы на основе модели Flory – Rehner [45]. Упругие силы полимера рассчитываются с помощью выражения для свободной энергии и стандартных термодинамических соотношений. Выражение для свободной энергии деформированного полимера содержит тензор деформации стенок полимера. Окончательный вид упругого давления в полимере существенно зависит от предположения о виде тензора деформаций. Например, можно рассмотреть 3 варианта характера деформации материала стенки перфторированного полимера:

1) изотропическая в плоскости деформация;
2) деформация при фиксированной длине;
3) деформация вдоль фиксированного направления.

В каждом из 3-х случаев можно получить выражение для давления, создаваемого упругими силами деформированного ПЭ:

$$P_{el}^{\,1} = \frac{2}{3} G \left[\Phi_p^{1/3} - \Phi_p^{7/3} \right]; \tag{23}$$

$$P_{el}^{\,2} = \frac{2}{3} G \left[\Phi_p^{1/3} - \Phi_p^{5/3} \right]; \tag{24}$$

$$P_{el}^{\,3} = \frac{2}{3} G \left[\Phi_p^{-1/3} - \Phi_p^{5/3} \right], \tag{25}$$

где $P_{el}^{\,i}$ – упругое давление для варианта (i); G – модуль сдвига ($E_0 = 2G\ 1+\nu$); E_0 – модуль Юнга, коэффициент Пуассона ν = 0,5; Φ_p – объемная доля сухого полимера; $\Phi_{pn} = n1-\chi$, χ – относительная объемная доля воды в полимере, и $\chi = \frac{V_w}{V_w + V_{dry}} = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_m}$; $\lambda_m \approx 30$ для мембран типа Nafion®; V_{dry},V_w – объемы сухого полимера и воды соответственно.

Предположительно, упругое давление в полимере должно быть равно 0 при Φ_p = 1 (отсутствие деформации) и Φ_p = 0 (бесконечная деформация). Этому условию отвечают только зависимости (23) и (24). Вариант (25) в дальнейшем не рассматривается.

Отметим, что при $\chi \to 0$ зависимости $P_{el}(\varepsilon)$ (23) и (24) имеют линейный характер:

$$P_{el}^{\,1} \approx \frac{4}{3} G\chi \left(1 - \frac{5}{6}\chi \right), \tag{26}$$

$$P_{el}^{\,2} \approx \frac{8}{9} G\chi \left(1 - \frac{17}{24}\chi \right). \tag{27}$$

Наличие в работе [38] выражения $P_{el} = k\varepsilon$ (k = = 18,3 МПа) в какой-то степени обоснованно. Если $k = \frac{4}{3}G = \frac{2}{3(1+\nu)}E_0 = \frac{4}{9}E_0$, то фактически использованное в работе [38] значение модуля Юнга E_0 = 41 МПа. Это значение соответствует данным, полученным различными исследователями для мембраны типа Nafion® при максимальном увлажнении [39, 46, 48], что вполне допустимо, так как работа [38] была ориентирована на объяснение парадокса Шредера, а значение k, равное 18,3 МПа, было, по-видимому, получено в результате аппроксимации для максимального соответствия расчётных и экспериментальных данных.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

В настоящее время модели, рассматривающие сорбцию воды и свеллинг ПЭ, для описания упругого давления задействуют зависимость (23) [6, 39, 40–43].

Выражения (23) и (24) имеют максимум при некотором значении объемной доли сухого полимера $\Phi_{p\max}$, для (20) $\Phi_{p\max} = 1/\sqrt{7}$, для зависимости (21) $\Phi_{p\max} = 1/\sqrt{5}$. Наличие максимума в зависимости упругого давления полимера от Φ_p означает следующее. При уменьшении доли сухого полимера ниже Φ_{pmax} сопротивление полимера растяжению начинает падать и приводит в конечном счете к разрушению его структуры. Для варианта изотропической в плоскости деформации это происходит при $\Phi_p < 0{,}378$ ($\chi > 0{,}622$), для варианта деформации при фиксированной длине – при $\Phi_p < 0{,}447$ ($\chi > 0{,}553$). Отметим, что при контакте полимера с жидкой водой ($\lambda \approx 22$) $\chi \approx 0{,}423$, что уже близко к критическому значению. При наличии внутри полимера дополнительного давления, обусловленного неконденсирующимися газами, этот предел может быть превышен. Однако выражения (23) и (24) справедливы лишь для малых и умеренных деформаций. Поскольку рассматриваемая в данной работе модель имеет отношение к ПЭ при больших значениях сорбции воды и свеллинга ($\lambda \approx 20$, $\chi \approx 0{,}4$ и более), логично попытаться использовать экспериментальные данные по измерению модуля Юнга. В доступных источниках имеется множество данных измерений модуля Юнга, полученных разными методами. Результаты измерений при этом часто существенно отличаются друг от друга (см., например, обзор [54]).

Основные проблемы при измерениях связаны со следующими особенностями упругих свойств мембран на основе ПЭ типа Nafion®:

1. Существенна зависимость модуля Юнга ПЭ от распухания. В модели Flory – Rehner используется значение модуля Юнга E_F для твердой матрицы ПЭ, которое считается зависящим только от температуры. В экспериментальных измерениях получается эффективное значение модуля Юнга E для полимера в целом, которое связано с E_F соотношением:

$$E(\chi) = \frac{2}{3} E_F \frac{d}{d\chi}\left(\left[(1-\chi)^{1/3} - (1-\chi)^{7/3}\right]\right). \qquad (28)$$

В явном виде из (28) можно получить:

$$E(\mathrm{c}) = \frac{2}{9} E_F \frac{1}{(1-\chi)^{2/3}}\left[7(1-\chi)^2 - 1\right]. \qquad (29)$$

При $\chi \to 0$ получим:

$$E_0 = \frac{4}{3} E_F . \qquad (30)$$

Часто зависимость модуля Юнга от относительного объема жидкой фазы аппроксимируют экспоненциальной зависимостью, например в [39]:

$$E(\chi) = E_0 \exp(-2{,}173\chi) , \qquad (31)$$

где $E_0 \approx 320$ МПа – значение модуля Юнга для сухого ПЭ.

2. Значения свеллинга существенны и не могут считаться предельно малыми. Известный закон Гука в простом виде $P_{el} = G\frac{\Delta x}{l}$ справедлив только для $\Delta x / l \ll 1$.

Исходя из анализа особенностей свеллинга ПЭ, расчет упругого давления следует проводить следующим образом:

$$P_{el}(x) = \int_0^x G(\xi)\frac{d\xi}{1+\xi} = \frac{1}{2(1+\nu)}\int_0^x E(\xi)\frac{d\xi}{1+\xi} , \qquad (32)$$

где $0 < \xi < x$ – относительная деформация (в данном случае растяжение); $E(\xi)$ – модуль Юнга как функция относительного удлинения.

Использование соотношения (32) предполагает знание «локального» значения модуля Юнга (при заданном значении объемной доли воды в полимере). Экспериментальные данные по значению модуля Юнга, полученные в работах [46, 53], могут быть задействованы в расчетах упругого давления. В работе [54] для измерений применялся метод OEH (Optoelectronic holography), в работе [46] – подобный усовершенствованный метод TEOM (tapered element oscillating microbalance). Кроме того, данные методы успешно применялись для исследования процессов сорбции/десорбции водяного пара в мембране Nafion® при различной влажности и температуре. Эти методы основаны на измерении малых осцилляций для мембраны, которая имеет некоторое значение начальной деформации, и очень хорошо подходят для измерения истинного локального значения модуля Юнга уже деформированной мембраны.

3.3. Осмотическое давление

Истинное равновесие в ПЭ возможно при отсутствии внутренних источников воды или неконденсирующихся газов и обеспечивается за счет объемных и поверхностных сил. При анализе электроосмотического давления предполагается, что давление газа и воды в объеме ПЭ находится в равновесии с внешней средой. Баланс давлений вблизи внешней границы ПЭ в этом случае определяется следующим образом:

$$P_{el} = P_{osmv} + P_{osms} + P_{cap} , \qquad (33)$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Рассмотрим каждый компонент баланса давлений отдельно.

1. *Электростатические силы, обусловленные наличием поверхностного заряда с плотностью* σ_0 *[Кл/м^2]*. Если предполагать, что при большом значении свеллинга ($\chi > 0{,}3$) полимера поры имеют цилиндрическую форму, то за счет отталкивания отрицательных зарядов на поверхности цилиндра создается объемное электроосмотическое давление:

$$P_{osmv} = \frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \tag{34}$$

где P_{osmv} – часть сил электроосмоса, действующая в объеме; ε – диэлектрическая проницаемость воды ($\varepsilon = 45$ [55]); ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м^2).

Коэффициент 0,5 в формуле (33) появляется из-за того, что заряды сами себя не отталкивают.

2. *Силы упругого давления деформированного полимера* P_{el}, подробно рассмотренные выше.

3. *Капиллярные силы, связанные с наличием межфазной границы «внешняя среда (газовая фаза) – вода» в порах ПЭ*. Полагаем, что соответствующий вклад в давление

$$P_{caps} = \frac{2\gamma}{R_p}\cos\theta_c, \tag{35}$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения воды; R_p – средний размер пор ПЭ; θ_c – угол смачивания для ПЭ, согласно данным [47] $\theta_c = 98^o$.

4. *Часть электроосмотической силы, связанная с наличием границы раздела фаз или наружной поверхности ПЭ*. Наличие объемного заряда, связанного с положительно заряженными протонами, характерно только для внутренних пор полимера. Протоны не могут проходить в газовую фазу, поскольку их наличие обусловлено жидкой водой в порах электролита. Аналогично эти протоны не могут выходить в жидкую фазу в открытом пространстве, где не могут присутствовать ионы противоположного знака. Это обстоятельство приводит к появлению скачка потенциала на границе, который называют потенциалом Доннана.

В работе [6], исходя из уравнения Стокса и уравнения Нернста – Планка, достаточно строго показано, что разность давлений P_{osms}, соответствующая скачку потенциала,

$$P_{osms} = -\mathrm{RTC_H}, \tag{36}$$

где C_H – объемная концентрация протонов в ПЭ.

Средняя объемная концентрация протонов в ПЭ C_H для определения электроосмотической силы, связанной с наличием границы раздела фаз или наружной поверхности ПЭ, рассчитывается из условия электронейтральности. Таким образом, полный заряд поверхности стенок пор равен полному заряду протонов в объеме пор. Отсюда следует, что концентрация протонов

$$C_\mathrm{H} = \frac{Q}{\eta F} = \frac{2\sigma_0}{R_p F}. \tag{37}$$

Окончательно с помощью формулы (37) для осмотического давления на внешней границе ПЭ можно получить:

$$P_{osms} = \mathrm{RTC_H} = \frac{RT}{F}\frac{2\sigma_0}{R_p}. \tag{38}$$

Для расчета всех компонентов давлений, которые противодействуют упругому давлению деформированного полимера, требуется достоверная информация о геометрических параметрах и плотности поверхностного заряда пор ПЭ в зависимости от деформации. В работе [6] продемонстрирован один из вариантов расчета необходимых параметров. Этот вариант подхода к разработке модели можно было бы использовать, если бы не большое количество неопределенностей, допущений и следствий, которые часто неадекватно отражают реальные системы.

В работе [6] при расчете геометрических параметров и плотности поверхностного заряда пор ПЭ делалось два основных предположения.

1. Для пространственного масштабирования поверхностной плотности заряда кислотных групп пор σ используется следующая зависимость в виде степенного закона:

$$\sigma = \sigma_0\left(\frac{R_0}{R}\right)^\alpha, \tag{39}$$

где R – радиус цилиндрических пор; в работе [6] полагалось $R_0 = 1$ нм; α – константа, $0 < \alpha < 1$, $\alpha = 0$ соответствует варианту полной перестройки кислотных групп при свеллинге, $\alpha = 1$ соответствует фиксированному положению кислотных групп при свеллинге.

2. При свеллинге ПЭ полный заряд пор не меняется:

$$2\pi RL\sigma = 2\pi R_0 L_0 \sigma_0, \tag{40}$$

где L – длина пор.

Заметим, что при $\alpha > 0$ для соответствия предположениям (39) и (40) должно происходить существенное уменьшение длины пор.

Из предположений (39) и (40) следует, что

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^\alpha. \tag{41}$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Далее получено, что параметр свеллинга (отношение объема пор V_p к объему сухого полимера, связанного с рассматриваемой порой V_0)

$$\eta = \frac{\pi R^2 L}{V_0} = \xi \left(\frac{R}{R_0} \right)^{1+\alpha} . \quad (42)$$

Не рассматривая сложную методику расчета ξ из работы [6], учтём лишь то, что, согласно предположению, это – константа. Объем сухого полимера при свеллинге не меняется, поэтому из (39)–(42) следует:

$$\xi \sim \left(\frac{R}{R_0} \right)^{1-2\alpha} . \quad (43)$$

Из (43) следует, что ξ является действительно константой только при $\alpha = 0{,}5$. Именно это значение было выбрано в работе [6] для модельных расчетов, что, в свою очередь, свидетельствует о следующем: модель заранее ограничена конкретным вариантом поведения ПЭ при свеллинге.

Для расчета осмотического давления на основе корректно выведенной формулы (45) авторы работы [6] использовали результаты точного решения задачи об электроосмотическом течении в цилиндрических каналах полимерной электролитной мембраны, приведенной в работе [57]. Следует отметить, что в работе [46] на основе того же самого решения получен также парадоксальный результат для значения коэффициента электроосмотического переноса воды, равного 22.

В настоящей работе более ясный и прозрачный, хотя и упрощенный подход к описанию давлений, связанных с электроосмосом, применяется по двум причинам:

1. Исходя из современных представлений о процессах свеллинга и сорбции воды ПЭ, нет никаких оснований сильно усложнять теоретические модели за счет рассмотрения деталей до конца не исследованных физико-химических процессов.

2. Данная модель не претендует на глобальное описание процессов свеллинга и сорбции воды ПЭ в любых допустимых условиях и ограничена условиями увлажненности ПЭ при контакте с насыщенным водяным паром и жидкой водой.

Для конкретных расчетов посредством описанной модели необходимо определить параметры пор ПЭ: средний радиус пор R_0, полная длина пор на единицу объема сухого полимера L_0, средняя плотность электрического заряда на стенках пор σ_0. Естественно, что перечисленные параметры зависят от температуры и свеллинга. Для определения неизвестных параметров делаются следующие предположения:

1. Так же, как и в работе [6] для пространственного масштабирования поверхностной плотности заряда кислотных групп пор σ используется следующая зависимость в виде степенного закона:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\alpha} , \quad (44)$$

где α – константа, $0 < \alpha < 1$, $\alpha = 0$ соответствует варианту полной перестройки кислотных групп при свеллинге, $\alpha = 1$ соответствует фиксированному положению кислотных групп при свеллинге; σ_0, R_0 – некоторые сравнительные значения плотности заряда и размера пор, соответствующие, например, равновесному состоянию ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром.

2. Отношение полного заряда единицы объема сухого ПЭ к аналогичной сравнительной величине выражается следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{R_{p0} L_0}{R_p L} \right)^{\beta} , \quad (45)$$

где β – константа, $0 < \beta < 1$, $\beta = 0$ соответствует варианту постоянства плотности электрического заряда стенок пор при свеллинге, $\beta = 1$ соответствует варианту постоянства полного электрического заряда стенок пор при свеллинге.

Параметры α и β определяют изменение морфологии ПЭ при свеллинге, и без знания этих параметров невозможно определить характер свеллинга ПЭ при наличии дополнительных ранее не изученных компонентов внутреннего и внешнего давления.

Рассмотрим некоторый объем ПЭ с цилиндрическими порами радиуса R_p. При этом положим, что объем сухого ПЭ равен 1, а общая длина пор равна L. Тогда параметр свеллинга η может быть вычислен следующим образом:

$$\eta = \pi R_p^2 L . \quad (46)$$

Из (46) следует, что

$$L = \frac{\eta}{\pi R_p^2} . \quad (47)$$

Учитывая предположения (44)–(45), а также очевидное соотношение (47),

$$\frac{R_0}{R} = \left(\frac{\eta_0}{\eta} \right)^{\beta/\ \alpha+\beta} . \quad (48)$$

Далее, из (44) и (48) следует зависимость плотности поверхностного заряда от параметра свеллинга:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{\alpha\beta/\ \alpha+\beta}. \qquad (49)$$

Наконец, с помощью соотношений (47) и (48) можно получить зависимость длины каналов от параметра свеллинга:

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^{\alpha-\beta\ /\ \alpha+\beta}. \qquad (50)$$

Общая длина пор при свеллинге не меняется при $\alpha = \beta$, растет с увеличением свеллинга при $\alpha > \beta$ и падает при $\alpha < \beta$. Общая длина каналов – очень важная величина, которая определяет скорость переноса воды и газов через ПЭ. Анализ соответствующих экспериментальных данных по транспорту неконденсирующихся газов через ПЭ позволит более точно определить возможные пределы изменения неизвестных параметров α и β.

3.5. Давление, создаваемое растворенным газом (водородом или кислородом)

Газы, которые генерируются в КС, на границе раздела «активный катализатор – ПЭ» (водород и кислород) заведомо находятся в виде раствора в воде в порах ПЭ. При этом растворенные в воде газы создают дополнительное давление P_g, которое, согласно соотношению (21), является составной частью полного давления жидкости в порах ПЭ P_l. Если концентрация растворенного в воде газа есть C_{gw}, то соответствующее значение P_g выражается, согласно закону Генри, следующим образом:

$$P_g = RTC_{gw}\Gamma_{gw}, \qquad (51)$$

где Γ_{gw} – коэффициент растворимости Генри: в данной формулировке эта константа безразмерна, если концентрацию C_{gw} выражать в единицах [моль/м^3].

Выделение газов в объеме обусловливает его избыточное давление (относительно давления газа снаружи), которое приводит к образованию пересыщенного раствора в порах ПЭ. При этом локально в каждой точке объема равновесие по давлениям соблюдается:

$$P_{ext} + P_{el} = P_{osmv} + P_l - P_{out}. \qquad (52)$$

3.6. Внешнее давление

Наличие внешнего давления приводит к выдавливанию воды из ПЭ и в результате к уменьшению проводимости и транспортных свойств ПЭ. С другой стороны, уменьшение внешнего давления приводит к вероятности утечек и, следовательно, его минимальное значение определяется технологией изготовления ячеек.

Непосредственно давление создается за счет сжатия резиновых прокладок наружными шпильками, которые стягивают концевые фланцы стека. Более совершенные системы кроме стандартных прокладок включают пружинные шайбы, надетые на шпильки, стягивающие концевые пластины электролизной ячейки или стека.

Свойства мембран, подверженных сжатию (constrains), рассматривались в немногочисленных работах, в основном чисто теоретически [49, 60]. Рассмотрение данного вопроса базировалось на моделях свеллинга и сорбции воды в ПЭ. В более ранней работе [60] применялся чисто формальный подход, основанный на химических потенциалах. При этом в качестве степени сжатия использовался параметр χ (степень сжатия), который представлялся следующим образом:

$$\chi = \frac{V_f - V_{cont}}{V_f - V_0}, \qquad (53)$$

где V_f, V_{cont}, V_0 – объемы свободной, сжатой и сухой мембраны соответственно.

При этом в выражении для химического потенциала степень сжатия χ учитывалась следующим образом:

$$\Delta\mu_0 = -EV_0 ln\left(\frac{V_{cont}}{V_f}\right). \qquad (54)$$

Указанный подход подразумевает, что изначально задается степень сжатия в пределах от свободного ($V_{cont} = V_f$, $\chi = 0$) до сухого ($V_{cont} = V_0$, $\chi = 1$) ПЭ. При этом такой подход предполагает, что, исходя из параметра χ, с помощью модели получают внешнее давление, которое при заданной влажности мембраны обеспечивает заданную степень сжатия.

Тем не менее из результатов работы [49] следует:

1) снижение влагосодержания мембраны при контакте с насыщенным водяным паром и жидкой водой всего примерно на 20 % при изменении от $\chi = 0$ до $\chi = 1$;

2) снижение проводимости мембраны при контакте с насыщенным водяным паром и жидкой водой всего примерно на 30 % при изменении от $\chi = 0$ до $\chi = 1$;

3) снижение скорости транспорта воды через мембрану при контакте с насыщенным водяным паром и жидкой водой всего примерно на 30 % при изменении от $\chi = 0$ до $\chi = 1$.

Немного позже для объяснения парадокса Шредера была разработана теория свеллинга и сорбции воды [38], которая уже в явном виде использовала упругие силы в ПЭ. На основе этой теории были проделаны аналогичные расчеты, результаты которых приведены в работе [60]. Однако в данной рабо-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

те была задействована специфическая модельная система для расчетов, которая допускала свеллинг мембраны в *X*–*Y* плоскости при фиксировании ее в *Z*-направлении (толщина мембраны). Как известно, в составе электролизной или топливной ячеек ситуация обратная – мембрана фиксирована в *X*–*Y* плоскости и ограниченно свободна в *Z*-направлении [62]. В работе [59] установлено, в частности, что заметное влияние внешнего давления начинается при $P_{ext} \approx 10^5$ Па, а при $P_{ext} \approx 10^7$ Па свеллинг мембраны практически отсутствует (указанные результаты получены для мембран, работающих в топливном элементе).

Рассматриваемая в настоящей работе модель свеллинга и сорбции воды в ПЭ учитывает внешнее давление наиболее просто в уравнении баланса давлений (18). При этом соответствующая составляющая в балансе давлений P_{ext} рассчитывается следующим образом:

$$P_{ext} = K_{ext}(\chi + \chi_0), \qquad (55)$$

где K_{ext} – коэффициент пропорциональности в зависимости внешнего усилия от относительной деформации (определяется конкретной конструкцией); χ – относительная деформация, связанная со свеллингом ПЭ; χ_0 – начальное значение деформации (задается при изготовлении ячейки для обеспечения герметичности).

Предполагается, что внешнее давление пропорционально относительной деформации, однако для резины это может быть не совсем верно, и выражение (55) может быть модернизировано. Кроме того, жесткость резины (K_{ext}) может зависеть от температуры. Для того чтобы сделать характеристику сжатия линейной и не зависящей от температуры, применяют пружинные шайбы на стягивающих шпильках. При этом резину можно выбрать более эластичную, а соотношение (55) определяется свойствами пружинных шайб.

4. Результаты и их обсуждение

В данном разделе описываются результаты анализа экспериментальных данных по электрическим и упругим свойствам ПЭ из открытых источников. На основе анализа определяются неизвестные параметры НПЭЭТ.

4.1. Параметры для вычисления модуля Юнга

Для аппроксимации экспериментальных данных использовалась зависимость:

$$E(\chi) = E_0 exp(-\alpha\chi), \qquad (56)$$

где $E(\chi)$ – модуль Юнга при заданном значении объемной доли воды в полимере; E_0 – модуль Юнга для сухого полимера; χ – объемная доля воды в полимере, $\chi = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_m}$, $\lambda_m = 30$; α – константа, которая подбирается в процессе аппроксимации.

Для аппроксимации принимались во внимание данные по значению модуля Юнга, полученные в работе [39] методом ОЕН. Результаты измерений [39] были получены для различных температур (20 ºС, 40 ºС, 60 ºС и 90 ºС). Результаты аппроксимации приведены на рис. 1. Экспериментальные данные в исходном виде представляли собой зависимость модуля Юнга от относительной влажности. На рис. 1 эти данные пересчитаны как зависимость от относительного объема сорбированной воды с помощью изотермы сорбции воды для мембран типа Nafion®.

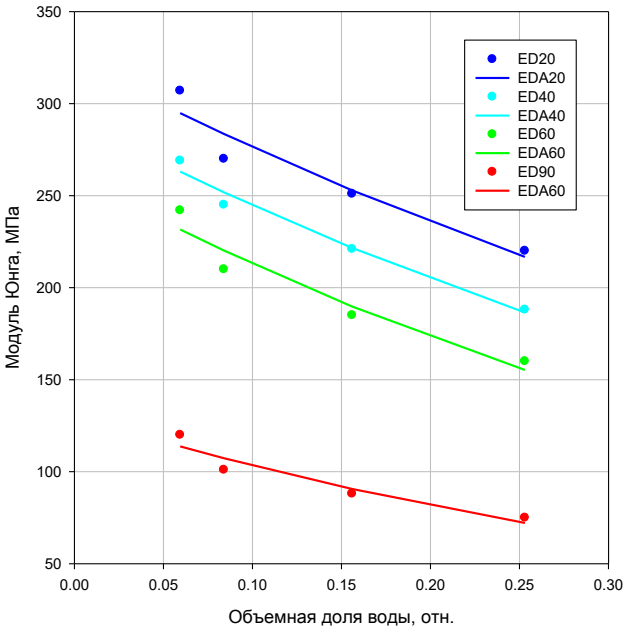


Рис. 1 – Зависимость модуля Юнга (*E*) от объемной доли воды в ПЭ (χ) при различных температурах. Аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (56):
ED – экспериментальные данные; EDA – аппроксимация экспериментальных данных
(цифры в обозначении графика – температура, °С)
Fig. 1 – Dependence of the Young's modulus (E) on a volume fraction of water in polymer electrolyte (χ) at various temperatures. Approximation of experimental data by dependence (56):
ED – experimental data;
EDA – approximation of experimental data
(numbers in the legend designate temperature, in °C)

Данные, приведенные на рис. 1, показывают вполне удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с результатами расчета посредством аппроксимации (56) и с учетом обычной погрешности измерений модуля Юнга не лучше 10 %.

Параметр α в формуле (56) зависит от температуры. Эта зависимость аппроксимирована следующим образом:

$$\alpha \approx 1{,}3631 + 0{,}0111t, \qquad (57)$$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

где t – температура (°C).

Для окончательного определения упругого давления при вычислении интеграла в (32) положим, что

$$\frac{1}{1+\chi} \approx e^{-\chi}. \qquad (58)$$

Точность аппроксимации (58) составляет менее 5 % при $\chi < 0{,}5$, тогда окончательно для упругого давления

$$P_{el}(\chi) \approx \frac{E_0}{2(1+\nu)(1+\alpha)}\left[1-e^{-(1+\alpha)\chi}\right]. \qquad (59)$$

Зависимость упругого давления в ПЭ от температуры проявляется через соответствующую зависимость от температуры модуля Юнга. Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, показал, что при увеличении температуры с 20 ºС до 60 ºС значение модуля Юнга плавно падает, а при увеличении температуры до 90 ºС – падает более значительно. Для того чтобы определить эту зависимость, достаточно рассмотреть значения модуля Юнга для сухого полимера, полученные при аппроксимации экспериментальных данных [48] зависимостью (56).

Все экспериментальные зависимости модуля Юнга для сухого полимера от температуры хорошо аппроксимируются следующим образом:

$$\frac{E_0}{E_{00}} = \sqrt{1-\frac{t}{t_{\max}}}, \qquad (60)$$

где $E_{00} \approx 373$ МПа – значение модуля Юнга сухого полимера при $t = 0$ ºС; $t_{\max} \approx 104$ ºС.

Результаты аппроксимации значений модуля Юнга для сухого полимера (E_0) приведены на рис. 2 в виде зависимости от температуры.

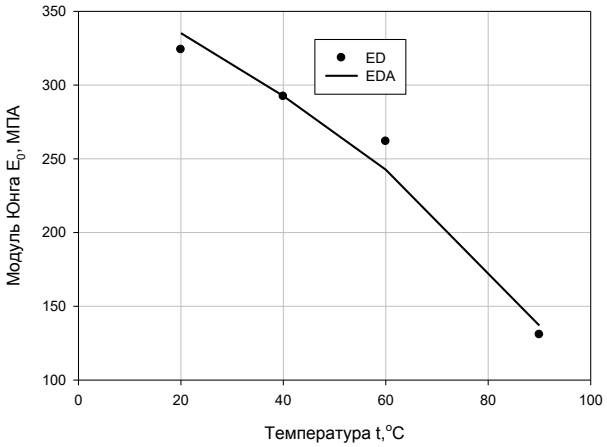


Рис. 2 – Зависимость значений модуля Юнга для сухого полимера E_0 от температуры. Аппроксимация данных зависимостью (60): ED – экспериментальные данные; EDA – аппроксимация экспериментальных данных
Fig. 2 – Dependence of the Young's modulu values for dry polymer E_0 on temperature. Approximation of data by dependence (60): ED – experimental data; EDA – approximation of experimental data

На рис. 3 представлены графики зависимостей относительного упругого давления $\left(P_{el}/E_0\right)$ от относительной объемной фракции воды χ, рассчитанные посредством модели Flory – Rehner и аппроксимации (59), полученной из анализа экспериментальных данных.

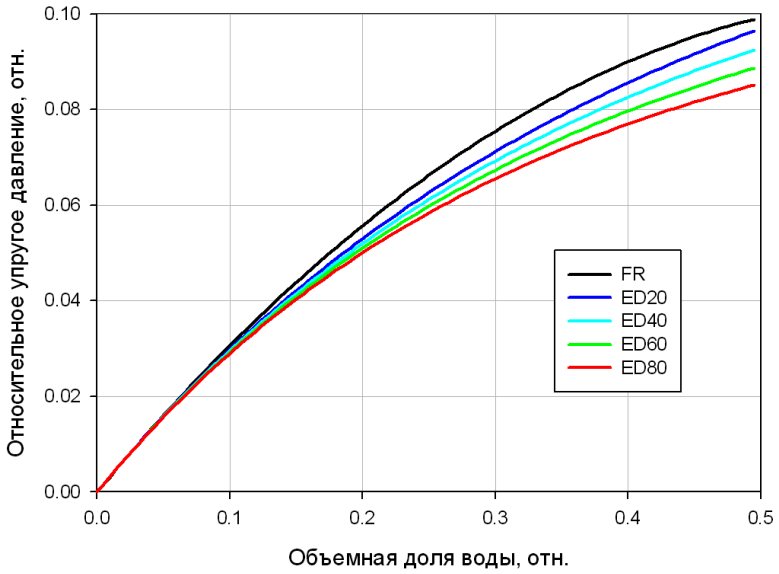


Рис. 3 – Сравнение зависимостей относительного упругого давления в ПЭ от относительной объемной фракции воды, полученных с помощью модели Flory – Rehner (61) (FR) и рассчитанных по формуле (62) для различных температур (ED20, ED40, ED60, ED80)
Fig. 3 – Comparison of the dependences of relative elastic pressure in polymer electrolyte on relative volume fraction of water received using of the Flory – Rehner model (61) (FR) and calculated by a formula (62) for various temperatures (ED20, ED40, ED60, ED80)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Для расчетов с помощью модели Flory – Rehner использовалось соотношение:

$$P_{el}/E_0 = \frac{1}{3}\left[\Phi_p^{1/3} - \Phi_p^{7/3}\right] = \frac{1}{3}\left[(1-\chi)^{1/3} - (1-\chi)^{7/3}\right]. \quad (61)$$

При расчетах с аппроксимацией использовалась формула:

$$\frac{P_{el}(\chi)}{E_0} \approx \frac{1}{3(1+\alpha)}\left[1 - e^{-(1+\alpha)\chi}\right]. \quad (62)$$

На базе анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, можно сделать следующие выводы:

1. Модель Flory – Rehner, основанная на предположении об изотропической в плоскости деформации стенок полимера в пределах 10 % точности, соответствует экспериментальным данным, полученным в работе [48] при объемной доле воды в ПЭ $\chi < 0{,}4$ ($\lambda < 22$).

2. Относительное упругое давление ПЭ слабо зависит от температуры при $\chi < 0.4$; при увеличении объемной доли воды такая зависимость может стать более существенной.

4.2. Вычисление параметров пор ПЭ

Без учета внешнего давления и при отсутствии внутренних источников газа можно получить условие равновесия:

$$P_{el} = P_{osmv} + P_l - P_{out} = P_{osmv} + P_{osms} + P_{caps}, \quad (63)$$

где P_{el} – упругое давление; P_{osmv} – объемное осмотическое давление (рассчитывается по формуле $P_{osmv} = \frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}$); P_{osms} – осмотическое давление, обусловленное наличием границы полимера (рассчитывается по формуле $P_{osms} = -\frac{RT}{F}\frac{2\sigma_0}{R_p}$); P_{caps} – капиллярное давление, обусловленное наличием раздела фаз на внешней границе полимера (рассчитывается по формуле $P_{caps} = \frac{2\gamma\cos\theta_c}{R_p}$); $P_l - P_{out} = P_{caps} + P_{osms}$ – давление жидкой воды, которое обусловлено наличием сил на поверхности ПЭ (капиллярные и электроосмотические).

Попытаемся определить зависимость конкретных размеров пор и плотности поверхностного заряда от параметров α и β, определяющих изменение морфологии ПЭ при свеллинге. Для расчетов учтём два состояния ПЭ, близких к условиям, в которых функционируют компоненты ЭЭ, содержащие полимеры:

1) ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром ($\lambda = 14$, $\chi = 0{,}318$, $\eta = 0{,}466$);

2) ПЭ в контакте с жидкой водой ($\lambda = 22$, $\chi = 0{,}423$, $\eta = 0{,}733$).

Параметр набухания η и относительный объем пор χ связаны между собой через соотношение: $\eta = \frac{\chi}{1-\chi}$.

Необходимо определить следующие параметры ПЭ в заданных условиях:

– σ – поверхностная плотность заряда в порах ПЭ;

– радиус цилиндрических пор при фиксированном значении свеллинга ПЭ.

С этой целью для двух значений концентрации воды в ПЭ в заданных условиях: $\lambda = 14$, $\chi = 0{,}318$, $\eta = 0{,}466$ и $\lambda = 22$, $\chi = 0{,}423$, $\eta = 0{,}733$, – подбирались значения поверхностной плотности заряда и радиус цилиндрических пор при фиксированном значении свеллинга ПЭ (например, при $\lambda = 14$, $\chi = 0{,}318$, $\eta = 0{,}466$). Подбор осуществлялся таким образом, чтобы выполнялось соотношение, которое получено при разработке настоящей модели без дополнительного давления газа и внешнего давления.

$$P_{el} = P_{osmv} + P_l = P_{osmv} + P_{osms} + P_{caps} = \\ = \frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{RT}{F}\frac{2\sigma_0}{R_p} + \frac{2\gamma}{R_p}\cos\theta_c. \quad (64)$$

В итоге для определения неизвестных параметров получаем систему из двух трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} E_{el}\ \chi_0 = \frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{RT}{F}\frac{2\sigma_0}{R_{p0}} + \frac{2\gamma}{R_{p0}}\cos\theta_c; \\ E_{el}\ \chi_1 = \frac{\sigma_1^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{RT}{F}\frac{2\sigma_1}{R_{p1}}, \end{cases} \quad (65)$$

где $\chi_0 = 0{,}318$, $\eta_0 = 0{,}466$ – относительный объем пор при контакте с насыщенным паром; $\chi_1 = 0{,}423$, $\eta_1 = 0{,}733$ – относительный объем пор при контакте с жидкой водой.

Везде для величин, относящихся к параметрам ПЭ, индекс «0» относится к сравнительным значениям. Величины с индексом «1» связаны со сравнительными значениями формулами:

$$\frac{R_0}{R} = \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{\beta/\alpha+\beta}, \quad \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{\alpha\beta/\alpha+\beta}. \quad (66)$$

Результаты решения системы уравнений (65) приведены на рис. 4–9 в виде зависимостей размера пор ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром R_{p0} (рис. 4 и 6) и с жидкой водой R_{p1} (рис. 5 и 7), относительной средней длины пор L/L_0 (рис. 8) от

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

параметров α и β при температурах 20 ºС и 60 ºС и плотности поверхностного заряда стенок пор σ_0 от температуры для ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром (рис. 9).

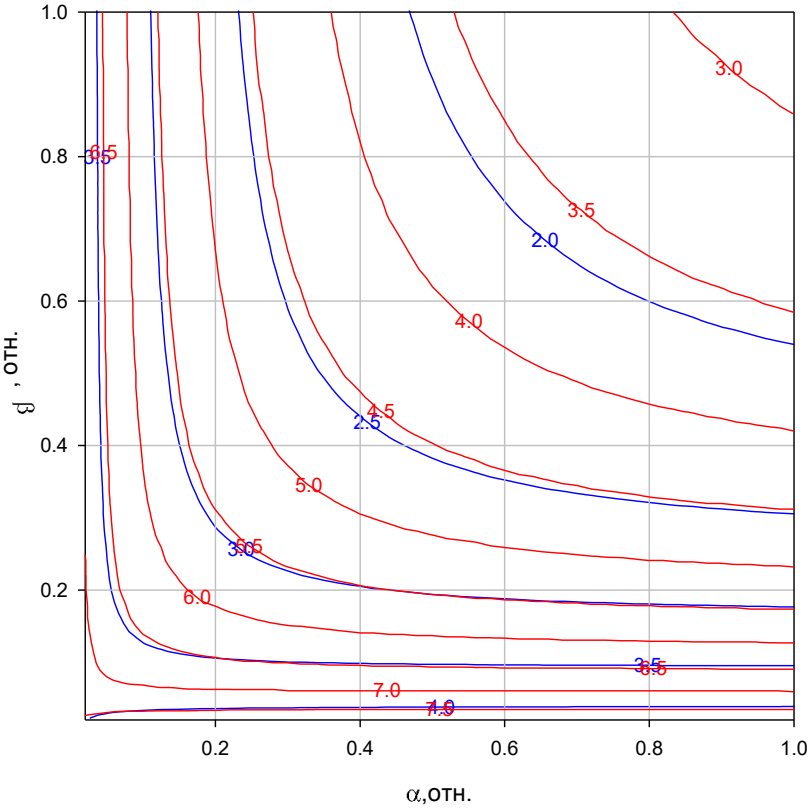


Рис. 4 – Зависимость размера пор (в нм) ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром от параметров α и β при температуре 20 °С (синие линии) и 60 °С (красные линии)
Fig. 4 – Dependence of the size of pores (in nm) of polymer electrolyte in contact with saturated water vapor on parameters α and β at a temperature of 20°C (blue lines) and 60°C (red lines)

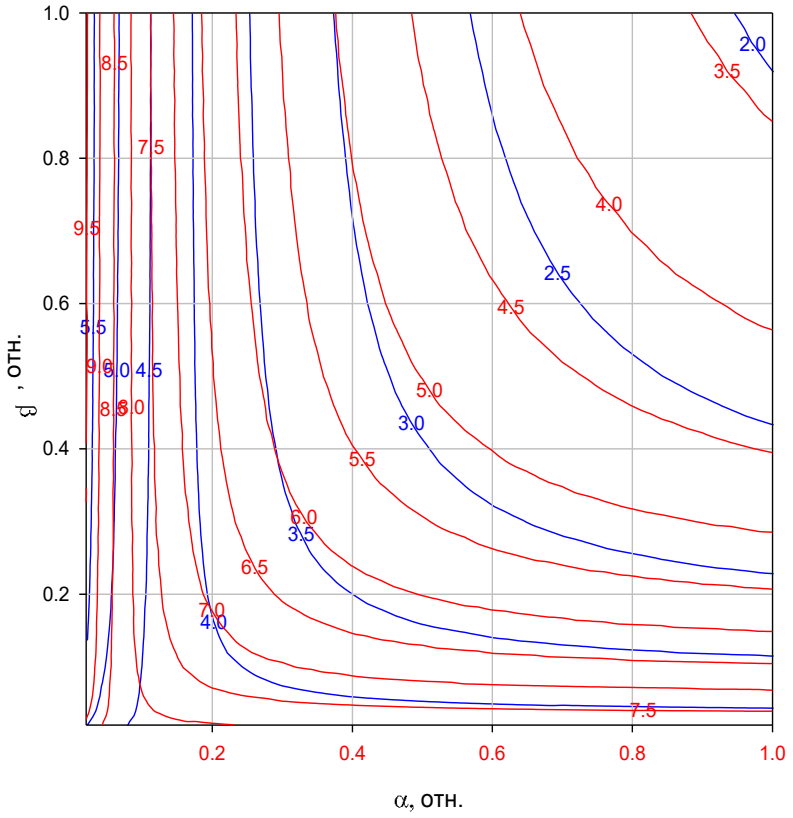


Рис. 5 – Зависимость размера пор (в нм) ПЭ в контакте с жидкой водой от параметров α и β при температуре 20 °С и 60 °С
Fig. 5 – Dependence of the size of pores (in nm) of polymer electrolyte in contact with liquid water on parameters α and β at a temperature of 20°C and 60°C

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

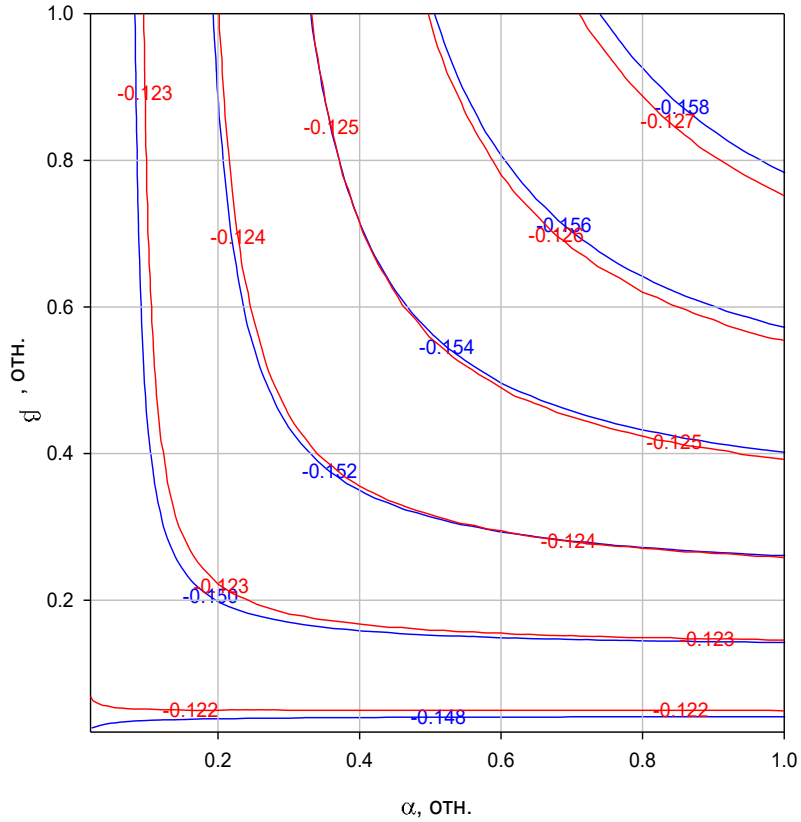


Рис. 6 – Зависимость плотности заряда на стенках пор ПЭ в контакте с насыщенным водяным паром от параметров α и β при температуре 20 °С и 60 °С
Fig. 6 – Dependence of density of a charge on walls of pores of polymer electrolyte in contact with saturated water vapor on parameters α and β at a temperature of 20°C and 60°C

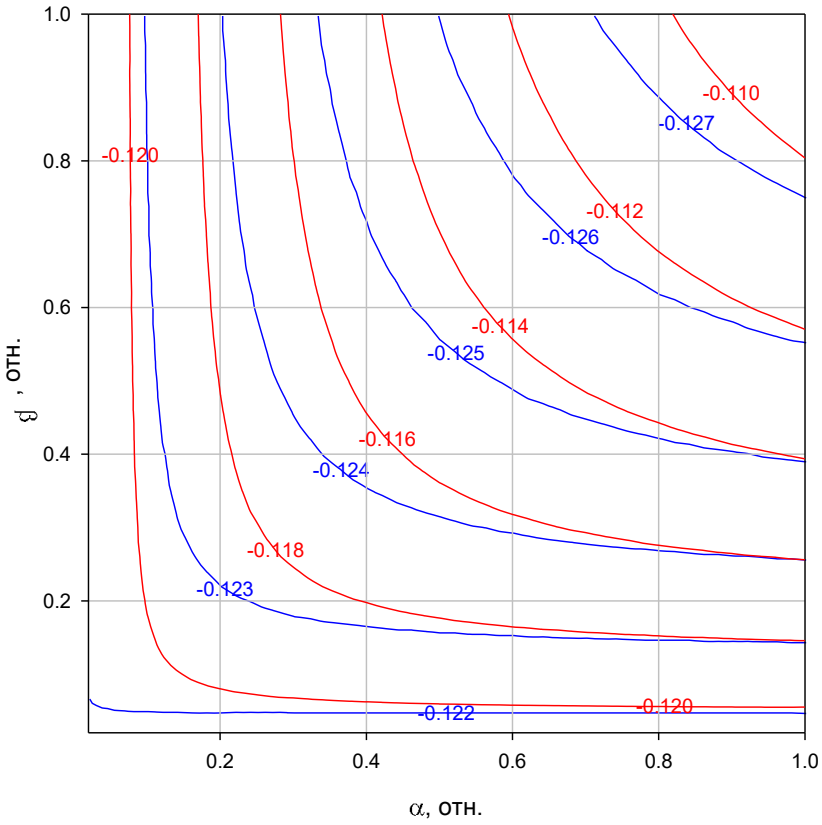


Рис. 7 – Зависимость плотности заряда на стенках пор ПЭ в контакте с жидкой водой от параметров α и β при температуре 20 °С и 60 °С
Fig. 7 – Dependence of density of a charge on walls of pores of polymer electrolyte in contact with liquid water on parameters α and β at a temperature of 20°C and 60°C

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

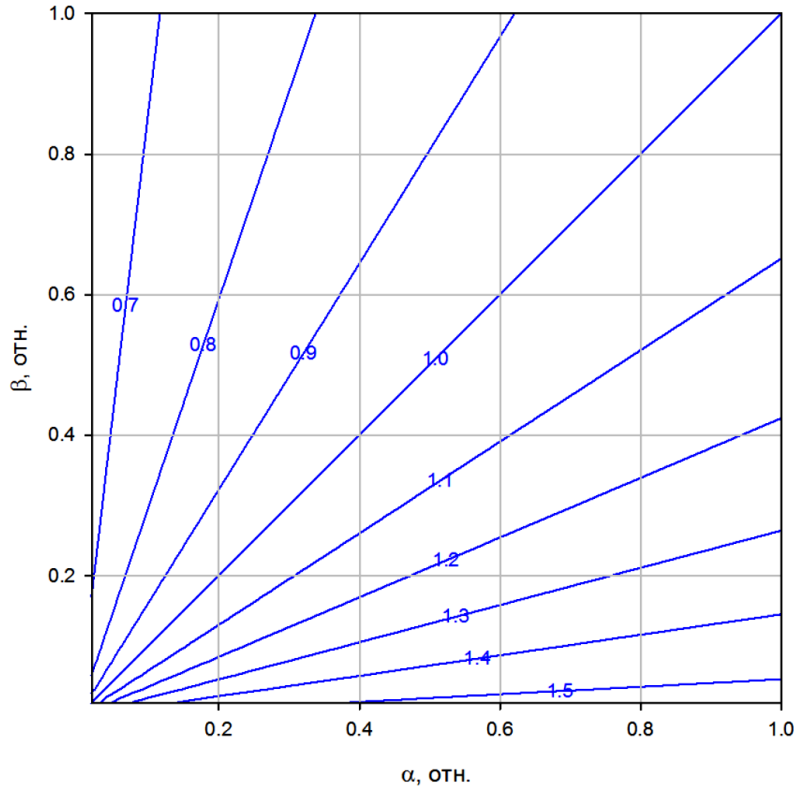


Рис. 8 – Зависимость относительной средней длины пор L/L_0 ПЭ от параметров α и β
Fig. 8 – Dependence of relative average length of pores L/L_0 of polymer electrolyte on parameters α and β

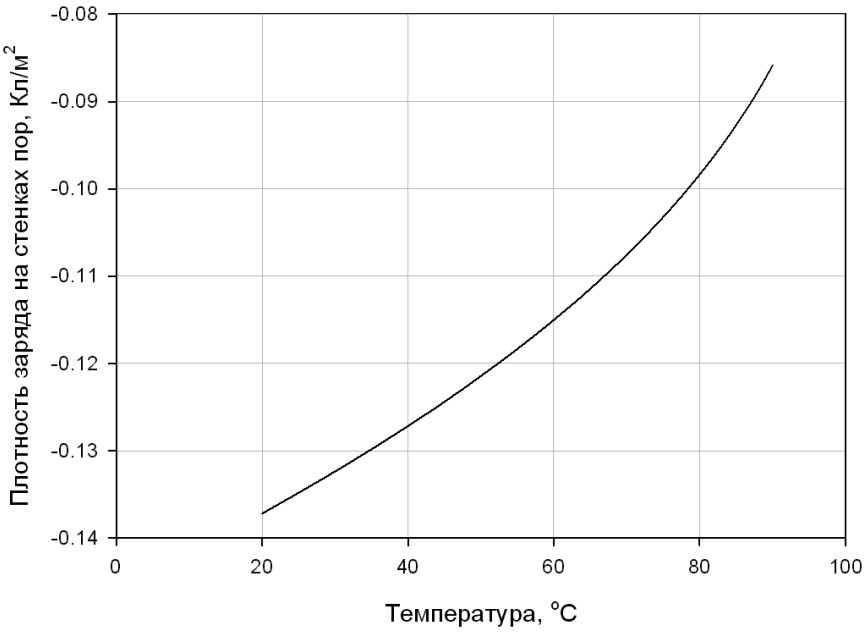


Рис. 9 – Зависимость плотности поверхностного заряда в порах электролита от температуры
Fig. 9 – Dependence of density of a surface charge in an electrolyte pores on temperature

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4–9, показал следующее:

1. В пределах $0 < \alpha < 1$ и $0 < \beta < 1$ размер пор в контакте с насыщенным водяным паром изменяется в диапазоне от 1,5 нм до 3,5 нм, в контакте с жидкой водой – в диапазоне от 3 нм до 7 нм.

2. Повышение температуры от 20 ºС до 60 ºС приводит к увеличению радиуса пор более чем в 2 раза при контакте с водой или насыщенным водяным паром. Влияние температуры объясняется существенным падением модуля Юнга при повышении температуры. При этом силы, которым противодействуют силы упругости, зависят от температуры значительно слабее. Тем не менее при повышении температуры относительный рост размера пор при переходе от контакта с насыщенным водяным паром к контакту с жидкой водой становится меньше. Это объясняется тем, что параметр свеллинга при кон-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

такте с жидкой водой практически не зависит от температуры, а параметр свеллинга при контакте с насыщенным водяным паром увеличивается с повышением температуры.

3. Плотность зарядов на стенках пор слабо зависит от значения параметров $0 < \alpha < 1$ и $0 < \beta < 1$, влияние температуры значительно сильнее. При повышении температуры с 20 ºС до 30 ºС плотность заряда падает на 30 %. Вполне вероятно, что в этом случае распределение зарядов на поверхности стенок пор размывается в сторону объема полимера.

4. Относительное значение длины каналов на единицу объема сухого полимера не зависит от температуры. Практически это значение зависит только от разности $(\alpha - \beta)$. Причем, при $\alpha > \beta$ с увеличением параметра свеллинга длина каналов увеличивается, а при $\alpha < \beta$ – длина каналов уменьшается. Следует отметить, что длина каналов оказывает определяющее влияние на коэффициенты переноса газов через ПЭ. По этой причине анализ соответствующих экспериментальных данных при различных температурах и параметрах свеллинга позволит провести выбор для значений неизвестных параметров α и β.

Для предварительного определения реальных значений параметров α и β примем во внимание 2 простых соображения:

1. Рассмотрим уравнение баланса давлений (64). При небольших увлажнениях $P_{el} \to 0$. Отношение объемной и поверхностной составляющей электроосмотического давления $\left|\frac{P_{osms}}{P_{osmv}}\right| \approx \left|\frac{RT}{F}\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma_0 R_p}\right| \approx 0{,}03$ (при $R_p = 2$ нм; $T = 300$ K; $\sigma_0 = -0{,}15$ Кл/м^2), поэтому поверхностной частью электроосмотического давления можно пренебречь. Тогда $\frac{\sigma_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{2\gamma}{R_p}\cos\theta_c \approx 0$, и с помощью соотношений (48) и (50) получим окончательно $\alpha = \frac{1}{2}$.

2. В работе авторов [63], посвященной транспорту водорода и кислорода в ПЭ, на основе анализа экспериментальных данных показано, что эффективная длина каналов не зависит от свеллинга. Отсюда следует, что в соотношении (49) $\alpha = \beta$.

Таким образом, окончательно получаем: $\alpha = \beta = \frac{1}{2}$.

Дополнительная возможность определения параметров α и β – это анализ данных морфологических измерений структуры ПЭ, сделанных при различных температурах и параметрах свеллинга.

Таким образом, вместо зависимостей (48) и (49) можно получить:

$$\frac{R_p}{R_{p0}} = \left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^{1/2}; \qquad \frac{\sigma_0}{\sigma_{00}} = \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{1/4}. \tag{67}$$

Существенным обстоятельством является экспериментально установленный факт независимости свеллинга ПЭ при контакте с водой от температуры, тогда с помощью уравнения баланса давлений в этих условиях можно получить:

$$E_{el}\ \chi_1 = \frac{\sigma_1^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{RT}{F}\frac{2\sigma_1}{R_{p1}}. \tag{68}$$

Далее, используя соотношение (68) как уравнение для определения σ_1 и зависимости упругого давления от температуры (60) и (62), можно рассчитать плотность поверхностного заряда в порах электролита как функцию температуры. Данная зависимость была представлена на рис. 9.

4.3. Характер диффузионно-конвективных потоков в каталитических слоях электролизного элемента

Нарушение равновесия проявляется в наличии градиента давления газа, что вызывает направленный в сторону наименьшего давления (на внешнюю границу) диффузионный поток газа. Кроме того, избыточное давление газа может стать причиной увеличения свеллинга ПЭ, но этого не происходит, так как увеличенный объем пор нечем заполнить мгновенно. В связи с этим избыточное давление газа в первый момент компенсируется понижением давления жидкой воды в соответствии с уравнением (65). Вместе с тем потребление воды в электрохимической реакции (анод), а также ее потребление (анод) или выделение (катод) за счет градиента электроосмотического потока определяет изменение объема пор и давления P_l. Таким образом, возникает конвективный поток воды, обусловленный наличием градиента давления жидкости P_l.

В итоге выделение газа в объеме ПЭ вызывает образование отрицательного градиента давления газа по направлению к наружной поверхности и положительного (катод) либо отрицательного (анод) градиента давления воды в том же направлении. Градиенты давления стимулируют образование диффузионно-конвективных потоков газа и воды, направленных навстречу друг другу (анодный КС) или попутных (катодный КС).

Отметим еще одно важное обстоятельство. Поскольку при выделении газа P_g растет, а P_W падает, возможна ситуация, когда непосредственно в порах ПЭ образуется газовая фаза. Для этого разность давления газа и давления жидкой воды должна превы-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

сить сумму капиллярного давления в порах и удвоенное электроосмотическое давление, связанное с межфазной границей. Другими словами, для образования газовой фазы в порах ПЭ необходимо выполнить условие:

$$2P_{osms} + P_{cap} \le P_g - P_l . \quad (69)$$

На практике образование новой фазы требует большого количества газа, поскольку объемная концентрация газа в пузырях намного выше концентрации газа в жидкой фазе (более чем на порядок), поэтому при наличии газовой фазы неравенство (66) практически является равенством. Наличие газовой фазы в порах ПЭ может существенно увеличить скорость диффузии газов.

5. Заключение

В рамках данной статьи описана разработанная теоретическая модель транспорта реагента и продуктов электрохимической реакции в электролизном элементе на основе полимерной электролитической мембраны. Модель основана на неравновесной пороэлектроэластичной теории полимерного электролита, модифицированной применительно к условиям электролиза воды, и позволяет понять механизмы физико-химических процессов в электрокаталитических слоях и мембране. Сделан вывод о необходимости использования моделей сорбции воды и свеллинга полимерного электролита. Рассмотрено базовое уравнение баланса давлений классической равновесной пороэлектроэластичной теории для полимерного электролита. На основе экспериментальных данных, доступных в открытых источниках, проанализированы свойства и особенности упругих сил в полимерном электролите, уточнены зависимости упругих сил в полимерном электролите от свеллинга и температуры. С учетом существующих экспериментальных данных по проницаемости газов в полимерном электролите и характера свеллинга полимерного электролита при контакте с жидкой водой получены параметры неравновесной пороэлектроэластичной теории применительно к условиям электролиза воды.

Модель может быть использована для проведения оптимизационных расчетов структуры и состава компонентов мембранно-электродного блока, режимов его работы и конструкции электролизных модулей с целью:

– увеличения энергетической эффективности с учетом процессов кроссовера водорода и кислорода;

– уменьшения концентрации водорода в электролизном кислороде для повышения водородной безопасности.

Особенности процессов переноса воды и неконденсирующихся газов в ПЭ в рамках разработанной модели будут рассмотрены в отдельной статье.

Благодарность

Работа проведена в ходе выполнения проекта № 16.7113.2017/6.7 в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности, а также при поддержке Департамента по науке и технологиям Южно-Африканской Республики в рамках программы HySA KP5.

Acknowledgement

This work was executed within the framework of government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the field of scientific activities (project No. 16.7113.2017/6.7) and with support of the DST of South Africa HySA KP5 Program.

Список литературы

[1] Dincer, I. Smart energy solutions with hydrogen options / I. Dincer, C. Acar // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – Iss. 18. – P. 8579–8599.

[2] Bessarabov D., Wang H., Li H., Zhao N. (Eds): PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications. CRC Press., 2015. ISBN-10: 1482252295.

[3] Doucet, G. Hydrogen-based PEM auxiliary power unit / G. Doucet [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. – Vol. 34. – Iss. 11. – P. 4983–4989.

[4] Grigor'ev, S.A. Electrolysis of Water in a System with a Solid Polymer Electrolyte at Elevated Pressure / S.A. Grigor'ev [et al.] // Russian J. of Electrochemistry. – 2001. – Vol. 37. – No 8. P. 819–822.

[5] Grigoriev, S.A. Failure of PEM water electrolysis cells: Case study involving anode dissolution and membrane thinning / Grigor'ev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39. – Iss. 35. – P. 20440–20446.

[6] Eikerling, M.H. Poroelectroelastic theory of water sorption and swelling in polymer electrolyte membranes / M.H. Eikerling, P. Berg. // Soft Matter. – 2011. – Vol. 7. – P. 5976–5990.

[7] Olivier, P. Low-temperature electrolysis system modelling: A review / P. Olivier, C. Bourasseau, Pr. Belkacem Bouamama // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. – Vol. 78. – P. 280–300.

[8] Lafmejani, S.S. VOF modelling of gase-liquid flow in PEM water electrolysis cell micro-channels / S.S. Lafmejani, A.Ch. Olesen, S.K. Kær // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol 42. – P. 16333–16344.

[9] Ojong, E.T. Development of an experimentally validated semi-empirical fully-coupled performance model of a PEM electrolysis cell with a 3-D structured porous transport layer / E.T. Ojong [et al.] // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 25831–25847.

[10] Aubras, F. Two-dimensional model of low-pressure PEM electrolyser: Two-phase flow regime, electrochemical modelling and experimental validation / F.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Aubras [et al.] // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 26203–26216.

[11] Nouri-Khorasani, A. Model of oxygen bubbles and performance impact in the porous transport layer of PEM water electrolysis cells / A. Nouri-Khorasani [et al.] // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. –P. 28665–28680.

[12] Grigoriev, S.A. Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis / S.A. Grigoriev [et al.] // Journal of Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 40. – Iss. 5. – P. 921–932.

[13] Tijani, A.S. Simulation Analysis of the Effect of Temperature and Exchange Current Density on Power and Hydrogen Production of (PEM) Electrolyzer / A.S. Tijani, M.A. Haiyoon // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 660. – P. 411–415.

[14] Nie, J. A Photoelectrochemical Model of Proton Exchange Water Electrolysis for Hydrogen Production / J. Nie [et al.] // Journal of Heat Transfer. – 2008. – Vol. 130. – P. 042409–1.

[15] Laoun, B. Electrochemical Aided Model to Study Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis / B. Laoun [et al.] // Revue des Energies Renouvelables. – 2008. – Vol. 11. – No. 2. – P. 267–276.

[16] Choia, P. A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis / P. Choia, D.G. Bessarabov, R. Datta // Solid State Ionics. – 2004. – Vol. 175. – P. 535–539.

[17] Marangio, F. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production / F. Marangio, M. Santarelli, M. Cali // International journal of hydrogen energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 1143–1158.

[18] Ni, M. Electrochemistry Modeling of Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis for Hydrogen Production / M. Ni, M.K.H. Leung, D.Y.C. Leung // WHEC 16 / 13–16 June 2006 – Lyon France.

[19] Tijani, A.S. Simulation Analysis of the Effect of Temperature and Exchange Current Density on Power and Hydrogen Production of (PEM) Electrolyzer / A.S. Tijani, M.A. Haiyoon // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 660. – P. 411–415.

[20] Laoun, B. Theoretical Investigation on Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis / B. Laoun, B. Mahmah, L. Serir // WIH2 2007 19–21 March 2007– Ghardaïa, Algérie.

[21] Zhang, H. Efficiency Calculation and Configuration Design of a PEM Electrolyzer System for Hydrogen Production / H. Zhang [et al.] // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. – Vol. 7. – P. 4143–4157.

[22] Tijani, A.S. Numerical Modeling the Effect of Operating Variables on Faraday Efficiency in PEM Electrolyzer: 3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, SysInt 2016 / A.S. Tijani, A.H. Abdol Rahim // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 26. – P. 419–427.

[23] Nieminen, J. Comparative performance analysis of PEM and solid oxide steam electrolysers / J. Nieminen, I. Dincer, G. Naterer // Int. J. Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 10842.

[24] Ay, M. Exergetic performance analysis of PEM fuel cell / M. Ay, A. Midilli, I. Dincer // Int. J. Energy Res. – 2006. – Vol. 30. – Iss. 5. – P. 307–21.

[25] Lewinski, K.A. NSTF Advances for PEM Electrolysis - the Effect of Alloying on Activity of NSTF Electrolyzer Catalysts and Performance of NSTF Based PEM Electrolyzers / K.A. Lewinski, D. van der Vliet, S.M. Luopa // ECS Trans. – 2015. – Vol. 69(17). – P. 893–917.

[26] Millet, P. Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers / P. Millet [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37. – Iss. 22. – P. 17478–17487.

[27] Bessarabov, D. (Invited) Membranes with Recombination Catalyst for Hydrogen Crossover Reduction: Water Electrolysis / D. Bessarabov // ECS Trans. – 2018. – Vol. 85. – Iss. 11. – P. 17–25.

[28] Bessarabov, D. Gas Crossover Mitigation in PEM Water Electrolysis: Hydrogen Cross-over Benchmark Study of 3M's Ir-NSTF Based Electrolysis Catalyst-Coated Membranes / D. Bessarabov [et al.] // ECS Trans. – 2016. – Vol. 75(14). – P. 1165–1173; doi:10.1149/07514.1165ecst

[29] Bessarabov, D. Gas Permeability of Proton Exchange Membranes / D. Bessarabov. – Chapter 21. in: PEM Fuel Cell Diagnostic Tools , Editor(s): Haijiang Wang, National Research Council Canada, Vancouver, Canada; Xiao-Zi Yuan, National Research Council Canada, Vancouver, Canada; Hui Li, National Research Council Canada, Vancouver, Canada, CRC Press, 2011, P. 443–473; ISBN: 9781439839195.

[30] Kundu, S. Fingerprint of automotive fuel cell cathode catalyst degradation: Pt band in PEMs / S. Kundu [et al.] // Membrane Technology. – 2009. – Vol. 10. – P. 7–10.

[31] Oberlin, R. Gas permeation through an SPE membrane during electrolysis / R. Oberlin, S. Stucki, H.J. Christen // 33rd ISE-Meeting, Lyon, France. – P 434–436.

[32] Schalenbach, M. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover / M. Schalenbach [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Vol. 38. – P. 14921–14933.

[33] Ito, H. Properties of Nafion® membranes under PEM water electrolysis conditions / H. Ito [et al.] // International journal of hydrogen energy. – 2011. – Vol. 36. – P. 10527–10540.

[34] Grigoriev, S.A. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues / S.A. Grigoriev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – Vol. 36. – Iss. 3.– P. 2721–2728.

[35] Ito, H. Cross-permeation and consumption of hydrogen during proton exchange membrane electrolysis / H. Ito [et al.] // International journal of hydrogen energy. – 2016. – Vol. 41. – P. 20439–20446.

[36] Durst, J. Hydrogen Oxidation and Evolution Reaction Kinetics on Carbon Supported Pt, Ir, Rh, and Pd

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Electrocatalysts in Acidic Media / J. Durst [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. – 2015. – Vol. 162(1). – P. F190–F203.

[37] Schalenbach, M. Gas Permeation through Nafion®. Part 1: Measurements / M. Schalenbach [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2015. – Vol. 119. – 25145−25155.

[38] Choi, P. Sorption in Proton-Exchange Membranes. An Explanation of Schroeder's Paradox / P. Choi, R. Datta // Journal of the Electrochemical Society. − 2003. – Vol. 150. – Iss. 12. – P. E601−E607

[39] Choi, P. Consideration of Thermodynamic, Transport, and Mechanical Properties in the Design of Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature Fuel Cell Operation / P. Choi [et al.] // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics. – 2006. – Vol. 44. – Iss. 16. – P. 2183–2200.

[40] Futerko, P. Thermodynamics of Water Vapor Uptake in Perfluorosulfonic Acid Membranes / P. Futerko, I-M. Hsing // Journal of the Electrochemical Society. 1999. – Vol. 146. – Iss. 6. – P. 2049–2053.

[41] Choi, P. Thermodynamics and Proton Transport in Nafion®. I. Membrane Swelling, Sorption, and Ion-Exchange Equilibrium / P. Choi, N.H. Jalani, R. Datta // Journal of the Electrochemical Society. – 2005. – Vol. 152 – Iss. 3. – P. E84–E89.

[42] Onishi, L.M. Water-Nafion® Equilibria. Absence of Schroeder's Paradox / L.M. Onishi, J.M. Prausnitz, J. Newman // J. Phys. Chem. B. – 2007. – Vol. 111. – P. 10166–10173

[43] Freger, V. Hydration of Ionomers and Schroeder's Paradox in Nafion®" / V. Freger // J. Phys. Chem. B. – 2009. – Vol. 113. – P. 24–36.

[44] Hinatsu, J.T. Water Uptake of Perfluorosulfonic Acid Membranes from Liquid Water and Water Vapor / J.T. Hinatsu, M. Mizuhata, H. Takenaka // J. Electrochem. Soc. – 1994. – Vol. 141. – No. 6. – P. 1493–1498

[45] Flory, P.J. Principles of Polymer Chemistry / P.J. Flory. – Cornell University Press, Ithaca, 1953.

[46] Jalani, N.H. TEOM: A novel technique for investigating sorption in proton-exchange membranes / N.H. Jalani, P. Choi, R. Datta // Journal of Membrane Science. – 2005. – Vol. 254. – P. 31–38.

[47] Divisek, J. Study of Capillary Porous Structure and Sorption Properties of Nafion® Proton Exchange Membranes Swollen in Water / J. Divisek [et al.] // J. Electrochem. Soc. –1998. – Vol. 145. – Iss. 8. – P. 2677–2683.

[48] Tang, Ya. An experimental investigation of humidity and temperature effects on the mechanical properties of perfluorosulfonic acid membrane / Ya. Tang [et al.] // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol. 425. – P. 297–304.

[49] Weber, A.Z. A Theoretical Study of Membrane Constraint in Polymer-Electrolyte Fuel Cells / A.Z. Weber, J. Newman // American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal. – 2004. – Vol. 50. – No. 12. – P. 3215–3226.

[50] Schroeder, P.V. Über Erstarrungs- und Quellungserscheinungen von Gelatine / P.V. Schroeder // Z. Phys. Chem. – 1903. – Vol. 45. – P. 75.

[51] Freger V. Elastic energy in microscopically phase-separated swollen polymer networks / V. Freger // Polymer. – 2002. – Vol. 43. – Iss. 1. – P. 71–76.

[52] Elfring, G.J. Thermodynamics of pore wetting and swelling in Nafion® / G.J. Elfring, H. Struchtrup // J. Membr. Sci. – 2008. – Vol. 315. – P. 125.

[53] Jalani, N.H. Optomechanical characterization of proton-exchange membrane fuel cells / N.H. Jalani [et al.] // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5532. – P. 316–325.

[54] Satterfield, M.B. Viscoelastic properties of Nafion® at elevated temperature and humidity / M.B. Satterfield, J.B. Benziger // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics. – 2008. – Vol. 47. – P. 11–24.

[55] Paddison, S. High-frequency dielectric studies of hydrated Nafion® / S. Paddison, D.W. Reagor, T.A. Zawodzinski // J. Electroanal. Chem. – 1998. – Vol. 459. – P. 91–97.

[56] Roldughina, V.I. On the Schroeder Paradox for Ion-Exchange Polymers / V.I. Roldughina, L.V. Karpenko-Jereb // Colloid Journal. – 2016. – Vol. 78. – No. 6. – P. 795–799.

[57] Berg, P. Exact solution of an electro-osmotic flow problem in a cylindrical channel of polymer electrolyte membranes / P. Berg, K.Ladipo // Proc. R. Soc. A. – 2009. – Vol. 465. – P. 2663–2679.

[58] Zawodzinski, T.A. The contact angle between water and the surface of perfluorosulphonic acid membranes / T.A. Zawodzinski [et al.] // J. Appl. Electrochem. – 1993. – Vol. 23. – P. 86–88.

[59] Gibbs, J.W. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances / J.W. Gibbs. – in Bumstead, H.A.; Van Nameeds, R.G., The Scientific Papers of J. Willard Gibbs, 1, Woodbridge, CT: Ox Bow Press, 2002. – P. 55–354.

[60] Nazarov, I. The Impact of Membrane Constraint on PEM Fuel Cell Water Management / I. Nazarov, K. Promislow // Journal of the Electrochemical Society. – 2007. – Vol. 154. – Iss. 7. – P. B623–B630.

[61] Baranov, I.E. Transfer processes in PEM fuel cell: Influence of electrode structure / I.E. Baranov [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2006. – Vol. 31. – Iss. 2. – P. 203–210.

[62] Frensch, S.H. Model-supported characterization of a PEM water electrolysis cell for the effect of compression / S.H. Frensch // Electrochimica Acta. – 2018. – Vol. 263. – P. 228–236.

[63] Калинников, А.А. Модель транспорта в полимерном электролите на основе неравновесной пороэлектроэластичной теории / А.А. Калинников, С.А.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Григорьев, Д.Г. Бессарабов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018 (в редакции).

References

[1] Dincer I., Acar C. Smart energy solutions with hydrogen options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018;43(18):8579–8599.

[2] Bessarabov D., Wang H., Li H., Zhao N. (Eds) PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications. CRC Press, 2015, 389 pages, ISBN: 978-1-4822-5229-3.

[3] Doucet G., Etiévant C., Puyenchet C., Grigoriev S., Millet P. Hydrogen-based PEM auxiliary power unit. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009;34(11):4983–4989.

[4] Grigor'ev S.A., Khaliullin M.M., Kuleshov N.V., Fateev V.N. Electrolysis of Water in a System with a Solid Polymer Electrolyte at Elevated Pressure. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2001;37(8):819–822.

[5] Grigoriev S.A., Dzhus K.A., Bessarabov D.G., Millet P. Failure of PEM water electrolysis cells: Case study involving anode dissolution and membrane thinning. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014;39(35):20440–20446.

[6] Eikerling M.H., Berg P. Poroelectroelastic theory of water sorption and swelling in polymer electrolyte membranes. *Soft Matter*, 2011;7:5976–5990.

[7] Olivier P., Bourasseau C., Bouamama Pr.B. Low-temperature electrolysis system modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;78:280–300.

[8] Lafmejani S.S., Olesen A.C., Kær S.K. VOF modelling of gas-liquid flow in PEM water electrolysis cell micro-channels. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:16333–16344.

[9] Ojong E.T., Tai Hong Kwan J., Nouri-Khorasani A., Bonakdarpour A., Wilkinson D.P., Smolinka T. Development of an experimentally validated semi-empirical fully-coupled performance model of a PEM electrolysis cell with a 3-D structured porous transport layer. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:25831–25847.

[10] Aubras F., Deseure J., Kadjo J.-J.A., Dedigama I., Majasan J., Grondin-Perez B., Chabriat J.-P., Brett D.J.L. Two-dimensional model of low-pressure PEM electrolyser: Two-phase flow regime, electrochemical modelling and experimental validation. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:26203–26216.

[11] Nouri-Khorasani A., Ojong E.O., Smolinka T., Wilkinson D.P. Model of oxygen bubbles and performance impact in the porous transport layer of PEM water electrolysis cells, International journal of hydrogen energy, 2017;42:28665–28680.

[12] Grigoriev S.A., Kalinnikov A.A., Millet P., Porembsky V.I., Fateev V.N. Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis, Journal of Applied Electrochemistry, 2010;40(5):921–932.

[13] Tijani A.S., Haiyoon M.A. Simulation Analysis of the Effect of Temperature and Exchange Current Density on Power and Hydrogen Production of (PEM) Electrolyzer. *Applied Mechanics and Materials*, 2014;660:411–415.

[14] Yitung N., Chen J., Boehm R.F., Katukota S. A Photoelectrochemical Model of Proton Exchange Water Electrolysis for Hydrogen Production. *Journal of Heat Transfer*, 2008;130:042409–1.

[15] Laoun B., Belhamel M., Naceur W., Serir L. Electrochemical Aided Model to Study Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis. *Revue des Energies Renouvelables*, 2008;11(2):267–276.

[16] Choia P., Bessarabov D.G., Datta R. A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis. *Solid State Ionics*, 2004;175:535–539.

[17] Marangio F., Santarelli M., Cali M. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 2009;3(4):1143–1158.

[18] Ni M., Leung M.K.H., Leung D.Y.C. Electrochemistry Modeling of Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis for Hydrogen Production, *WHEC* 16 / 13–16 June 2006 – Lyon France.

[19] Tijani A.S., Haiyoon M.A. Simulation Analysis of the Effect of Temperature and Exchange Current Density on Power and Hydrogen Production of (PEM) Electrolyzer. *Applied Mechanics and Materials*, 2014;660:411–415.

[20] Laoun B., Mahmah B., Serir L. Theoretical Investigation on Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis. *WIH2 2007*, 19–21 March 2007 – Ghardaïa, Algérie.

[21] Zhang H., Su S., Lin G., Chen J. Efficiency Calculation and Configuration Design of a PEM Electrolyzer System for Hydrogen Production, Int. J. Electrochem. Sci., 2012;7:4143–4157.

[22] Tijani A.S., Abdol Rahim A.H. Numerical Modeling the Effect of Operating Variables on Faraday Efficiency in PEM Electrolyzer. *3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, SysInt 2016 Procedia Technology*, 2016;26:419–427.

[23] Nieminen J., Dincer I., Naterer G. Comparative performance analysis of PEM and solid oxide steam electrolysers. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2010;35:10842.

[24] Ay M., Midilli A., Dincer I. Exergetic performance analysis of PEM fuel cell. *Int. J. Energy Res*., 2006;30(5):307–321.

[25] Lewinski K.A., Vliet D., Luopa M. NSTF Advances for PEM Electrolysis - the Effect of Alloying on Activity of NSTF Electrolyzer Catalysts and Performance of NSTF Based PEM Electrolyzers. *ECS Trans*., 2015;69(17):893–917.

[26] Millet P., Ranjbari A., de Guglielmo F., Grigoriev S.A., Auprêtre F. Cell failure mechanisms in

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

PEM water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012;37(22)17478–17487.

[27] Bessarabov D. (Invited) Membranes with Recombination Catalyst for Hydrogen Crossover Reduction: Water Electrolysis. *ECS Trans*., 2018;85(11)17–25.

[28] Bessarabov D., Kruger A., Luopa S.M., Park J., Molnar A.A., Lewinski K.A. Gas Crossover Mitigation in PEM Water Electrolysis: Hydrogen Cross-over Benchmark Study of 3M's Ir-NSTF Based Electrolysis Catalyst-Coated Membranes. *ECS Trans*., 2016;75(14)1165–1173.

[29] Bessarabov D. Gas Permeability of Proton Exchange Membranes, Chapter 21, in: PEM Fuel Cell Diagnostic Tools, Editor(s): Wang H., National Research Council Canada, Vancouver, Canada; Yuan X.-Z., National Research Council Canada, Vancouver, Canada; Li H., National Research Council Canada, Vancouver, Canada, CRC Press, 2011, 443–473, ISBN: 9781439839195, Pages: 443–473.

[30] Kundu S., Cimenti M., Lee S., Bessarabov, D. Fingerprint of automotive fuel cell cathode catalyst degradation: Pt band in PEMs. *Membrane Technology*, 2009(10):7–10.

[31] R. Oberlin, S. Stucki and H. J. Christen, Gas permeation through an SPE membrane during electrolysis. 33rd ISE-Meeting, Lyon, France; p. 434–436.

[32] Schalenbach M., Carmo M., Fritz D.L., Mergel J., Stolten D. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013;38:14921–14933.

[33] Ito H., Maeda T., Nakano A., Takenaka H. Properties of Nafion® membranes under PEM water electrolysis conditions. *International journal of hydrogen energy*, 2011;36:10527–10540.

[34] Grigoriev S.A., Porembskiy V.I., Korobtsev S.V., Fateev V.N., Aupretre F., Millet P. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011;36(3)2721–2728.

[35] Ito H., Miyazaki N., Ishida M., Nakano A. Cross-permeation and consumption of hydrogen during proton exchange membrane electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016;41:20439–20446.

[36] Durst J., Simon C., Hasche F., Gasteiger H.A. Hydrogen Oxidation and Evolution Reaction Kinetics on Carbon Supported Pt, Ir, Rh, and Pd Electrocatalysts in Acidic Media. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015;162(1):F190–F203.

[37] Schalenbach M., Hoefner T., Paciok P., Carmo M., Lueke W., Stolten D. Gas Permeation through Nafion®. Part 1: Measurements. *J. Phys. Chem. C*, 2015;119:25145−25155.

[38] Choi P., Datta R. Sorption in Proton-Exchange Membranes. An Explanation of Schroeder's Paradox, Journal of the Electrochemical Society, 2003;150(12):E601–E607.

[39] Choi P., Jalani N.H, Thampan T., Datta R. Consideration of Thermodynamic, Transport, and Mechanical Properties in the Design of Polymer Electrolyte Membranes for Higher Temperature Fuel Cell Operation. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2006;44(16):2183–2200.

[40] Futerko P., Hsing I-M. Thermodynamics of Water Vapor Uptake in Perfluorosulfonic Acid Membranes. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999;146(6):2049–2053.

[41] Choi P., Jalani N.H., Datta R. Thermodynamics and Proton Transport in Nafion®. I. Membrane Swelling, Sorption, and Ion-Exchange Equilibrium. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005;152(3):E84–E89.

[42] Onishi L.M., Prausnitz J.M., Newman J. Water-Nafion® Equilibria. Absence of Schroeder's Paradox. *J. Phys. Chem. B*, 2007;111:10166–10173.

[43] Freger V. Hydration of Ionomers and Schroeder's Paradox in Nafion®. *J. Phys. Chem. B*, 2009;113:24–36.

[44] Hinatsu J.T., Mizuhata M., Takenaka H. Water Uptake of Perfluorosulfonic Acid Membranes from Liquid Water and Water Vapor. *J. Electrochem. Soc*., 1994;141(6):1493–1498.

[45] Flory. P.J. Principles of Polymer Chemistry. Cornell University Press, Ithaca, 1953.

[46] Jalani N.H., Choi P., Datta R. TEOM: A novel technique for investigating sorption in proton-exchange membranes. *Journal of Membrane Science*, 2005;254:31–38.

[47] Divisek J., Eikerling M., Mazin V., Schmitz H., Stimming U., Volfkovich Yu. M. Study of Capillary Porous Structure and Sorption Properties of Nafion® Proton Exchange Membranes Swollen in Water. *J. Electrochem. Soc*., 1998;145(8):2677–2683.

[48] Tang Y., Karlsson A.M., Santare M.H., Gilbert M., Cleghorn S., Johnson W.B. An experimental investigation of humidity and temperature effects on the mechanical properties of perfluorosulfonic acid membrane. *Materials Science and Engineering A*, 2006;425:297–304.

[49] Weber A.Z., Newman J. A Theoretical Study of Membrane Constraint in Polymer-Electrolyte Fuel Cells. *American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal*, 2004;50(12):3215–3226.

[50] Schroeder P.V. Über Erstarrungs- und Quellungserscheinungen von Gelatine. *Z. Phys. Chem*., 1903;45:75–117.

[51] Freger V. Elastic energy in microscopically phase-separated swollen polymer networks. *Polymer*, 2002;43(1):71–76.

[52] Elfring G.J., Struchtrup H. Thermodynamics of pore wetting and swelling in Nafion®. *J. Membr. Sci*., 2008;315(1–2):125–132.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

[53] Jalani N.H., Mizar S.P., Choi P., Furlong C., Datta R. Optomechanical characterization of proton-exchange membrane fuel cells. *Proc. SPIE*, 2004; 5532:316–325.

[54] Satterfield M.B., Benziger, J.B. Viscoelastic properties of Nafion® at elevated temperature and humidity. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2008;47:11–24.

[55] Paddison S., Reagor D.W., Zawodzinski T.A. High-frequency dielectric studies of hydrated Nafion®. *J. Electroanal. Chem*., 1998;459:91–97.

[56] Roldughina V.I., Karpenko-Jereb L.V. On the Schroeder Paradox for Ion-Exchange Polymers. *Colloid Journal*, 2016;78(6):795–799.

[57] Berg P., Kehinde Ladipo Exact solution of an electro-osmotic flow problem in a cylindrical channel of polymer electrolyte membranes. *Proc. R. Soc. A*, 2009;465:2663–2679.

[58] Zawodzinski T.A., Gottesfeld S., Shoichet S., McCarthy T.J. The contact angle between water and the surface of perfluorosulphonic acid membranes. *J. Appl. Electrochem*., 1993;23:86–88.

[59] Gibbs J.W. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances, in Bumstead, H.A.; Van Nameeds, R.G.,The Scientific Papers of J. Willard Gibbs, 1, Woodbridge, CT: Ox Bow Press, 2002; p. 55–354.

[60] Nazarov I., Promislow K. The Impact of Membrane Constraint on PEM Fuel Cell Water Management. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007;154(7):B623–B630.

[61] Baranov I.E., Grigoriev S.A., Ylitalo D., Fateev V.N., Nikolaev I.I. Transfer processes in PEM fuel cell: Influence of electrode structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006;31(2):203–210.

[62] Frensch S.H., Olesen A.C., Araya S.S., Kær S.K. Model-supported characterization of a PEM water electrolysis cell for the effect of compression. *ElectrochimicaActa*, 2018;263:228–236.

[63] Kalinnikov A.A., Grigoriev S.A., Bessarabov D.G. Model of transport in a polymer electrolyte on the basis of a nonequilibrium poroelectroelastic theory (Model transporta v polimernom elektrolite na osnove neravnovesnoi poroelektroelastichnoi teorii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018, in print (in Russ.).

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Пятая конференция

«ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ» (ТЖМТ – 2018)

08–10 октября 2018 г.

г. Обнинск, Калужской обл.,
Российская Федерация

Организатор:
Акционерное общество
Государственный научный центр
Российской Федерации –
Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ВКЛЮЧАЕТ ОБСУЖДЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ВОПРОСОВ:

- Состояние и перспективы развития реакторов с теплоносителями свинец-висмут и свинец. Концепции инновационных быстрых реакторов с ТЖМТ.
- Ускорительно-управляемые системы с использованием ТЖМТ.
- Результаты НИОКР (технология теплоносителя, коррозия конструкционных материалов, тепломассоперенос и др.) по обоснованию использования ТЖМТ в ядерных технологиях.
- Обращение с ОЯТ ядерных установок с ТЖМТ.
- Использование ТЖМТ в смежных отраслях экономики.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ
г. Обнинск Калужской области, Пионерский проезд, 23
санаторий-профилакторий АО ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского.

www.ippe.ru/liquid-coolant-technologies-seminar

[53] Jalani N.H., Mizar S.P., Choi P., Furlong C., Datta R. Optomechanical characterization of proton-exchange membrane fuel cells. *Proc. SPIE*, 2004; 5532:316–325.

[54] Satterfield M.B., Benziger, J.B. Viscoelastic properties of Nafion® at elevated temperature and humidity. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2008;47:11–24.

[55] Paddison S., Reagor D.W., Zawodzinski T.A. High-frequency dielectric studies of hydrated Nafion®. *J. Electroanal. Chem*., 1998;459:91–97.

[56] Roldughina V.I., Karpenko-Jereb L.V. On the Schroeder Paradox for Ion-Exchange Polymers. *Colloid Journal*, 2016;78(6):795–799.

[57] Berg P., Kehinde Ladipo Exact solution of an electro-osmotic flow problem in a cylindrical channel of polymer electrolyte membranes. *Proc. R. Soc. A*, 2009;465:2663–2679.

[58] Zawodzinski T.A., Gottesfeld S., Shoichet S., McCarthy T.J. The contact angle between water and the surface of perfluorosulphonic acid membranes. *J. Appl. Electrochem*., 1993;23:86–88.

[59] Gibbs J.W. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances, in Bumstead, H.A.; Van Nameeds, R.G.,The Scientific Papers of J. Willard Gibbs, 1, Woodbridge, CT: Ox Bow Press, 2002; p. 55–354.

[60] Nazarov I., Promislow K. The Impact of Membrane Constraint on PEM Fuel Cell Water Management. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007;154(7):B623–B630.

[61] Baranov I.E., Grigoriev S.A., Ylitalo D., Fateev V.N., Nikolaev I.I. Transfer processes in PEM fuel cell: Influence of electrode structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006;31(2):203–210.

[62] Frensch S.H., Olesen A.C., Araya S.S., Kær S.K. Model-supported characterization of a PEM water electrolysis cell for the effect of compression. *ElectrochimicaActa*, 2018;263:228–236.

[63] Kalinnikov A.A., Grigoriev S.A., Bessarabov D.G. Model of transport in a polymer electrolyte on the basis of a nonequilibrium poroelectroelastic theory (Model transporta v polimernom elektrolite na osnove neravnovesnoi poroelektroelastichnoi teorii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018, in print (in Russ.).

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Пятая конференция

«ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ» (ТЖМТ – 2018)

08–10 октября 2018 г.

г. Обнинск, Калужской обл.,
Российская Федерация

Организатор:
Акционерное общество
Государственный научный центр
Российской Федерации –
Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ВКЛЮЧАЕТ ОБСУЖДЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ВОПРОСОВ:

- Состояние и перспективы развития реакторов с теплоносителями свинец-висмут и свинец. Концепции инновационных быстрых реакторов с ТЖМТ.
- Ускорительно-управляемые системы с использованием ТЖМТ.
- Результаты НИОКР (технология теплоносителя, коррозия конструкционных материалов, тепломассоперенос и др.) по обоснованию использования ТЖМТ в ядерных технологиях.
- Обращение с ОЯТ ядерных установок с ТЖМТ.
- Использование ТЖМТ в смежных отраслях экономики.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ
г. Обнинск Калужской области, Пионерский проезд, 23
санаторий-профилакторий АО ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского.

www.ippe.ru/liquid-coolant-technologies-seminar

Статья поступила в редакцию 01.06.17. Ред. рег. № 2595 The article has entered in publishing office 01.06.17. Ed. reg. No. 2595

УДК 66.098:546.11

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ H_2S В ГЛУБИННЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ*

А.Н. Мидилли[1]*, М. Ай[1], А. Кейл[2], Т.Н. Везироглу[2]

[1]Отдел энергетики, кафедра машиностроения Университета Нигде
г. Нигде, 51200, Турция
тел.: +90 (388) 225-22-55, факс: +90 (388) 225-01-12; e-mail: midilli@nigde.edu.tr
[2]Институт чистой энергии, Университет Майями
Корал-Гейблс, Флорида, 33124, США
mrt_ay@yahoo.com, veziroglu@unido-ichet.org

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.113-121

Заключение совета рецензентов: 28.06.17 Заключение совета экспертов: 12.10.17 Принято к публикации: 21.12.17

В данной работе проведено параметрическое исследование для оценки потенциала водородной энергетики в зависимости от количества H_2S в глубинных водах Черного моря. Необходимые данные по H_2S в глубинных водах Черного моря взяты из литературы. В данном исследовании учитывалась концентрация H_2S и глубина водного слоя, при этом КПД преобразования предполагалось равным 100 процентам. Следовательно, общий потенциал водородной энергетики оценивался примерно в 270 млн тонн, произведенных из 4,587 млрд тонн H_2S в глубинных водах Черного моря. С таким количеством водорода можно будет произвести 38,3 млн ТДж тепловой энергии, или 8,97 млн ГВтч электроэнергии. Кроме того, установлено, что суммарный водородный потенциал глубинных вод Черного моря равен почти 808 млн тонн бензина, или 766 млн тонн ПГ (природного газа), или 841 млн тонн дизельного топлива, или 851 млн тонн нефти. Эти величины показывают, что водородный потенциал сероводорода в глубинных водах Черного моря будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона. Таким образом, можно сказать, что энергетический запас водорода в Черном море является важным кандидатом для будущих водородных энергетических систем.

Ключевые слова: водород; сероводород; глубинные воды Черного моря; возобновляемые источники энергии.

A PARAMETRIC INVESTIGATION OF HYDROGEN ENERGY POTENTIAL BASED ON H_2S IN BLACK SEA DEEP WATERS

Adnan Midilli[1]*, Murat Ay[1], Ayfer Kale[2], T. Nejat Veziroglu[2]

[1]Energy Division, Mechanical Engineering Department Nigde University
Nigde, 51200,Turkey
tel.: +90 388 2252255, fax: +90 388 2250112; e-mail: midilli@nigde.edu.tr
[2]Clean Energy Research Institute, Miami University,
Coral Gables, Miami, FL 33124, USA
e-mail: mrt_ay@yahoo.com, veziroglu@unido-ichet.org

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.113-121

Referred 28 June 2017 Received in revised form 12 October 2017 Accepted 21 December 2017

**Мидилли А.Н., Ай М., Кейл А., Везироглу Т.Н.* Параметрическое исследование потенциала водородной энергетики на основе H_2S в глубинных водах Черного моря // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):113-121.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2007;32:117-124. ©2006 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

In this study, a parametric investigation is carried out to estimate the hydrogen energy potential depending on the quantities of H_2S in Black Sea deep waters. The required data for H_2S in Black Sea deep waters are taken from the literature. For this investigation, the H_2S concentration and water layer depth are taken into account, and 100% of conversion efficiency is assumed. Consequently, it is estimated that total hydrogen energy potential is approximately 270 million tons produced from 4.587 billion tons of H_2S in Black Sea deep waters. Using this amount of hydrogen, it will be possible to produce 38.3 million TJ of thermal energy or 8.97 million GWh of electricity energy. Moreover, it is determined that total hydrogen potential in Black Sea deep waters is almost equal to 808 million tons of gasoline or 766 million tons of NG (natural gas) or 841 million tons of fuel oil or 851 million tons of natural petroleum. These values show that the hydrogen potential from hydrogen sulphur in Black Sea deep water will play an important role to supply energy demands of the regional countries. Thus, it can be said that hydrogen energy reserve in Black Sea is an important candidate for the future hydrogen energy systems.

Keywords: hydrogen; hydrogen sulphur; Black Sea deep waters; renewable energy.

Турхан Н. Везироглу
T.N. Veziroglu

Сведения об авторе: д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

Образование: Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

Награды: лауреат нескольких международных наград.

Опыт работы: профессор, заведующий кафедрой технического факультета в университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергии (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.). почетный профессор университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время). Почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).

Область научных интересов: неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

Публикации: более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохранит Землю».

Information about the author: Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, a member of 18 scientific organizations.

Education: the City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, advanced studies in engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

Awards: recipient of several international awards.

Experience: University of Miami, Engineering faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, Fl, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).

Research interests: two-phase flow instabilities; interstitial heat transfer; solar energy; global warming; environmental problems; renewable energy sources and hydrogen energy system.

Publications: more than 350, editor of 160 books and proceedings, co-author of the book "Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth".

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

Энергия является ключевым фактором в обсуждении экономических, социальных и экологических аспектов устойчивого развития [1]. Увеличение потребления энергии в стране оказывает положительное влияние как на экономическое, так и социальное развитие, кроме того, поставка и использование доступного и чистого топлива особенно значимо для «чистого» мира, поскольку энергия играет жизненно важную роль в промышленном и технологическом развитии всего мира [2]. По всему миру потребность в энергии возрастает в связи с увеличением численности населения Земли, техническим развитием и повышением уровня жизни. Другой тип энергии – это энергия, базирующаяся на ископаемом топливе, которое, как правило, включает уголь, нефть, природный газ (ПГ) и др. Как известно, ископаемые источники энергии не возобновляются.

Для того чтобы объяснить и выяснить потребности в водородной энергетике и технологиях для снабжения экологически чистой энергией и прогресса, сначала необходимо представить основные негативные последствия использования ископаемых видов топлива. Ископаемые виды топлива, которые в течение длительного времени широко применялись в промышленности и быту, создают следующие проблемы:

• дефицит энергии, дефицит ископаемого топлива, спрос на энергию и т.д;

• технологические разработки на основе ископаемых ресурсов;

• загрязнение окружающей среды: воздуха, водных ресурсов, моря; загрязнение пищевых продуктов; энергетическое загрязнение; вибрационное и шумовое загрязнение; загрязнение твердыми отходами; качество окружающего воздуха и т.д.;

• кислотные дожди, истощение озонового слоя, глобальное изменение климата (глобальное потепление) и т.д.;

• рост населения земли, переезды, миграция и т.д.;

• крупные экологические катастрофы, ликвидация твердых отходов, радиация и радиоактивность, землепользование и размещение объектов воздействия и т.д.;

• засуха, бедность, здоровье и болезни, питание и голод, снижение уровня жизни и т.д.;

• локальные, региональные и глобальные конфликты и войны.

Эти проблемы являются серьёзными последствиями для мира и живых существ, и особенно тревожными для будущего мира. Для того чтобы частично уменьшить или полностью устранить проблемы, следует рассмотреть возможность практического применения нового источника энергии, который является чистым и широко распространенным по всему миру. Основная задача исследователей, ученых и экспертов в области энергетики заключается в изучении эффективных практически неисчерпаемых источников чистой энергии и технологий для чистого мира. Соответственно, исследования альтернативных источников и технологий чистой энергии станут важны, особенно для будущей мировой стабильности. Существенным свойством альтернативных источников энергии является их экологическая совместимость. Согласно данной характеристике, водород, вероятно, станет одним из наиболее привлекательных энергоносителей в ближайшем будущем. Как известно, водород является превосходным энергоносителем и его можно получить из любого источника, используя солнечную энергию, гидроэлектроэнергию, энергетическое сырьё из биомассы, энергию ветра, геотермальную энергию, соединения бора и т.д. Другим важным источником водорода является сероводород, который в изобилии содержится в глубинных водах Черного моря. Черное море – это бассейн эллиптической формы площадью 423 000 км^2. Средняя глубина составляет 1 263 м, общий объем – предположительно 534 000 км^3 [3]. Черное море уникально, потому что 90 % морской воды являются анаэробными. Эта анаэробная морская вода содержит сероводород, который производят сероредуцирующие бактерии. Граница между анаэробной и аэробной морской водой лежит на глубине около 140 м вдоль оси Черного моря и около 250 м по краям. Содержание сероводорода постепенно увеличивается с глубиной до концентрации 8 мл/л морской воды на глубине в 1 000 м, далее незначительно увеличивается до 8,5 мл/л морской воды на глубине в 2 000 м. В районе дна содержание сероводорода достигает 13,5 мл/л морской воды [3]. В связи с этим сероводород Черного моря может стать будущей энергетической системой.

Для оценки потенциала сероводорода Черного моря проводится множество исследований [4–11], а для оценки потенциала водорода в глубинных водах Черного моря ведется ограниченная работа. Например, Петров [3] исследовал Черное море и водородную энергетику. Мидилли и др. [12, 13], Байкара и др. [14] и Туре [15] провели теоретические исследования потенциала водородной энергетики глубинных вод Черного моря.

В отличие от вышеприведенных исследований, в данной работе предпринята попытка параметрически изучить потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря на основе сероводорода и обсудить важность потенциала водородной энергетики для стран региона. Если водород будет производиться из глубинных вод Черного моря, то энергетические потребности стран черноморского побережья могут быть удовлетворены, и водород можно будет экспортировать в европейские страны.

2. Потенциал водородной энергетики Черного моря

Общеизвестно, что Черное море является крупнейшим аноксигенным бассейном в мире, а общий сульфидный бассейн современного Черного моря составляет около 4 600 Тг, причем основная часть находится между 500 м и 2 000 м. Пространственное распределение кислородно-бескислородного перехода в море характеризуется наличием двух куполообразных структур, расположенных в восточной и западной центральной частях бассейна между 90 м и 100 м.

Производство сероводорода в толще воды Черного моря является основным источником сульфида, а бескислородные донные отложения вносят лишь незначительный вклад в слой воды с H_2S [7].

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

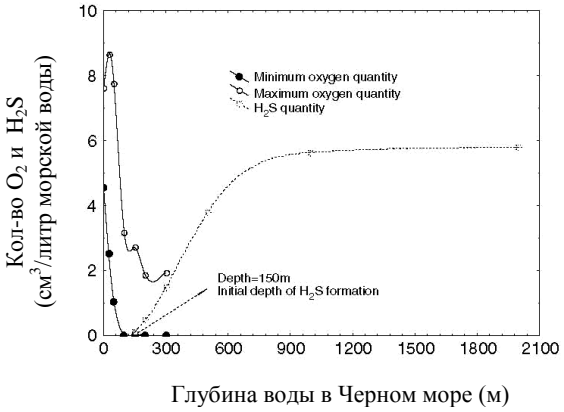


Рис. 1 – Изменение количества кислорода и сероводорода с глубиной Черного моря [16]
Fig. 1 – Variation of oxygen and hydrogen sulphur quantities with depth of Black Sea [16]

На рис. 1 представлены изменения количества кислорода и сероводорода в зависимости от глубины Черного моря по литературным данным [16].

Как показано на рис. 1, притом что количество кислорода в поверхностных водах Черного моря составляет $5 \div 6$ $см^3$/л морской воды, оно достигает максимального значения (8,64 $см^3$/л морской воды) на $20 \div 30$ м глубины. Однако количество кислорода на $125 \div 150$ м глубины почти равно нулю. Ниже глубины в $125 \div 150$ м черноморская вода содержит сероводород, а количество сероводорода достигает максимального значения (5,796 $см^3$/л морской воды на 2 000 м) около дна Черного моря из-за неорганического бактериального разложения. Согласно такому объяснению, в будущем черноморская вода, содержащая сероводород, могла бы использоваться в качестве источника энергии для производства водорода.

Таким образом, распределение сероводорода в Черном море [17] можно проиллюстрировать рис. 2.

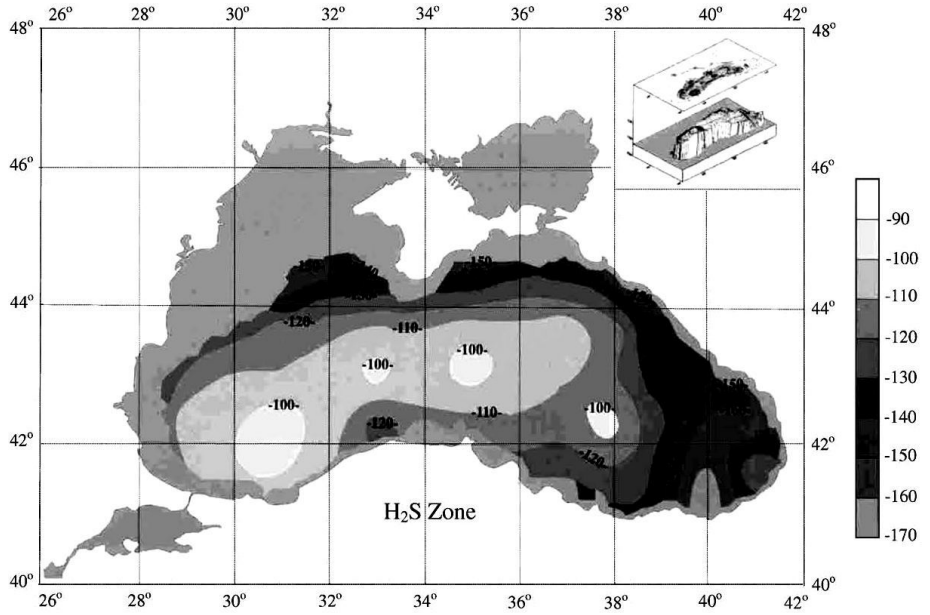


Рис. 2 – Распределение сероводорода в Черном море [17]
Fig. 2 – Hydrogen sulphur distribution in Black Sea [17]

Как показано на рис. 2, можно добраться до сероводорода в центральных областях Черного моря ниже глубины 100 м. В прибрежных районах Черного моря это можно сделать на глубине $125 \div 150$ м. Эти значения показывают, что производство водорода из H_2S можно осуществлять посредством подходящих для производства водорода платформ как в срединной, так и в прибрежной части Черного моря. Так, производство водорода из H_2S в срединной части Черного моря снизит затраты на производство водорода и добычу H_2S из глубинных вод Черного моря благодаря легкодоступному H_2S.

Концентрация сероводорода должна быть известна для определения водородного потенциала в зависимости от глубины и потенциала сероводорода в глубинных водах Черного моря. Обзор литературы показал, что некоторые данные, включающие количество сероводорода, представлены с учетом зависимости от глубины Черного моря. Например, Неретин и др. [9] определили концентрацию сероводорода в слое воды между 100 м и 2 000 м глубины Черного моря с помощью метода моделирования.

Кроме того, Димитров и др. [18] вычислили концентрацию сероводорода на $150 \div 2\,000$ м глубины Черного моря. Эти данные в литературе играют важную роль для оценки водородного потенциала H_2S в глубинных водах Черного моря. С помощью этих данных [9, 18] были получены следующие варианты.

На рис. 3 видно, что концентрация H_2S растёт с увеличением глубины Черного моря. По литературным

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

данным [9], представляющим исследования аноксигенной зоны Черного моря, максимальная концентрация H_2S составляет приблизительно 13,798 мг H_2S/л морской воды на глубине 2 000 м в аноксигенной зоне Черного моря. Однако, по данным [18], которые представляют собой региональные исследования, концентрация H_2S составляет приблизительно 9,6 мг H_2S/л морской воды на той же глубине.

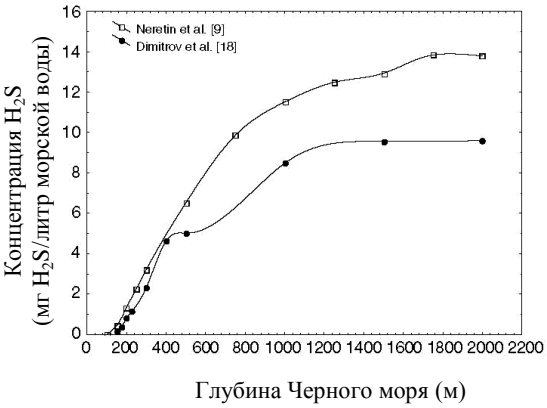


Рис. 3 – Изменение концентрации H_2S в зависимости от глубины Черного моря (по литературным данным [9])
Fig. 3 – Variation of H_2S concentration as a function of water depth in Black Sea (based on literature data [9])

Это означает, что концентрация H_2S в глубинных водах Черного моря может отличаться в зависимости от регионов Черного моря и не является однородной в различных водных слоях Черного моря. Полезные данные для оценки потенциала H_2S в слоях морской воды на основе глубины, которые были представлены Неретиным и др. [9], можно также использовать для определения водородного потенциала в различных слоях вод Черного моря. В табл. 1 и на рис. 4 указан потенциал H_2S в водных слоях в зависимости от глубины Черного моря

Таблица 1
Ресурсы H_2S в водных слоях Черного моря [9]
Table 1
H_2S potential in Black Sea water layers [9]

Слой (м)	Σ H_2S (μмоль/л)	Σ H_2S (моль/м^2)
100–200	21[a]	2,0
200–300	66	6,5
300–500	140	28,1
500–1 000	274	132,1
1 000–1 500	339	159,1
1 500–2 000	368	150,7
2 000–2 200	368[b]	40,7
Всего		519,2

[a] 150–200 м.
[b] 1500–2000 м.

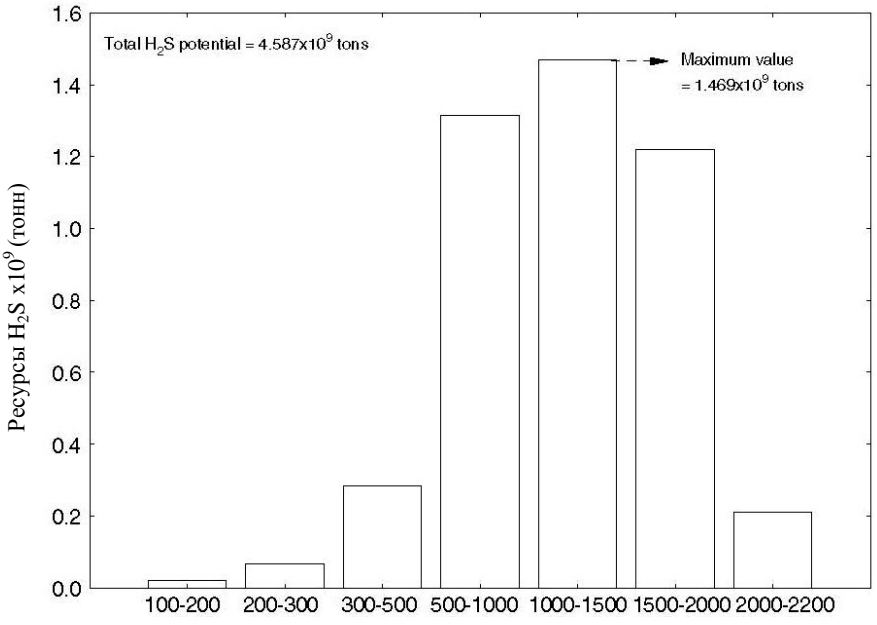


Рис. 4 – Изменение ресурсов H_2S в зависимости от глубины водного слоя Черного моря [9]
Fig. 4 – Variation of H_2S potential as a function of depth of water layer in Black Sea [9]

Согласно табл. 1, максимальный потенциал сероводорода на единицу площади составляет 159,1 моль/м^2 между 1 000 м и 1 500 м. Согласно рис. 4, в том же слое максимальный потенциал сероводорода равен 1 469 млн тонн. Эти величины показывают, что производить водород из H_2S было бы возможно в водных слоях от 100 м до 2 000 м, применяя соответствующую технику и технологии производства.

Учитывая изложенное выше, взаимосвязь между H_2S и водородом можно проиллюстрировать с помощью рис. 5.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

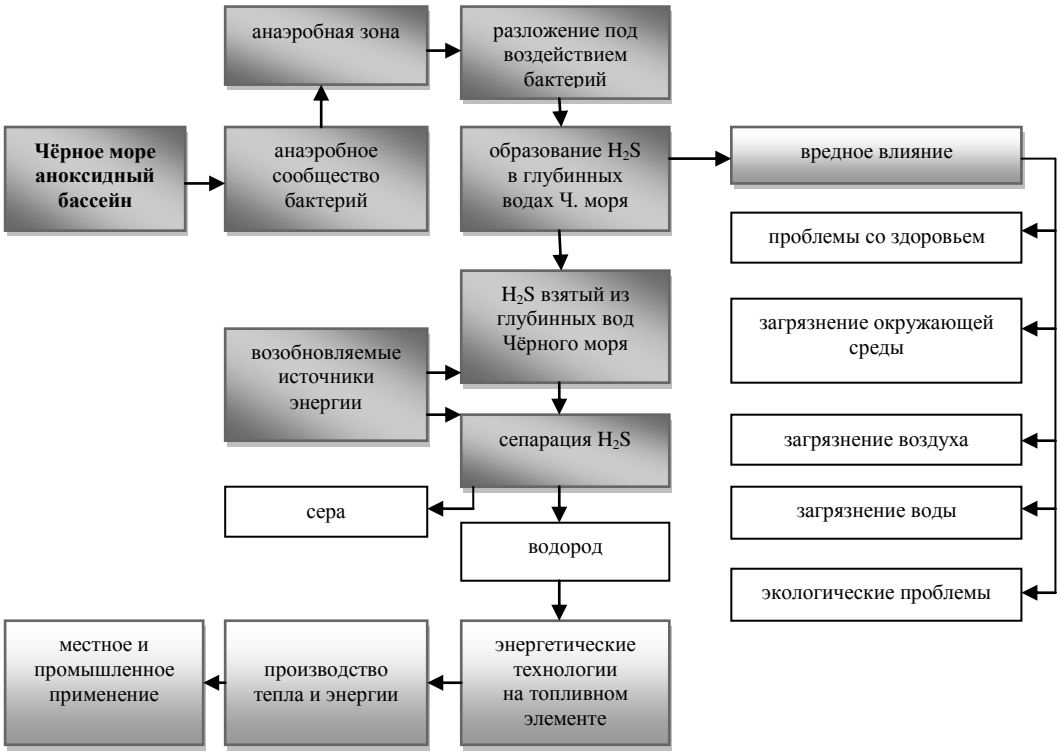
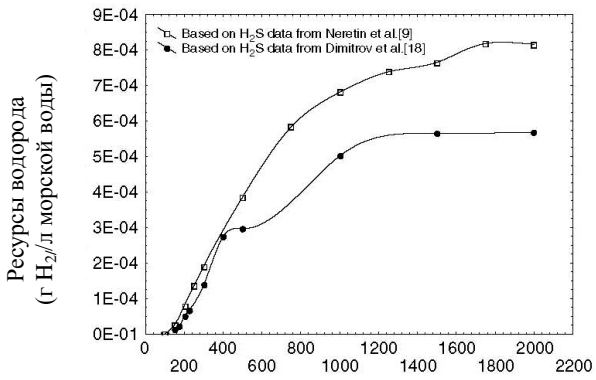


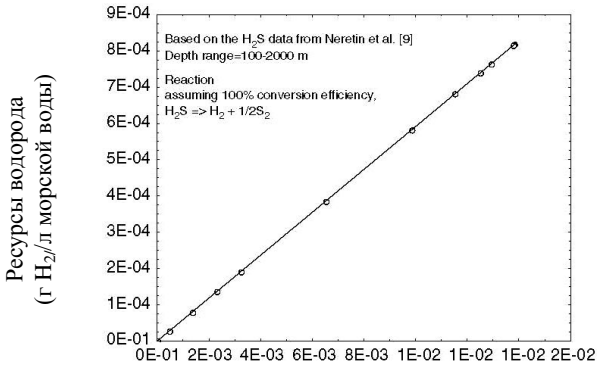
Рис. 5 – Влияние сероводорода и его связь с водородом
Fig. 5 – Effects of hydrogen sulphur and its relationship with hydrogen

3. Результаты и обсуждение

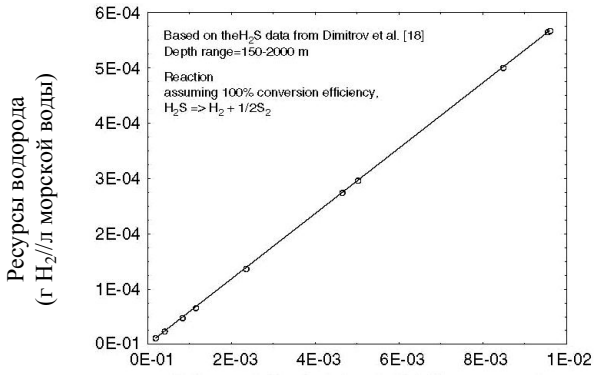
В данной работе проведено исследование потенциала водородной энергетики глубинных вод Черного моря на основе H_2S и значения для региона.



a Глубина воды в Черном море (м)



b Ресурсы H_2S в Черном море (г H_2/л морской воды)



c Ресурсы H_2S в Черном море (г H_2/л морской воды)

Рис. 6 – *a*) изменение ресурсов водорода в зависимости от глубины Черного моря; *b*) изменение водородного потенциала в зависимости от потенциала H_2S в Черном море и от данных о H_2S из литературы [9]; *c*) изменение водородного потенциала в зависимости от потенциала H_2S в Черном море и от данных о H_2S из литературы [18]
Fig. 6 – (a) Variation of hydrogen potential as a function of water depth in Black Sea. (b) Variation of hydrogen potential as a function of H_2S potential in Black Sea depending on the H_2S data from literature [9]. (c) Variation of hydrogen potential as a function of H_2S potential in Black Sea depending on the H_2S data from literature [18]

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

С этой целью были предприняты следующие шаги: 1) определен потенциал водородной энергетики, который получен на основании количества H_2S на различных глубинах Черного моря при условии стопроцентной эффективности преобразования реакции разложения H_2S; 2) определен потенциал водородной энергетики на основании количества H_2S в различных слоях вод Черного моря; 3) обсуждалась важность водородного потенциала для стран региона. С учетом данных шагов подробно анализируются и обсуждаются рис. 6 и 7 и табл. 2.

На рисунках 6*a–c* представлены вариации водородного потенциала в зависимости от глубины и потенциала H_2S в Черном море в зависимости от литературных данных [9] и [18] соответственно.

На рис. 6*b* потенциал H_2S на глубине Черного моря $100 \div 2\ 000$ м используется для оценки водородного потенциала, а глубина Черного моря $150 \div 2\ 000$ м рассматривается на рис. 6*c*. Как показано на рис. 6*a* и 6*b*, предполагая стопроцентную эффективность преобразования при реакции разложения H_2S, количество газообразного водорода, синтезированного из H_2S, определяется в зависимости от H_2S на определенных глубинах Черного моря. Судя по рис. 6*a* и 6*b* можно сказать, что на основании количества H_2S на глубине Черного моря 100 м водородный потенциал почти равен нулю. Однако теоретически возможно получить $0{,}00266 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0{,}045 \times 10^{-2}$ г H_2S/л морской воды с глубины 150 м, и $0{,}082 \times 10^{-2}$ г H_2 из $1{,}38 \times 10^{-2}$ г H_2S/л морской воды с глубины 2 000 м при условии стопроцентной эффективности преобразования при реакции разложения H_2S. По данным рис. 6*a* и 6*c* с условием стопроцентной эффективности преобразования при реакции разложения H_2S можно получить $0{,}00112 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0{,}019 \times 10^{-2}$ г H_2S /л морской воды с глубины 150 м, и $0{,}0568 \times 10^{-2}$ г H_2 из $0{,}96 \times 10^{-2}$ г H_2S /л морской воды с глубины 2 000 м. Соответственно, эти данные показывают, что производство водорода может осуществляться за счёт потенциала сероводорода на различных глубинах Черного моря.

Рис. 7 иллюстрирует вариации водородного потенциала в глубинных водах Черного моря в зависимости от водных слоев Черного моря.

Как показано на рис. 7, максимальный водородный потенциал оценивается как 86,41 млн тонн из 1 469 млн тонн H_2S на глубине $1\ 000 \div 1\ 500$ м. Однако минимальный водородный потенциал определен в 1,294 млн тонн из 0,022 млн тонн H_2S на глубине $100 \div 200$ м. Кроме того, общий объем водородного потенциала может быть рассчитан как 270 млн тонн с учетом всех водных слоев Черного моря (рис. 7). Следовательно, Черное море обладает большим водородным потенциалом для обеспечения энергетических затрат всех стран региона, а также многих европейских стран.

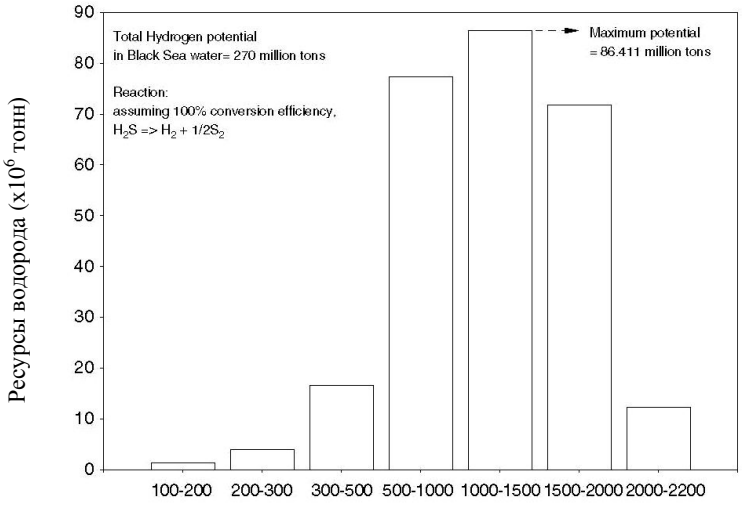


Рис. 7 – Изменение ресурсов водорода глубинных вод Черного моря в зависимости от водного слоя Черного моря [9]
Fig. 7 – Variation of hydrogen potential in Black Sea deep water as a function of water layer of Black Sea [9]

В табл. 2 водородный потенциал сравнивается с другими видами топлива в практическом применении, а также теоретическая выработка электроэнергии из водородного потенциала с различных слоев глубинных вод Черного моря. Для оценки водородного потенциала в зависимости от глубины принимаются во внимание данные [9], представленные в табл. 1.

Как показано в табл. 2, общий водородный потенциал оценивается в 270 млн тонн на основе общего потенциала сероводорода. Теоретически из этого количества водорода можно получить 38,3 млн ТДж тепловой энергии или 8,97 млн. Гвт·ч электроэнергии. Фактически, 38,3 млн ТДж тепловой энергии из водорода почти равноценно использованию 808 млн тонн бензина, 766 млн тонн ПГ, 841 млн тонн мазута, 851 млн тонн природной нефти. Следовательно, эти значения показывают, что водородный потенциал сероводорода в глубинных водах Черного моря будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 2

Сравнение ресурсов водорода с другими видами топлива в практическом применении и теоретическая выработка электроэнергии из водородных ресурсов с различных слоев глубинных вод Черного моря

Table 2

Comparison of hydrogen potential with other fuels in practical application, and theoretical electricity generation quantity from the hydrogen potential at different layers of Black Sea deep water

Глубина (м)	**100–200**	**200–300**	**300–500**	**500–1000**	**1000–1500**	**1500–2000**	**2000–2200**	**Всего**
M_{H2} (т)	1,3e + 6	4e + 6	16,65e + 6	77,35e + 6	86,41e + 6	71,76e + 6	12,35e + 6	270e
E_{H2} (ТДж)	0,18e + 6	0,57e + 6	2,36e + 6	11e + 6	12,3e + 6	10,2e + 6	1,75e + 6	38,3e + 6
$M_{\text{бензин}}$ (т)	3,87e + 6	12e + 6	49,8e + 6	232e + 6	259e + 6	215e + 6	37e + 6	808e + 6
M_{NG} (т)	3,67e + 6	11,4e + 6	47,2e + 6	220e + 6	245e + 6	204e + 6	35,1e + 6	766e + 6
$M_{\text{древ.уголь}}$ (т)	6,12e + 6	18,9e + 6	78,7e + 6	366e + 6	409e + 6	339e + 6	58,4e + 6	1280e + 6
$M_{\text{мазут}}$ (т)	4,04e + 6	12,5e + 6	51,9e + 6	241e + 6	269e + 6	224e + 6	38,5e + 6	841e + 6
$M_{\text{СНГ}}$ (т)	3,75e + 6	11,6e + 6	48,3e + 6	224e + 6	251e + 6	208e + 6	35,8e + 6	783e + 6
$M_{\text{биодизель}}$ (т)	4,96e + 6	15,3e + 6	63,8e + 6	297e + 6	331e + 6	275e + 6	47,4e + 6	1030e + 6
$M_{\text{метанол}}$ (т)	8,23e + 6	25,5e + 6	106e + 6	492e + 6	550e + 6	457e + 6	78,6e + 6	1720e + 6
M_{hazelnut} (т)	10,6e + 6	32,7e + 6	136e + 6	632e + 6	706e + 6	587e + 6	101e + 6	2210e + 6
$M_{\text{осадок}}$ (т)	10,7e + 6	33,1e + 6	138e + 6	640e + 6	715e + 6	594e + 6	102e + 6	2230e + 6
$M_{\text{нефть}}$ (т)	4,08e + 6	12,6e + 6	52,5e + 6	244e + 6	273e + 6	226e + 6	39e + 6	851e + 6
EEE[a] (ГВт·ч)	0,04e + 6	0,133e + 6	0,554e + 6	2,57e + 6	2,87e + 6	2,39e + 6	0,411e + 6	8,97e + 6

[a] Эквивалентность электрической энергии 1 кг H_2 = 33,26 кВт · ч = 119,6 кДж.

Таким образом, предлагается, чтобы все страны у Черного моря поддерживали и инвестировали производство водородной энергии с использованием глубинных вод Черного моря.

Принимая во внимание общее количество водородной энергии, которую можно получить из сероводорода в глубинных водах Черного моря, водородная энергия играет очень важную роль в обеспечении энергетических потребностей стран региона. Например, если предположить стопроцентную эффективность реакции разложения сероводорода, то из 4 587 млн тонн H_2S получится 270 млн тонн водорода. Кроме того, на Черноморском побережье живут почти 10 млн семей, и годовая потребность в электроэнергии составляет почти 3 600 кВт/ч. Таким образом, ежегодный спрос на электроэнергию почти 10 млн семей на Черноморском побережье можно оценить в 36 млрд кВт/ч.

Если общий потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря будет полностью использован для обеспечения всех энергетических потребностей этих семей, то этого потенциала хватит примерно на 250 лет.

Аналогичным образом рассмотрим потребление энергии природных источников и потребление нефти странами региона в зависимости от данных BP за 2003 г. [19]. Общее потребление нефти странами региона, за исключением России и Грузии (необходимые данные не найдены) составляет 60,3 млн тонн, а потребление энергии природных источников – 266,8 млн тонн в нефтяном эквиваленте. Помимо этого, с учетом общего количества водорода (270 млн тонн) из глубинных слоев Черного моря, равного 851 млн тонн нефти, потребность в нефти в ближайшие 15 лет и потребность стран региона в энергии природных источников в ближайшие 4 года теоретически могут быть компенсированы только за счет водородной энергии из глубинных слоев Черного моря.

С другой стороны, напомним, что теоретически требуется 0,021 кВт/ч энергии на 1 моль производства H_2 из 1 моля H_2S. Требуемая энергия для производства общего количества водорода (270 млн тонн) из глубинных слоев Черного моря теоретически оценивается в 2,74 млн Гвт/ч. Если страны региона будут получать такое количество энергии из возобновляемых источников энергии, таких как гидроэлектроэнергия, ядерная энергия, солнечная энергия, энергетическое сырьё из биомассы, энергия ветра и т.д., теоретический чистый прирост энергии стран региона составит 6,2 млн ГВт/ч.

Необходимо помнить, что в этой оценке учитывается только потенциал водородной энергетики глубинных вод Черного моря.

4. Заключение

В данном исследовании изучался потенциал энергии водорода глубинных вод Черного моря, включая сероводород с учетом данных о потенциале H_2S, приведенных в литературе. По итогам этого исследования можно сделать следующие важные выводы.

• Энергию из водорода (почти 1,3 млн тонн = 0,184 млн ТДж) можно получать из слоя сероводорода на глубине $100 \div 200$ м в прибрежных областях Черного моря с помощью соответствующих технологий и возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и/или гидроэлектроэнергия. Однако максимальный потенциал водорода можно оценить в 86,411 млн тонн из 1 469 млн тонн H_2S в слое $1\,000 \div 1\,500$ м. Можно рассчитать, что общий по-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

тенциал водородной энергетики составит 270 млн тонн с учетом всех водных слоев Черного моря. Если эти возобновляемые источники энергии используются для извлечения и разложения сероводорода из глубинных вод Черного моря, затраты на производство водорода могут быть снижены. Следовательно, Черное море обладает большим потенциалом водородной энергетики для компенсации энергетических затрат всех стран региона, а также многих европейских стран.

• Производство 38,3 млн ТДж тепловой энергии или 8,97 млн ГВт электроэнергии станет возможным с помощью 270 млн тонн от общего объема потенциала водородной энергетики на основе общего потенциала сероводорода. Это количество водорода практически равноценно использованию 808 млн тонн бензина, 766 млн тонн природного газа, 841 млн тонн мазута, 851 млн тонн нефти. Соответственно, потенциал водородной энергетики, получаемый из сероводорода глубинных вод Черного моря, будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей стран региона. Итак, предлагается, чтобы все страны Черного моря поддерживали и инвестировали производство водородной энергии с использованием глубинных вод Черного моря.

Таким образом, если водородная энергия получена из сероводорода глубинных вод Черного моря, то можно частично компенсировать энергетические потребности стран региона, а водородная энергия может быть транспортирована в европейские страны. Поэтому предлагается, чтобы такие страны региона, как Турция, Болгария, Украина, Россия, Грузия и Румыния поддерживали и инвестировали активизацию этого водородного энергетического резерва в рамках программы «Энергетическое сотрудничество на Черном море». В дальнейшем следует изучить воздействие на окружающую среду и целесообразность производства водорода из глубинных вод Черного моря.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить UNIDO-ICHET (Турция) за научную поддержку.

Acknowledgment

The authors would like to thank the UNIDO-ICHET in Turkey for their scientific supports.

References

[1] Dincer I. Environmental impacts of energy. *Energy Policy*,1999;27:845–54.

[2] Midilli A., Ay M., Dincer I., Rosen M.A. On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable Sustainable Energy Rev*., 2005;9(3):255–71.

[3] Petrov K. The Black Sea and hydrogen energy. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1991;16(12):805–8.

[4] Deuser W.G. Organic carbon budget of the Black Sea. *Deep Sea-Res*., 1971;18:995–1004.

[5] Ayzatullin T.A., Skopintsev B.A. Investigation of hydrogen sulfide oxidation in the Black Sea water. *Okeanologiya*, 1974;14:403–20.

[6] Millero F.J. The oxidation of H_2 S in Black Sea waters. *Deep-Sea Res*, 1991;38:1139–50.

[7] Neretin L.N., Volkov I.I. On the vertical distribution of hydrogen sulfide in deep waters of the Black Sea. *Okeanologiya*, 1995;35:60–5.

[8] Belyaev V.I., Sovga E.E., Lyubartseva S.P. Modeling the hydrogen sulphide zone of the Black Sea. *Ecol. Modeling*, 1997;96:51–9.

[9] Neretin L.N., Volkov I.I., Bottcher M.E., Grinenko V.A. A sulphur budget for the Black Sea anoxic zone. *Deep-Sea Res*, 2001;8:2569–93.

[10] Akcil A., Ciftci H. A study of the selective leaching of complex sulphides from the eastern Black Sea region. Turkey. *Miner Eng*., 2002;15:457–9.

[11] Neretin LN, Bottcher MA, Grinenko VA. Sulfur isotope geochemistry of the Black Sea water column. Chem Geol 2003;200:59–69.

[12] Midilli A., Ay M., Kale A., Veziroglu T.N. Karadeniz dip sularýnýn hidrojen enerjisi potansiyeli. *Proceedings of fifth national clean energy symposium*, vol. 2, Turkey; 2004, p. 711–31.

[13] Midilli A., Ay M., Kale A., Veziroglu T.N. Hydrogen energy potential of Black Sea deep water based on H_2 S and importance for the region. *Proceedings of international hydrogen energy congress and exhibition*, Istanbul, Turkey; 13–15 July 2005.

[14] Baykara S., Kale A., Veziroglu T.N. Possibilities for hydrogen production from H_2 S in Black Sea. *Proceedings of international hydrogen energy congress and exhibition*, Istanbul, Turkey; 13–15 July 2005.

[15] Ture E. Hydrogen energy potential of Black Sea. *Proceedings of 15th World hydrogen energy conference*, Yokohama, Japan; 2004.

[16] Karababa I. Karadeniz'den metan gazı arastırması. Ankara, Turkey: MTA;1964.

[17] Ustun Y. Karadeniz Havzasi ve Turk Bogazlari Sistemi. Available from: _http://www.dogailebaris.org.tr_.

[18] Dimitrov D., Genov I., Kozhuharov E. Alternative resources and energetic sources from Black Sea bottom 2003, vol. 4, Varna: Publications of Institute of Oceanology, Bulgarian Academy of Science; 2003_http://www.io-bas-bg/products/volume4.htm_.

[19] Statistical Review of World Energy 2003. Primary energy: consumption by fuel type Mtoe; June 2003. Available from: http://www.bp.com/centres/energy_.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 16.04.18. Ред. рег. № 1324-2697-1 The article has entered in publishing office 16.04.18. Ed. reg. No. 1324-2697-1

УДК 534.46:541.44.661.968

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИДОВ МЕТАЛЛОВ IV и V ГРУПП В ГИДРИДНОМ ЦИКЛЕ*

С.К. Долуханян, Г.Н. Мурадян, А.Г. Алексанян, О.П. Тер-Галстян, Н.Л. Мнацаканян

Институт химической физики Национальной Академии наук Армении им. А.Б. Налбандяна
д. 5/2, ул. П. Севака, Ереван, 375044, Армения
тел.: +7 (060) 62-35-90; e-mail: seda@ichph.sci.am

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.122-140

Заключение совета рецензентов: 24.04.18 Заключение совета экспертов: 03.05.18 Принято к публикации: 10.05.18

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Традиционные методы получения алюминидов Me^{IV-V} являются трудоемкими, многостадийными и занимают много времени. В Лаборатории высокотемпературного синтеза и технологии неорганических соединений ИХФ НАН РА разработан новый высокоэффективный метод получения сплавов и интерметаллидов тугоплавких металлов – метод гидридного цикла (ГЦ). В настоящем обзоре представлены результаты систематических исследований ГЦ формирования алюминидов в системах: TiH_2–Al, ZrH_2–Al, $NbH_{1,23}$–Al, TiH_2–Al–ZrH_2, TiH_2–Al–$NbH_{1,23}$. Установлено влияние параметров процесса, химических особенностей гидридов, соотношений исходных компонентов и фазовых превращений на процесс формирования алюминидов. Предложен механизм формирования алюминидов металлов IV–V групп в ГЦ: при нагреве компактированных смесей $xMeH_2 + (1\text{-}x)Al \rightarrow Me_xAl_{1-x} + H_2 \uparrow$ происходит диссоциация водорода из гидридов, вследствие чего разрушаются связи Me–H; в атмосфере выделившегося водорода происходит очистка от окисной пленки; образуются активные металлы, мгновенно экзотермически взаимодействующие с алюминием по твердофазному механизму, минуя плавление алюминия. Синтезировано более 30 алюминидов: однофазные α_2-Ti_3Al, γ-TiAl и $TiAl_3$; твердые растворы Al в Zr состава Zr_3Al, однофазные $ZrAl_2$; $ZrAl_3$ и гидрид $Zr_3AlH_{4,49}$; однофазные $NbAl_3$; Nb_2Al и Nb_3Al, содержащие около 10 % Nb_2Al; $Ti_{0,35}Zr_{0,4}Al_{0,25}$; $Ti_{0,55}Zr_{0,2}Al_{0,25}$; $Ti_{0,25}Al_{0,5}Nb_{0,25}$; $Ti_{0,45}Al_{0,28}Nb_{0,27}$; $Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$; $Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$ и др. Некоторые алюминиды без предварительного дробления взаимодействуют с водородом в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с образованием обратимых гидридов. Построено два концентрационных треугольника систем Ti–Al–Zr и Ti–Al–Nb. По сравнению с традиционными методами синтез алюминидов металлов IV и V групп в ГЦ имеет существенные преимущества: относительно низкие температуры (~1 000 ºС) и сокращение длительности процесса (30–60 мин); формирование алюминидов происходит в одну технологическую стадию, минуя плавление исходных компонентов; процесс экологически чистый и энергосберегающий, экономически рентабельный и т.д. Синтез триалюминидов происходит при температуре 650–670 ºС.

Алюминиды Me^{IV-V} групп являются весьма перспективными конструкционными материалами и применяются в авиакосмическом и наземном двигателестроении, оборонной промышленности, ведущих отраслях машиностроения, химической и пищевой промышленности, электронике, медицине как биосовместимые материалы и др.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез; алюминид титана и ниобия; интерметаллиды; гидриды металлов; гидрирование–дегидрирование; сплавы тугоплавких металлов.

PHYSICAL AND CHEMICAL PECULIARITIES OF FORMATION OF ALUMINIDES OF IV–V GROUPS METALS IN HYDRIDE CYCLE

S.K. Dolukhanyan, G.N. Muradyan, A.G. Aleksanyan, O.P. Ter-Galstyan, N.L. Mnatsakanyan

Долуханян С.К., Мурадян Г.Н., Алексанян А.Г., Тер-Галстян О.П., Мнацаканян Н.Л. Физико-химические особенности формирования алюминидов металлов IV и V групп в гидридном цикле // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):122-140.

A.B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics, National Academy of Sciences of Republic of Armenia
5/2 P. Sevak St., Yerevan, 375044, Armenia
tel.: +7 (060) 62 35 90, e-mail: seda@ichph.sci.am

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.122-140

Referred 24 April 2018 Received in revised form 3 May 2018 Accepted 10 May 2018

The traditional methods for production of Me^{IV-V} aluminides are laborious, long-lasting and multi-stage. The Laboratory of High-Temperature Synthesis and Technology of Inorganic Compounds has developed a new highly efficient method for obtaining alloys and intermetallides of refractory metals, the "hydride cycle" (HC) method. This review presents the results of systematic studies of HC-formation of aluminides in the systems TiH_2-Al, ZrH_2-Al, $NbH_{1.23}$-Al, TiH_2-Al-ZrH_2, TiH_2-Al- $NbH_{1.23}$. The review describes the influences on this process of such parameters, as chemical characteristics of hydrides, the ratios of the initial components, phase transformations, etc., and proposes a mechanism for the HC-formation of aluminides of IV-V groups metals: upon heating of compacted $xMeH_2 + (1–x)Al \rightarrow Me_xAl_{1-x} + H_2\uparrow$, the hydrogen dissociates from the hydride; in the environment of the liberated hydrogen, the oxide film is removed; a very active metals are formed, which instantly interact with aluminum exothermically by a solid-phase mechanism without aluminum melting. We have synthesized in HC more than 30 aluminides: single-phase $NbAl_3$; Nb_2Al and Nb_3Al; solid solutions of Al in Zr: Zr_3Al, single-phase $ZrAl_2$, $ZrAl_3$ and $Zr_3AlH_{4.49}$ hydride; single-phase $NbAl_3$, Nb_2Al and Nb_3Al, containing about 10% Nb_2Al; $Ti_{0.35}Zr_{0.4}Al_{0.25}$; $Ti_{0.55}Zr_{0.2}Al_{0.25}$; $Ti_{0.25}Al_{0.5}Nb_{0.25}$; $Ti_{0.45}Al_{0.28}Nb_{0.27}$; $Ti_{0.2}Zr_{0.05}Al_{0.75}$; $Ti_{0.2}Zr_{0.05}Al_{0.75}$, etc. Without preliminary crushing, some aluminides interact with hydrogen in the SHS mode forming reversible hydrides. Based on the obtained results, two concentration triangles for Ti-Al-Zr and Ti-Al-Nb systems were constructed. Compared with existing methods, the synthesis in HC of aluminides of IV and V group metals has significant advantages: relatively low temperatures (~ 1000°C) and short duration (30-60 min) of process; formation in one technological stage, without melting of the original components; environmentally friendly and energy-saving, economically viable, etc. Synthesis of trialuminides occurs at temperatures of 650-670ºC. Aluminides based on Me^{IV-V} groups are very promising construction materials, they are used in aerospace and ground machine-building, defense industry, chemical and food industry, electronics, as biocompatible materials in medicine, etc.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis; titanium and niobium aluminides; intermetallides; metal hydrides; hydrogenation–dehydrogenation; high-melting metal alloys.

Седа Кареновна Долуханян
Seda Dolukhanyan

Сведения об авторе: д-р техн. наук, проф., зав. лаб. ИХФ НАН РА.
Образование: Политехнический институт Армении, инженер (1961 г.); Институт физики высоких давлений АН СССР, Москва; Институт проблем материаловедения, Киев УССР.
Область научных интересов: химическая физика**;** процессы горения; самораспространяющийся высокотемпературный синтез гидридов (метод СВС); материаловедение гидридов, тугоплавких соединений, сплавов.
Публикации: более 250.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Laboratory, A.B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics, National Academy of Sciences of Republic of Armenia.
Education: National Polytechnic University of Armenia, 1961; Institute of High Pressure Physics RAS, Moscow (Ph.D.); Institute of Problems of Materials Science, Kiev, USSR (D.Sc.).
Research interests: self-propagating high-temperature synthesis (SHS); materials science and technology; radiation-thermal synthesis.
Publications: more than 250.

Гарник Норикович Мурадян
Garnik Muradyan

Сведения об авторе:младший научный сотрудник ИХФ НАН РА.
Образование: Ереванский государственный университет, химик (2013 г.).
Область научных интересов: самораспространяющийся высокотемпературный синтез; гидриды переходных металлов; сплавы; материаловедение фаз внедрения.
Публикации: 4.

Information about the author: Junior Researcher, A.B Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA.
Education: Yerevan State University, Chemist, 2013.
Research interests: self-propagated high temperature synthesis (SHS); hydrides of transition metals; materiasl science and technology; alloys and intermetallides.
Publications: 4.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Анаит Гургеновна Алексанян
Anahit Aleksanyan

Сведения об авторе: научный сотрудник ИХФ НАН РА.

Образование: Ереванский государственный университет, физик (1972 г.).

Область научных интересов: химическая физика; процессы горения; самораспространяющийся высокотемпературный синтез гидридов (метод СВС); материаловедение гидридов; тугоплавких соединений, сплавов.

Публикации: более 61.

Information about the author: Researcher, A.B Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA.

Education: Yerevan State University, Physicist, 1972.

Research interests: self-propagating high-temperature synthesis (SHS); materials science and technology; radiation-thermal synthesis.

Publications: more than 61.

Офелия Паруйровна Тер-Галстян
Ofelya Ter-Galstyan

Сведения об авторе: научный сотрудник ИХФ НАН РА.

Образование: Ереванский политехнический институт, химик (1981 г.).

Область научных интересов: химическая физика; процессы горения; самораспространяющийся высокотемпературный синтез гидридов (метод СВС); материаловедение гидридов, тугоплавких соединений, сплавов.

Публикации: 32.

Information about the author: Researcher**,** A.B Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA.

Education: National Polytechnic University of Armenia, Chemist, 1981.

Research interests: self-propagating high-temperature synthesis (SHS); materials science and technology; radiation-thermal synthesis.

Publications: 32.

Нуне Левоновна Мнацаканян
Nune Mnatsakanyan

Сведения об авторе: научный сотрудник ИХФ НАН РА.

Образование: Ереванский политехнический институт, горно-металлургический факультет (1973 г.).

Область научных интересов: химическая физика; процессы горения; самораспространяющийся высокотемпературный синтез гидридов (метод СВС); материаловедение гидридов, тугоплавких соединений, сплавов.

Публикации: 14.

Information about the author: Researcher, A.B Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA.

Education National Polytechnic University of Armenia, Faculty of Mining and metallurgy, 1973.

Research interests: self-propagating high-temperature synthesis (SHS); materials science and technology; radiation-thermal synthesis

Publications: 14.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

В современном материаловедении остро стоит проблема разработки новых легких жаропрочных сплавов с рабочими температурами выше 550 ÷ 600 ºС. С этой точки зрения, алюминиды переходных металлов являются весьма перспективными конструкционными материалами, которые обладают следующими достоинствами: малая плотность, высокие температуры плавления, механическая прочность, жаропрочность, теплопроводность, электропроводность, сверхпроводимость, коррозионностойкость и др. Эти характеристики определили использование данных алюминидов в авиакосмическом и наземном двигателестроении, в оборонной промышленности, во многих ведущих отраслях машиностроения, химической и пищевой промышленности, электронике, в медицине как биосовместимых материалов и др. В качестве конструкционных материалов алюминиды титана применяются в первой стенке термоядерного реактора (ТЯР). При этом стоимость алюминидов Me^{IV-V} в 3 раза меньше, чем стоимость материалов-конкурентов (никелевых сплавов) [1–5]. Более того, алюминиды на основе Me^{IV-V}–Al являются не только конструкционными материалами, но и способны поглощать водород в больших количествах – накопители водорода.

В Лаборатории высокотемпературного синтеза и технологии неорганических соединений ИХФ НАН РА (далее Лаборатория) был разработан совершенно новый высокоэффективный метод получения сплавов и интерметаллидов тугоплавких металлов, названный методом гидридного цикла (ГЦ) [6–11].

Исследования показали, что метод ГЦ весьма перспективен при синтезе алюминидов [12, 13–15]. Было изучено влияние различных параметров: соотношение гидридов титана, циркония и ниобия и порошков алюминия в реакционной смеси, размеров зерен порошков гидридов (микро- и наноразмеры), давление прессования при компактировании гидридов, а также режимов дегидрирования и спекания (температура и скорость нагрева) на характеристики полученных алюминидов (кристаллическая структура, плотность и др.). Исследованы основные закономерности и механизм процесса формирования алюминидов в ГЦ, получены все фазы, известные по фазовым диаграммам Me–Al. Метод ГЦ

имеет существенные преимущества перед традиционными: снижение рабочих температур и длительности процесса формирования алюминидов тугоплавких металлов; одностадийность и безотходность; доступность СВС-процесса для получения исходных гидридов [16, 17]. Кроме того, в ГЦ формирование сплавов происходит по твердофазному механизму при температуре $1\,000 \div 1100$ °C, минуя плавление исходных компонентов.

В настоящем обзоре представлены исследования закономерностей и механизма формирования алюминидов Me^{IV-V} в ГЦ.

Список обозначений	
Буквы греческого алфавита	
α, β, γ	Фазы кристаллической решетки
Θ	Углы на рисунках дифракционных картин
Буквы латинского алфавита	
a, c	Значения параметров кристаллической решетки
P6|mmn, F4|mmm, D^{17}_{4m}–$I_{4\|mmm}$	Пространственные группы кристаллической решетки
B_2–DO_{19}, DO_{22}, DO_{23}	Фазы кристаллической решетки
DTA	Кривая дифференциально-термического анализа
P	Давление, атм.
TG	Кривая потери веса
T	Кривая роста температуры
Индексы нижние	
гор.	Горение
пл.	Плавление
прес.	Пресс
Аббревиатуры	
ГЦ	Гидридный цикл
ГЦТ	Гранецентрированный тетраэдр
ДТА	Дифференциально-термический анализ
ОЦТ	Объемно-центрированный тетраэдр
ОЦК	Объемно-центрированный куб
РФА	Рентгенофазовый анализ
СВС	Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

2. Теоретическая часть

Традиционными методами получения алюминидов Me^{IV-V} являются индукционная или дуговая плавки, порошковая металлургия, механохимия. Все эти методы трудоемки, продолжительны и многостадийны. Различие в температурах плавления, испарения и плотностях исходных компонентов сплава влияют на процесс формирования алюминидов, препятствуют широкому использованию в промышленности и приводят к высокой стоимости алюминидов Me^{IV-V} [1–4]. Алюминиды Ti, Zr и Hf также получают методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), однако для его реализации часто требуется дополнительная активация исходной реакционной смеси, а конечные продукты синтеза не однофазные [5].

Другая проблема применения алюминидов – это отсутствие промышленно надежных технологий получения гомогенных сплавов заданного состава. Поиск новых эффективных методов получения алюминидов металлов с заданными физико-техническими свойствами является актуальной задачей в современном материаловедении.

3. Методика эксперимента

3.1. Метод СВС

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) тугоплавких неорганических соединений, разработанный проф. А.Г. Мержановым в Институте химической физики АН СССР (Черноголовка), получил широкое применение в материаловедении [18]. Сущность метода СВС заключается в использовании тепла экзотермической реакции, протекающей после локального мгновенного инициирования реакции в тонком слое ненагретой смеси «металл – твердый неметалл» (C, B, Si), «металл – газообразный неметалл» (N_2), в результате которой развиваются высокие температуры во фронте горения, перемещающемся по веществу за счет теплопередачи от слоя к слою с постоянной линейной скоростью. Процесс протекает без внешних энергозатрат, только за счет тепла химической реакции.

Метод СВС оказался перспективным направлением для получения гидридов. В Лаборатории впервые были спрогнозированы и реализованы СВС-процессы в системах: Me–H, Me–Me^1–H, Me–C–H и т.д. Главным итогом проводимых исследований является

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

разработка научных основ СВС-процессов, протекающих при горении различных конденсированных систем в атмосфере водорода [16, 17] и разработка технологических процессов получения гидридов. В системе Me–H реакция горения протекает за счет экзотермической реакции со скоростью (1 ÷ 10 см/сек), стопроцентным выходом и содержанием водорода в полученных гидридах, близким к стехиометрическому. В Лаборатории методом СВС были синтезированы более 300 бинарных и сложных гидридов и дейтеридов переходных металлов (карбогидриды, гидридонитриды, гидриды интерметаллидов), разработаны научные основы СВС-процессов системы Me–H. Главные характеристики процесса – одностадийность, неэнергоемкость, экологическая чистота, безотходность и безопасность.

3.2. Метод гидридного цикла (ГЦ)

Логическим продолжением исследований СВС-процессов в системах Me–H стало изучение пластической деформации синтезированных гидридов, с последующим дегидрированием, с целью получения компактных изделий [12]. Следующим шагом в этом направлении было использование порошков гидридов тугоплавких металлов в качестве исходных материалов для получения сплавов и интерметаллидов тугоплавких металлов (метод ГЦ). В основе метода лежат реакции:

$$x\text{Me}'\text{H}_2 + (1-x)\text{Me}''\text{H}_2 \rightarrow \text{сплав Me}'_x\,\text{Me}''_{(1-x)} + \text{H}_2\uparrow$$

либо

$$x\text{Me}'\text{H}_2 + \text{y Me}'' \rightarrow \text{интерметаллид Me}'_x\,\text{Me}''_y + \text{H}_2\uparrow.$$

Метод ГЦ и экспериментальные результаты по синтезу сплавов и интерметаллидов на основе $\text{Me}^{\text{IV-VIII}}$ групп описан в работах [6–12]. ГЦ включает в себя: получение методом СВС порошков гидридов, измельчение, смешивание, компактирование смеси, удаление водорода – вакуумный отжиг до 1 100 ºС, обеспечивающий активную диссоциацию исходных гидридов. В процессе нагрева (не более 2 часов) компактированной смеси гидридов происходит сильная активация металлов за счет разрушения связи Me–H и очистка от окисной пленки в среде выделившегося водорода, что обусловливает твердофазную диффузию и взаимное растворение компонентов реакции с образованием сплавов. В режиме ГЦ синтезировано более 100 сплавов и интерметаллидов в системах: Ti–Zr; Ti–Hf; Ti–Nb; Ti–V; Zr–Hf; Ti–Zr–Hf; Ti–Ni; Zr–Co и др. [6–12]. Таким образом, метод ГЦ формирования сплавов перспективен для индустрии. Например, некоторые полученные компактные сплавы без предварительного измельчения взаимодействуют с водородом в режиме СВС, образуя гидриды с высоким содержанием водорода [12].

Для аттестации образцов применяли химический (определение содержания водорода в токе сухого кислорода методом пиролиза), дифференциально-термический (ДТА, дериватограф Q-1500) и рентгенофазовый (РФА-дифрактометр ДРОН-0.5) анализы. В качестве исходных материалов использовали порошки чистые Ti, Zr, Nb и Al. Методом СВС были синтезированы гидриды: TiH_2 (содержание H_2 – 4,01 вес.%), ZrH_2 (содержание H_2 – 2 вес.%) и $NbH_{1,23}$ (содержание H_2 – 1,31 вес.%). Смесь гидридов с алюминием прессовалась в цанговых пресс-формах в цилиндрические таблетки диаметром 22 ÷ 25 мм и высотой 8 ÷ 10 мм на гидравлическом прессе ($P_{\text{прес.}}$ = 10 000 ÷ 45 000 кГс). Исследования проводили в герметичной установке, состоящей из кварцевого реактора, печи, приборов для контроля вакуума и температур в реакторе. Процесс ГЦ проходил при температуре 1 000÷1 100 ºС. Плотность образцов измерялась гидростатическим методом, рентгеновская плотность рассчитывалась по параметрам кристаллической решетки.

4. Результаты и их обсуждение

В настоящем обзоре представлены результаты исследований по формированию алюминидов в системах TiH_2–Al, ZrH_2–Al, $NbH_{1,23}$–Al, TiH_2–Al–ZrH_2, TiH_2–Al–$NbH_{1,23}$.

4.1. Бинарные алюминиды на основе Ti, Zr и Nb

Для систем TiH_2–Al, ZrH_2–Al и $NbH_{1,23}$–Al были установлены основные параметры, влияющие на процесс формирования алюминидов в ГЦ по ниже приведенным реакциям:

$$x\text{TiH}_2 + (1-x)\text{Al} \rightarrow \text{Ti}_x\text{Al}_{(1-x)} + \text{H}_2\uparrow;$$

$$x\text{ZrH}_2 + (1-x)\text{Al} \rightarrow \text{Zr}_x\text{Al}_{(1-x)} + \text{H}_2\uparrow;$$

$$x\text{NbH}_{1,23} + (1-x)\text{Al} \rightarrow \text{Nb}_x\text{Al}_{(1-x)} + \text{H}_2\uparrow,$$

где $0{,}25 \le x \le 0{,}9$.

В ГЦ были синтезированы алюминиды, известные по диаграммам состояния [19]: однофазные α_2–Ti_3Al; γ-TiAl; $TiAl_3$ [12]; твердые растворы Al в Zr, сопровождаемые различными алюминидными фазами (Zr_3Al; Zr_4Al_3 Zr_2Al_3) [14], и однофазные $ZrAl_2$; $ZrAl_3$; Nb_3Al с содержанием около 10 % Nb_2Al и однофазные Nb_2Al; $NbAl_3$ [15]. В табл. 1 представлены фазовый состав и параметры кристаллической решетки этих алюминидов. По термограммам процесса ГЦ и ДТА-кривым исследуемых систем видно, что при достижении нагрева шихты до 670 ÷ 900 ºС наблюдаются экзоэффекты, обусловленные экзотермической реакцией титана, циркония и ниобия с алюминием.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 1

Характеристики бинарных алюминидов Ti, Zr и Nb

Table 1

Characteristics of binary aluminides Ti, Zr and Nb

Состав алюминидов	**Сингония, пространственная группа**	**Крист. решетка сплава, параметр в Å**
$Ti_{0,75}Al_{0,25}$ (α_2-Ti_3Al)	Гексагональная, $P6_3$ / mmc (194)	a = 5,83, c = 4,647
$Ti_{0,5}Al_{0,5}$ (γ-TiAl)	Тетрагональная, I4 / mmm (139)	a = 3,986; c = 4,065
$Ti_{0,25}$ $Al_{0,75}$ ($TiAl_3$)	Тетрагональная, I4 / mmm (139)	a = 3,848; c = 8,614
$Zr_{0,75}Al_{0,25}$ (Zr_3Al)	Тв.р. Al в Zr , $P6_3$ / mmc (194)	a = 3,239; c = 5,168
$Zr_{0,34}$ $Al_{0,66}$ ($ZrAl_2$)	Гексагональная, $P6_3$ / mmc (194)	a = 5,279; c = 8,736
$Zr_{0,25}$ $Al_{0,75}$ ($ZrAl_3$)	Тетрагональная, D^{17}4H-I4 / MMM	a = 4,015; c = 17,35
$Nb_{0,75}Al_{0,25}$ (Nb_3Al)	Кубическая, Nb_3Al; PM3M (223) Nb_2Al; тв. раст. Al в Nb (следы)	a = 5,18
$Nb_{0,66}Al_{0,34}$ (Nb_2Al)	Тетрагональная, $P4_2$ / mnm (136)	a = 9,971; c = 5,156
$Nb_{0,25}$ $Al_{0,75}$ ($NbAl_3$)	Тетрагональная, D^{17}4H–F4 / mmm	a = 5,447; c = 8,579

На рис. 1 представлены фотографии алюминидов, синтезированных в ГЦ.

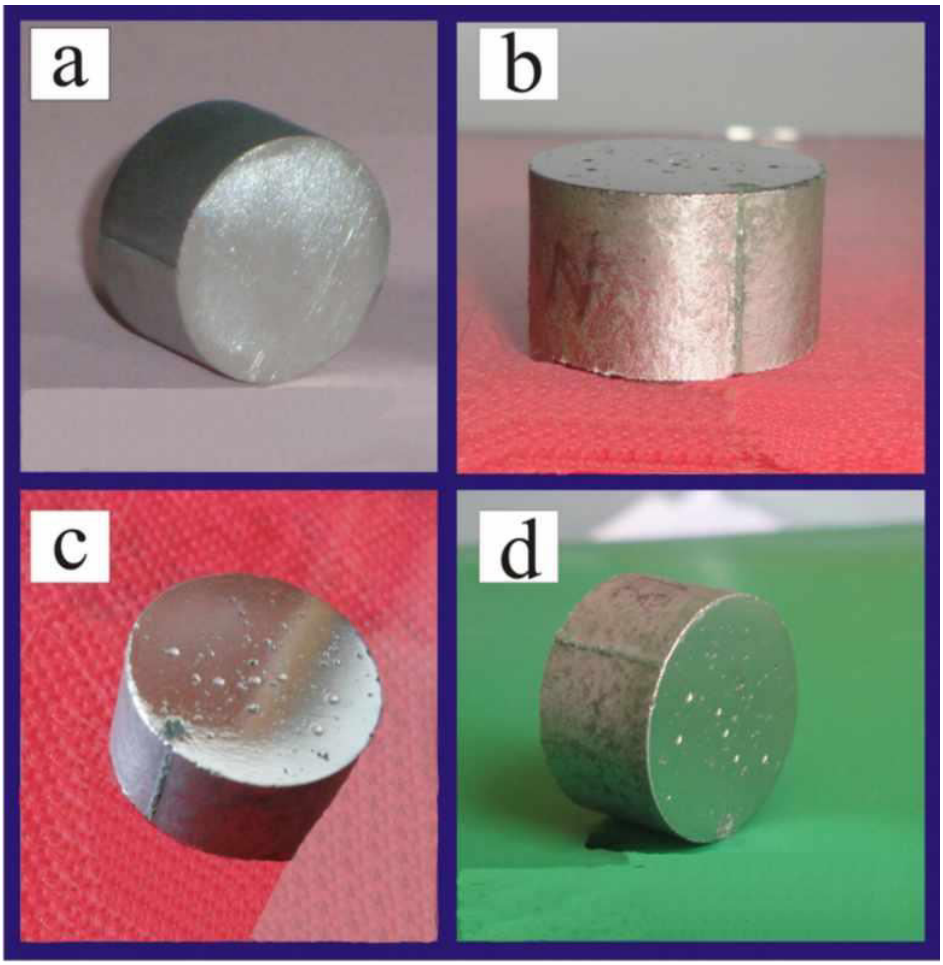


Рис. 1 – Фотографии алюминидов, синтезированных в ГЦ:
a)TiAl; *b*)Ti_2AlNb; *c*) $Ti_{0,9}Al_{0,1}$; *d*) $Ti_{0,52}Al_{0,06}Nb_{0,42}$
Fig. 1 – Photographs of the aluminides synthesized in HC:
a)TiAl; *b*)Ti_2AlNb; *c*) $Ti_{0.9}Al_{0.1}$; *d*) $Ti_{0.52}Al_{0.06}Nb_{0.42}$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

На рис. 2 (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*) представлены термограммы процесса ГЦ и ДТА-кривые исследуемых систем.

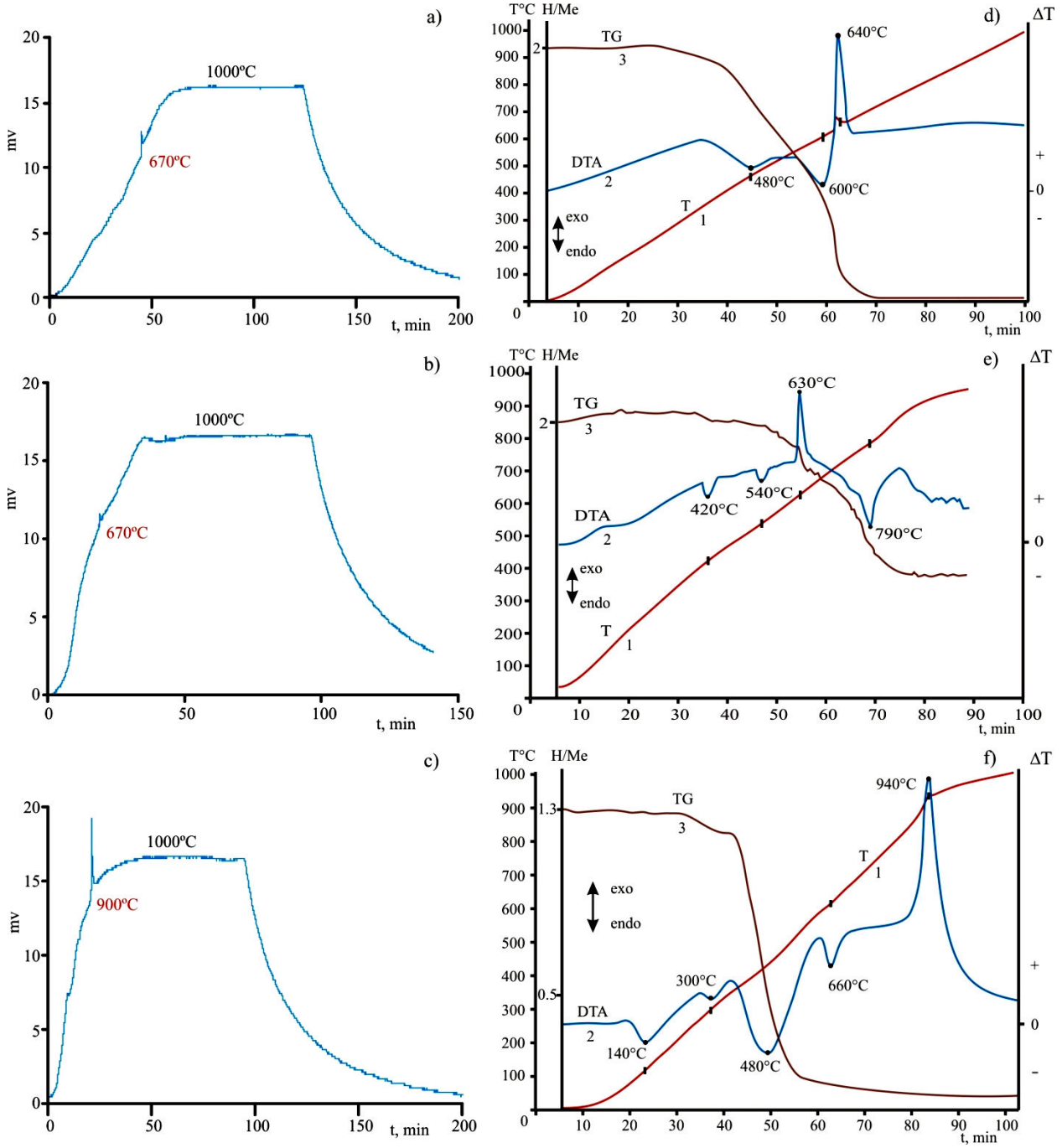


Рис. 2 – Термограммы ГЦ формирования алюминидов (*a*, *b*, *c*) и ДТА-кривые (*d*, *e*, *f*) при нагреве шихты до 1 000 ºС трех составов: 75 at.%TiH_2 + 25at.%Al (Ti_3Al); 75%ZrH_2 + 25%Al (Zr_3Al); 3$NbH_{1,23}$ + 25%Al (Nb_3Al);
Fig. 2 – The thermograms of the HC of the formation of aluminides (a, b, c) and DTA curves (d, e, f) with heating of the charge to 1000 ºC of three compositions:
75 at.% TiH_2 + 25at.% Al (Ti_3Al); 75% ZrH_2 + 25% Al (Zr_3Al); 3$NbH_{1.23}$ + 25% Al (Nb_3Al)

На рис. 3 представлены дифракционные картины α_2-Ti_3Al; γ-TiAl; $TiAl_3$; $ZrAl_3$ и $NbAl_3$.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

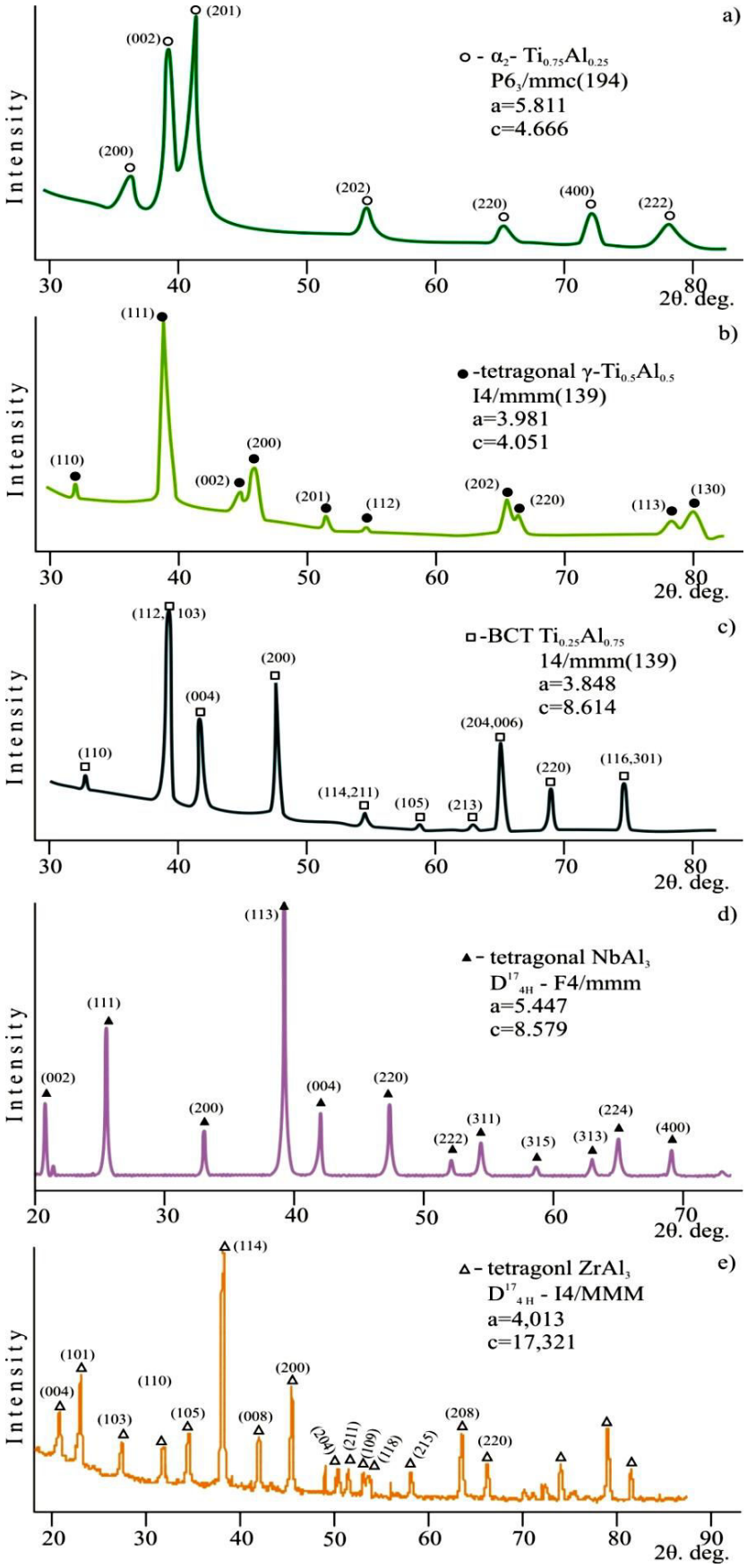


Рис. 3 – Дифракционные картины: *a*) α_2-Ti_3Al; *b*) γ-TiAl; *c*)$TiAl_3$; *d*) $ZrAl_3$; *e*)$NbAl_3$
Fig. 3 – Diffraction patterns of a) α_2-Ti_3Al; b) γ-TiAl; c) $TiAl_3$; d) $ZrAl_3$; e) $NbAl_3$

4.2. Формирование алюминидов в системе Ti–Al–Zr методом ГЦ

Перспективным направлением для разработки жаропрочных и термостойких сплавов является введение в алюминий металлов IV группы (Ti, Zr и Hf) с целью улучшения механических, физических и химических свойств сплава [20–22].

4.2.1. Система $(0,75 – x)TiH_2 – xZrH_2 – 0,25Al$ (разрез $Ti_3Al – Zr_3Al$; 25am% Al)

Реакция формирования алюминидов на основе титана и циркония в режиме ГЦ:

$$(0,75 – x)TiH_2 + xZrH_2 + 0,25Al \rightarrow$$
$$\rightarrow \text{алюминид } Ti_{0,75-x}Al_{0,25}Zr_x + H_2\uparrow,$$

где $0 < x < 0,75$.

На рис. 4 представлены термограмма ГЦ и ДТА-кривая при формировании $Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}$.

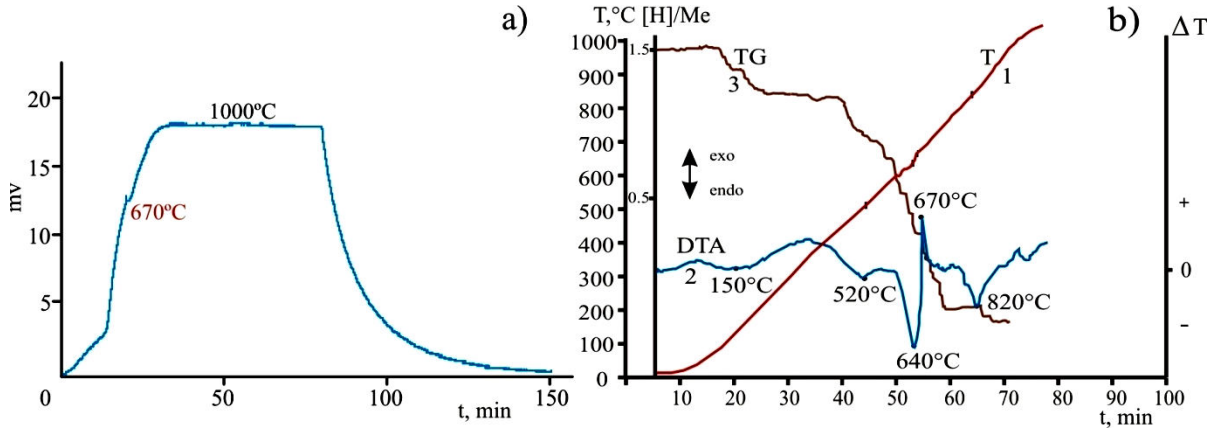


Рис. 4 – *a*)Термограмма формирования алюминида $Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}$ в ГЦ; *b*) ДТА-кривые при нагреве шихты $0,55TiH_2 + 0,2ZrH_2 + 0,25Al$
Fig. 4 – a) Thermogram of formation of aluminide $Ti_{0.55}Al_{0.25}Zr_{0.2}$ in the HC; b) DTA curves with heating of charge $0.55TiH_2 + 0.2ZrH_2 + 0.25Al$

На всех термограммах ГЦ и ДТА-кривых при нагреве исходной шихты $(0,75 – x)TiH_2 + xZrH_2 + 0,25$ Al с ростом температуры наблюдались экзотермические пики при $650 \div 670$ °C, обусловленные взаимодействием Ti и Zr с Al. В зависимости от соотношения TiH_2 и ZrH_2 формируются твердые растворы, B_2 и (α_2) DO_{19} фазы.

4.2.2. Система $xTiH_2 – (1 – x)ZrH_2 – Al$ (разрез TiAl -ZrAl, 50 am% Al)

Реакция формирования алюминидов титана и циркония в режиме ГЦ следующего состава:

$$xTiH_2 + (1 – x)ZrH_2 + Al \rightarrow Ti_xAl\ Zr_{1-x} + H_2\uparrow,$$

где $0 < x < 1$.

На рис. 5 представлена термограмма процесса формирования в ГЦ (*a*) $Ti_{0,4}Zr_{0,1}Al_{0,5}$; и ДТА-кривая при нагреве шихты: (*b*) $0,4TiH_2+0,1ZrH_2+0,5Al$. Все экзоэффекты, зарегистрированные на термограммах и на ДТА кривых, находятся в пределах $530 \div 670$ °C. Продуктами реакции данной системы, в зависимости от соотношения TiH_2 и ZrH_2, являются γ-TiAl и Al_2Zr с различным соотношением фаз.

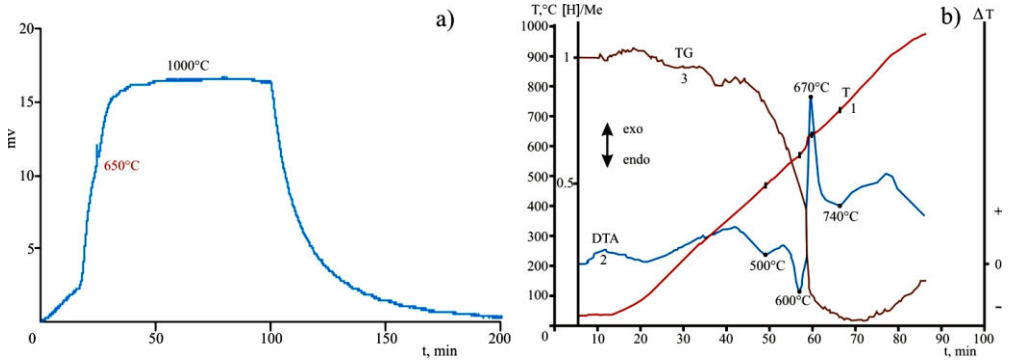


Рис. 5 – Термограмма процесса формирования в ГЦ алюминида (*a*) $Ti_{0,4}Zr_{0,1}Al_{0,5}$; ДТА кривая при нагреве шихты: (*b*) $0,4TiH_2+0,1ZrH_2+0,5Al$
Fig. 5 – Thermogram of the process of formation in the HC of aluminide (a) $Ti_{0.4}Zr_{0.1}Al_{0.5}$; DTA curve when the charge is heated: (b) $0.4TiH_2 + 0.1ZrH_2 + 0.5Al$

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

4.2.3. Система $x(TiH_2) – (1–x) (ZrH_2) – 3Al$ (разрез $TiAl_3 – ZrAl_3$; 75 am% Al)

Триалюминиды Ti, Zr и Hf кристаллизуются с $D0_{22}$ (для Al_3Ti) или $D0_{23}$ (для Al_3Zr) структурами. Ниже представлена реакция формирования триалюминидов Ti и Zr в режиме ГЦ:

$$x\ TiH_2 + (1 - x)ZrH_2 + 3Al \rightarrow (Ti_xZr_{1-x})\ Al_3 + H_2\uparrow,$$

где $0 < x < 1$.

На рис. 6 представлены термограммы ГЦ и ДТА-кривые процесса формирования триалюминидов: (*a*) $Ti_{0,15}Zr_{0,1}Al_{0,75}$; (*b*) $Ti_{0,1}Zr_{0,15}Al_{0,75}$; (*c*) $0,15(TiH_2) + 0,1(ZrH_2) + 0,75Al$ и (*d*) $0,1(TiH_2) + 0,15(ZrH_2) + 0,75Al$.

Для всех изученных составов данной системы с повышением температуры на термограммах ГЦ и на ДТА-кривых (2) при 660 ÷ 670 ºС наблюдались экзоэффекты. Закалка промежуточных продуктов реакций как в ГЦ, так и при ДТА при 670 ºС с последующим фазовым анализом подтвердила формирование триалюминидов.

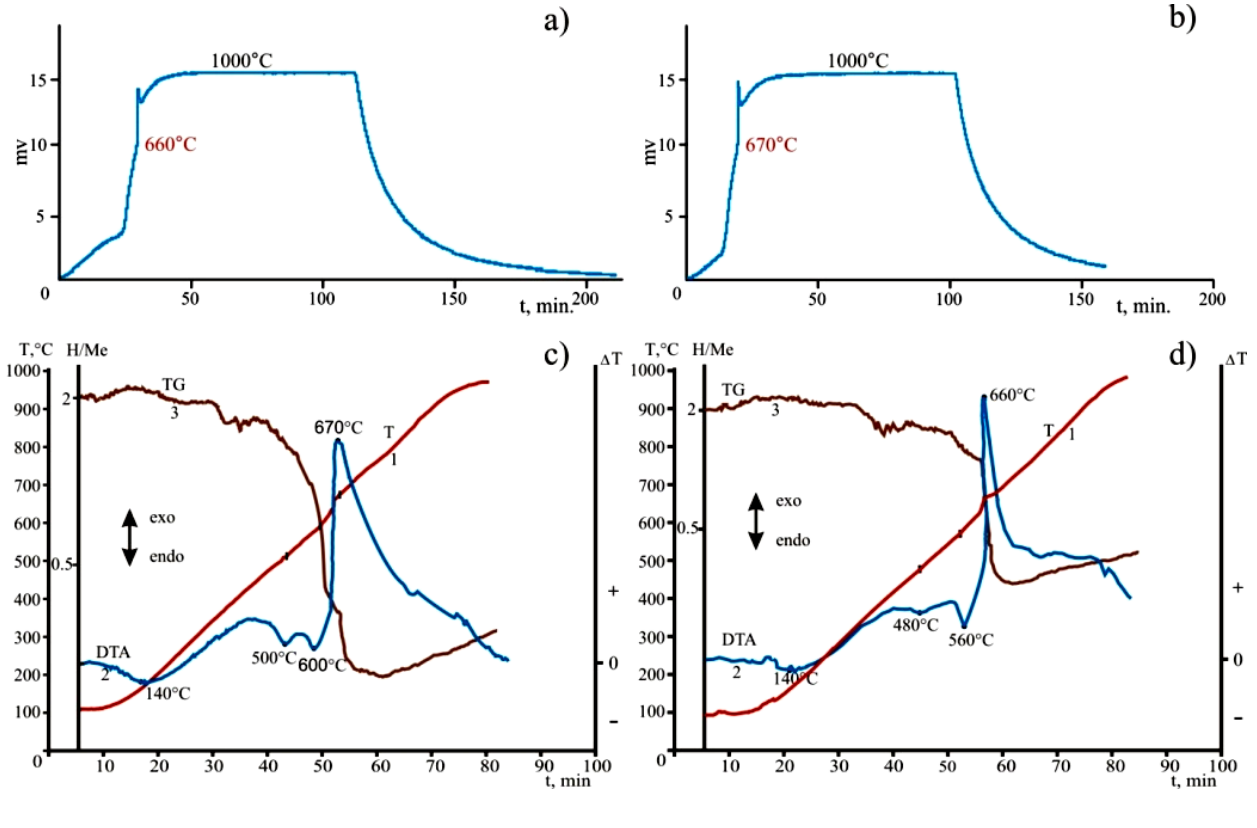


Рис. 6 – Термограммы процесса формирования в ГЦ триалюминидов двух составов:
(*a*) $Ti_{0,15}Zr_{0,1}Al_{0,75}$ и (*b*) $Ti_{0,1}Zr_{0,15}Al_{0,75}$; и ДТА-кривые для смесей
(*c*) $0,15(TiH_2) + 0,1(ZrH_2) + 0,75Al$ и (*d*) $0,1(TiH_2)+0,15(ZrH_2) + 0,75Al$
Fig. 6 – Thermograms of the process of formation of two tri-aluminum compounds in the GC:
(a)$Ti_{0.15}Zr_{0.1}Al_{0.75}$ and (b) $Ti_{0.1}Zr_{0.15}Al_{0.75}$; and DTA curves for the mixtures
(c) 0.15 (TiH_2) + 0.1 (ZrH_2) + 0.75Al and (d) 0.1 (TiH_2) + 0.15 (ZrH_2) + 0.75Al

В зависимости от соотношения TiH_2 и ZrH_2 в шихте, формируются однофазные или двухфазные триалюминиды с ГЦТ ($D0_{23}$) и ($D0_{22}$) структурами: при 1÷15 at.% TiH_2 – однофазные триалюминиды с тетрагональной кристаллической структурой $D0_{23}$ (близкой к структуре $ZrAl_3$ (рис. 7*a* – $Ti_{0,1}Zr_{0,15}Al_{0,75}$); при 15 at.% TiH_2 появляются следы фазы $TiAl_3$; при 20 ат.% TiH_2 – формируется двухфазный алюминид $Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$ (рис. 7*b*), содержащий фазы $TiAl_3(D0_{22})$ и $ZrAl_3(D0_{23})$.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

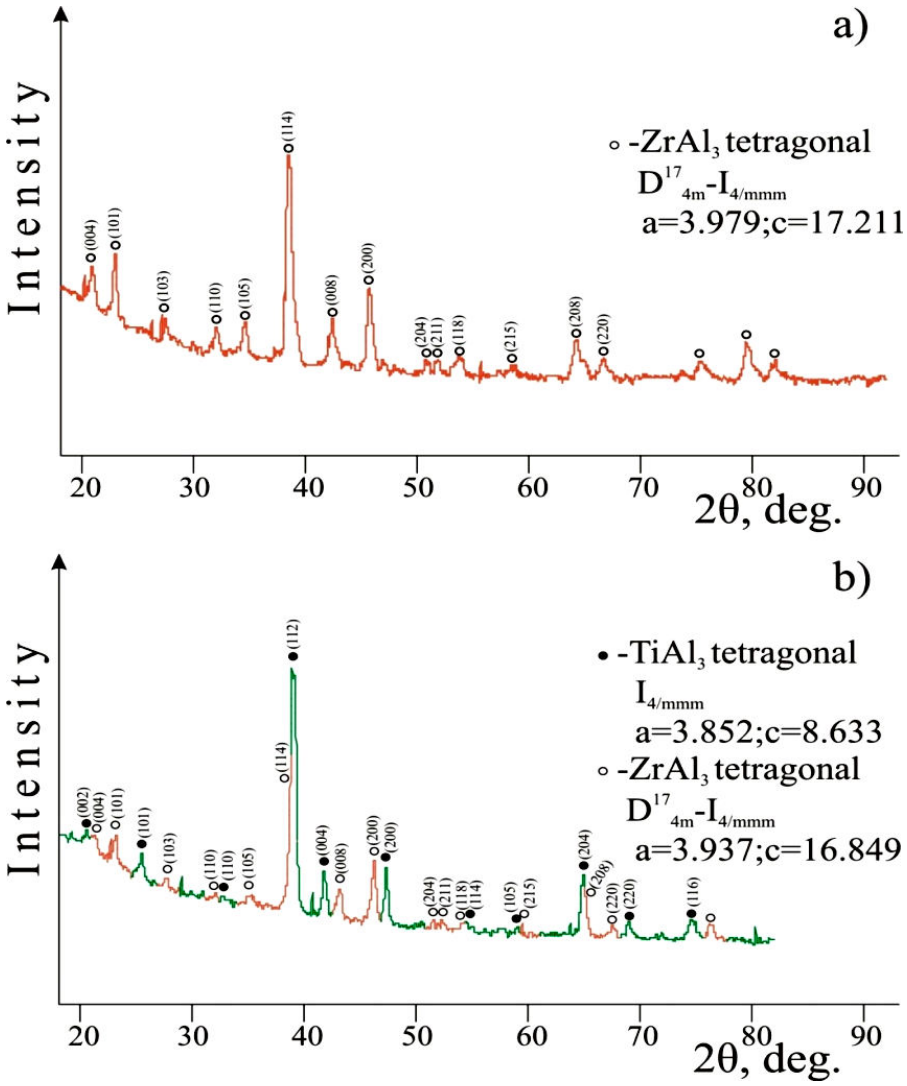


Рис. 7 – Дифракционные картины алюминидов: (*a*) $Ti_{0,1}Zr_{0,15}Al_{0,75}$ и (*b*) $Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$
Fig. 7 – Diffractive patterns of the aluminides: (a) $Ti_{0.1}Zr_{0.15}Al_{0.75}$ and (b) $Ti_{0.2}Zr_{0.05}Al_{0.75}$

4.3. Формирование алюминидов в системе Ti–Al–Nb

Для улучшения эксплуатационных и технологических свойств алюминидов обычно практикуется легирование, при котором в качестве легирующего элемента часто используется ниобий. Это связано с тем, что ниобий обладает высокой прочностью при повышенных температурах, исключительной пластичностью даже при криогенных температурах (до –200 °C), повышенными сверхпроводящими свойствами, малым захватом сечения тепловых нейтронов и др. В системе Ti–Al–Nb ниобий может стабилизировать ОЦК-фазу, которая часто трансформируется в орторомбическую O-фазу. Для высокотемпературного применения эта фаза сохраняет устойчивость к окислению в течение 4 000 часов при рабочих температурах 650 ÷ 700 ºC [20–22].

При нагреве реакционной шихты: например, $(TiH_{2.})_{0,5}+Al_{0,23}+(NbH_{1,23})_{0,27}$ и $(TiH_{2.})_{0,125}+Al_{0,75}+(NbH_{1,23})_{0,125}$ – на термограммах ГЦ и ДТА-кривых (рис. 8) при формировании тройных алюминидов ($Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$; $Ti_{0,33}Al_{0,34}Nb_{0,33}$; $Ti_{0,125}Al_{0,75}Nb_{0,125}$) наблюдались экзопики при 610 ÷ 650 ºC (рис. 8*a* и 8*b*). Как видно, на ДТА-кривой *2* (рис. 8*c*) для состава $(TiH_{2.})_{0,5}+Al_{0,23}+(NbH_{1,23})_{0,27}$ наблюдаются четыре эндоэффекта (при 140 ºC, 300 ºC, 500 ºC и 600 ºC), соответствующие диссоциации $NbH_{1,23}$ и $TiH_{2.}$, и один экзоэффект, обусловленный реакцией формирования $Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$. Очень интересная картина проявляется при ДТА-анализе шихты другого состава – $(TiH_2)_{0,125}+Al_{0,75}+(NbH_{1,23})_{0,125}$ богатого алюминием (рис. 8*d*). Здесь наблюдаются пять эндоэффектов: четыре (при 140 ºC, 300 ºC, 500 ºC и 600 ºC) соответствуют разложению $NbH_{1,23}$ и TiH_2, а пятый, при 660 ºC, по-видимому, связан с плавлением Al. Кроме того, на рис. 8*d* наблюдаются два экзоэффекта при 760 ºC и 890 ºC, появление которых, по данным РФА промежуточных продуктов, обусловлено экзотермическими реакциями образования алюминидов $TiAl_3$ и $NbAl_3$, которые

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

затем взаимно растворяются друг в друге, образуя в конце процесса однофазный $TiNbAl_6$ с параметрами: a = 5,429; c = 8,847 Å. Анализ дифракционных картин полученных интерметаллидов в системе Ti–Al–Nb показал (рис. 9), что в гидридном цикле формируются алюминиды Ti и Nb с ОЦК, β или B_2 фазами и с орторомбической O-фазой (табл. 2) [23].

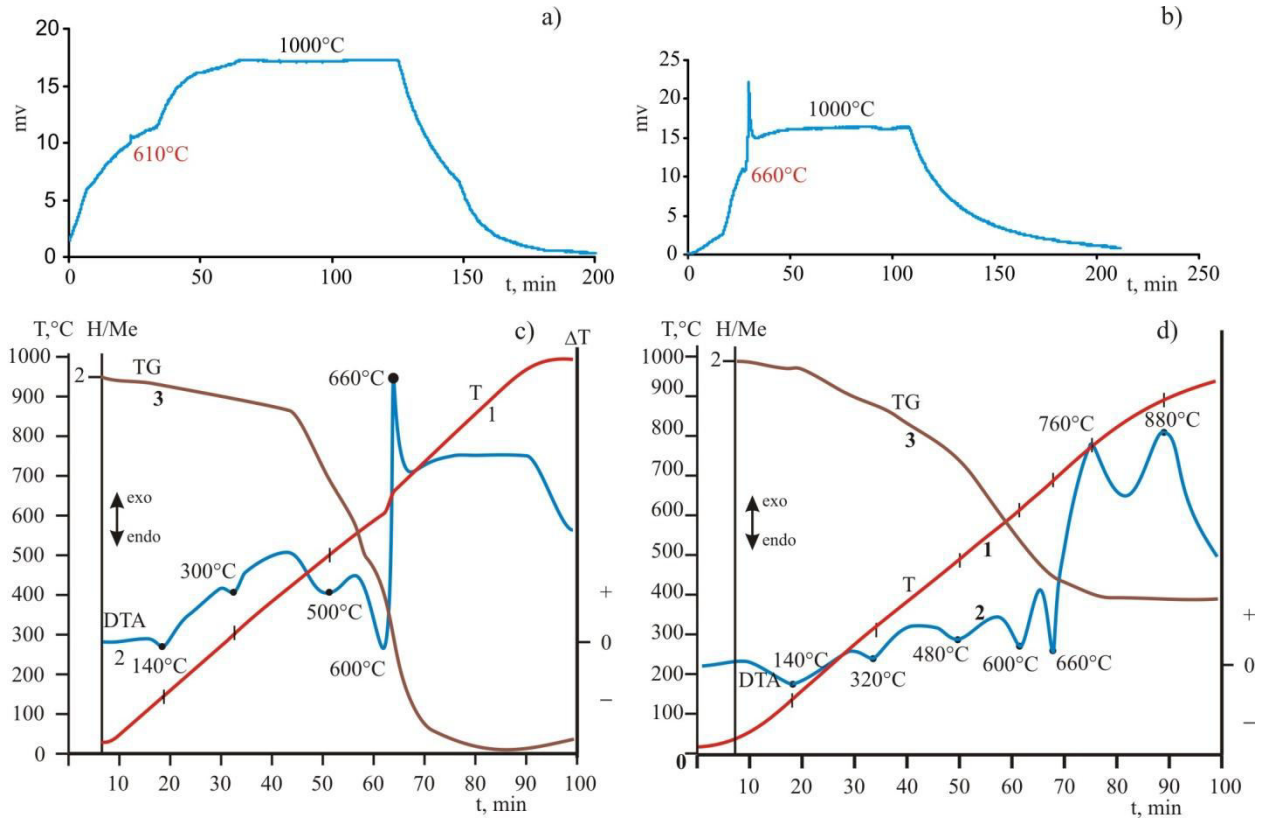


Рис. 8 – Термограммы процесса формирования тройных алюминидов в ГЦ
(*a*) $Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$; (*b*) $Ti_{0,125}Al_{0,75}Nb_{0,125}$ и ДТА-кривые для смесей: (*c*) $(TiH_2)_{0,5}+Al_{0,23}+(NbH_{1,23})_{0,27}$; (*d*) $(TiH_{2.})_{0,125}+Al_{0,75}+(NbH_{1,23})_{0,125}$
Fig. 8 – Thermograms of the formation of triple aluminides in the GC
(a) $Ti_{0.5}Al_{0.23}Nb_{0.27}$; (b) $Ti_{0.125}Al_{0.75}Nb_{0.125}$ and DTA curves for mixtures: (c) $(TiH_2)_{0.5}+Al_{0.23}+(NbH_{1.23})_{0.27}$; (d) $(TiH_{2.})_{0.125}+Al_{0.75}+(NbH_{1.23})_{0.125}$

Таблица 2

Характеристики алюминидов на основе Ti–Al–Nb

Table 2

Characteristics of Ti–Al–Nb-based aluminides

Исходные реагенты, ат %			**Фазовый состав Кристаллическая решетка, Å**	**Формула алюминидов**	**H_2, ат %**	**№ точки в треугольнике**
TiH_2	**Al**	**$NbH_{1,23}$**				
12,5	75	12,5	Тетрагон. a = 5,429; c = 8,847 (тв.раст. $TiAl_3$ в $NbAl_3$)	$Ti_{0,125}Al_{0,75}Nb_{0,125}$	–	8
25	50	25	ОЦК (a = 3,307)+$NbAl_3$+Al(<10%)	$Ti_{0,25}Al_{0,5}Nb_{0,25}$	0,48	7
10	40	50	ОЦК, a = 3,30; $NbAl_3$, тетрагон., a = 5,415; c = 8,642	$Ti_{0,1}Al_{0,4}Nb_{0,5}$	–	11
50	38	12	ОЦК (a = 3,301) + (O-фаза+Al)	$Ti_{0,5}Al_{0,38}Nb_{0,12}$	–	9
33	34	33	ОЦК (a = 3,295) + (O-фаза+Al)	$Ti_{0,33}Al_{0,34}Nb_{0,33}$	0,32	2
45	28	27	ОЦК (a = 3,294) + O-фаза	$Ti_{0,45}Al_{0,28}Nb_{0,27}$	–	12
50	25	25	ОЦК (a = 3,292) + O-фаза	$Ti_{0,5}Al_{0,25}Nb_{0,25}$	1,63	1
25	25	50	ОЦК (a = 3,299) + O-фаза	$Ti_{0,25}Al_{0,25}Nb_{0,5}$	1,04	3
50	23	27	ОЦК (a = 3,298) + O-фаза	$Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$	1,45	6
52	15	33	ОЦК (a = 3,282) + O-фаза	$Ti_{0,5}Al_{0,15}Nb_{0,33}$	1,91	4
25	15	60	ОЦК (a = 3,299) + O-фаза	$Ti_{0,25}Al_{0,15}Nb_{0,6}$	1,28	10
52	6	42	ОЦК (a = 3,301) + O-фаза	$Ti_{0,52}Al_{0,06}Nb_{0,42}$	2,31	5

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

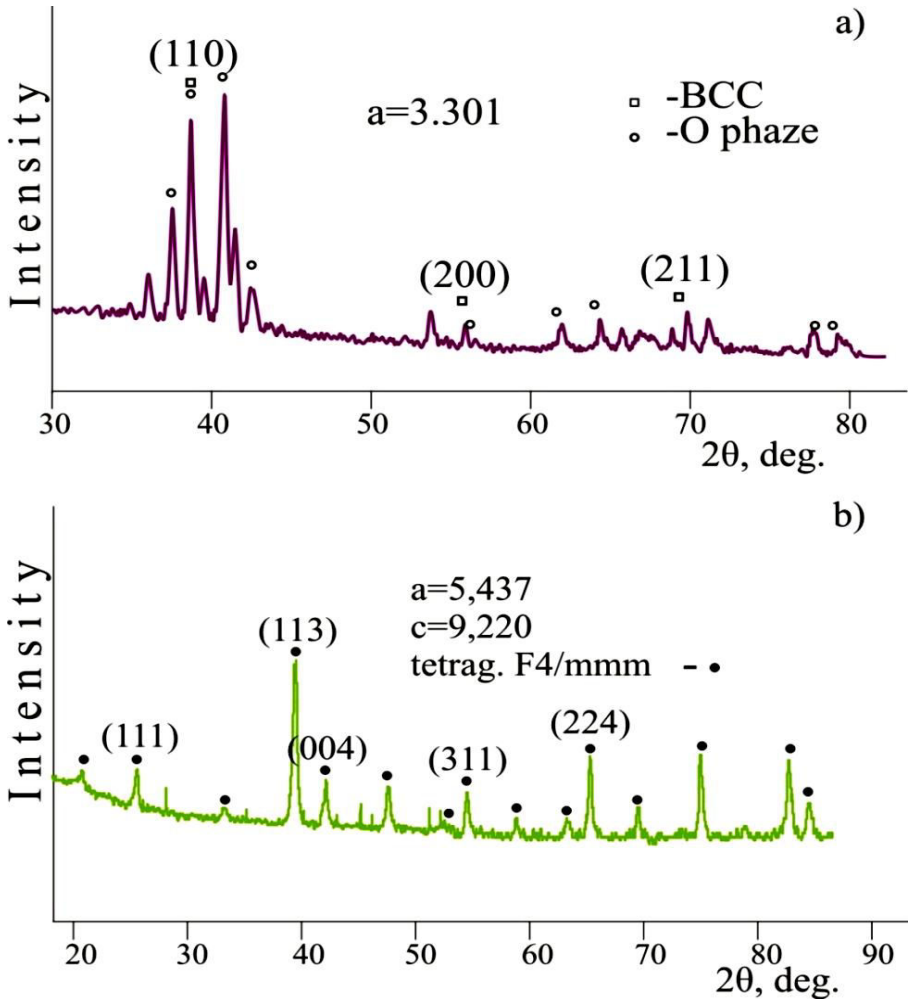


Рис. 9 – Дифракционные картины алюминидов: *a*) $Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$; *b*) $Ti_{0,125}Al_{0,75}Nb_{0,125}$
Fig. 9 – Diffraction patterns of the aluminides: a) $Ti_{0.5}Al_{0.23}Nb_{0.27}$; b) $Ti_{0.125}Al_{0.75}Nb_{0.125}$

Таким образом, проведенные систематические исследования условий формирования алюминидов в ГЦ позволили установить влияние параметров процесса, химических особенностей гидридов, соотношений исходных компонентов, фазовых превращений в процессе дегидрирования на процесс формирования алюминидов. Исходя из результатов исследований закономерностей процессов ГЦ, протекающих в системах Ti–Al; Zr–Al; Nb–Al; Ti–Zr–Al и Ti–Nb–Al, а также из данных ДТА, которые проводились в условиях, близких к условиям ГЦ, был предложен следующий механизм формирования алюминидов металлов IV–V групп. При нагреве скомпактированных смесей $xMeH_2 + (1 - x)Al \rightarrow Me_xAl_{1-x} + H_2\uparrow$ происходит диссоциация водорода из гидридов, вследствие чего разрушаются связи Me–H. В атмосфере выделившегося водорода происходит очистка от окисной пленки, которая обычно присутствует на порошках металлов. В результате образуются очень активные металлы, которые мгновенно взаимодействуют с алюминием по твердофазному механизму, минуя плавление алюминия. Вначале, уже при $T = 600 \div 640$ ºС, начинается экзотермическая реакция формирования триалюминидов ($T_{пл.} = 1\,680 \div 2\,100$ ºС) на поверхности зерен металлов, что исключает плавление алюминия. Об этом свидетельствуют термограммы процесса ГЦ, ДТА-кривые и внешний вид образцов (следов плавления нет). С повышением температуры нагрева до 1 000 ºС, к концу процесса ГЦ, за счет дальнейшей диффузии алюминия в металл, происходит формирование различных фаз алюминидов. Только в одном случае на ДТА-кривой (рис. 8*d*) для шихты состава $(TiH_2)_{0,125}+Al_{0,75}+ (NbH_{1,23})_{0,125}$ наблюдался эндоэффект при 660 ° С, соответствующий плавлению алюминия [23].

Были проведены исследования процессов горения полученных алюминидов в водороде методом СВС. В результате показано, что компактные алюминиды, содержащие $25 \div 40$ ат.%Al, легко, без предварительного дробления, взаимодействуют с водородом ($P_H = 5 \div 10$ атм.; $T_{гор.} = 300 \div 500$ ºС), формируя гидриды, содержащие $1{,}12 \div 2{,}49$ вес. % H_2 (табл. 3) Все полученные гидриды были обратимыми, например: $Ti_{0,375}Al_{0,25}Zr_{0,375} + H_2 \leftrightarrow Ti_{0,375}Al_{0,25}Zr_{0,375}H_{0,99}$.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 3

Характеристики гидридов алюминидов

Table 3

Characteristics of hydrides of aluminides

Система	Хим.состав гидридов алюминидов	Фазовый состав	Параметр кристалл. решетки, А	Содержание водорода, в вес %	Температура диссоциации, °С		Условия эксперимента (СВС) P_H атм / $T_Г$°С
					1-ый эндо эффект °С	2-ый эндоэффект °С	
Ti + H_2	TiH_2	ГЦК, тип CaF_2	a = 4,60	4,01; H/Me = 2	410	610	5 / 800
$Ti_{0,9}Al_{0,1}$ + H_2	$Ti_{0,9}Al_{0,1}H_{1,17}$	ГЦК, тип CaF_2	a = 4,455	2,49; H/Me = 1,17	380	620	10 / 483
$Ti_{0,8}Al_{0,2}$ + H_2	$Ti_{0,8}Al_{0,2}H_{1,15}$	ГЦК, тип CaF_2	a = 4,442	2,57; H/Me = 1,15	379	610	10 / 501
$Ti_{0,75}Al_{0,25}$ + H_2	$Ti_{0,75}Al_{0,25}H_{1,0}$	ГЦК, тип CaF_2	–	2,27; H/Me = 1	400	–	15 / 250
Zr + H_2	ZrH_2	ОЦТ	a =3,518; c=4,45	2,01; H/Me = 2	440;	800	5 / 600
Zr_3Al+ H_2	Zr_3 Al $H_{4,49}$	ОЦТ + Х-фаза	a =3,516 c= 4,473	1,47; H/Me =1,49	380	500; 3-ий э.э - 780	5 / 400
Nb+ H_2	$NbH_{1,23}$	Орто-ромб.	a =4,451; b=4,878; c=3,453	1,31; H/Me =1,3	140	480	5 / 350
Nb_3Al+ H_2	$Nb_3AlH_{3,4}$	ГЦК	–	1,12; H/Me = 0,85	140	380	10 / 220
$Ti_{0,52}Al_{0,15}Nb_{0,33}$ +H_2	$Ti_{0,52}Al_{0,15}Nb_{0,33}H_{1,16}$	–	–	1,91	260°	320	5 / 350
$Ti_{0,52}Al_{0,06}$ $Nb_{0,42}$+H_2	$Ti_{0,52}Al_{0,06}$ $Nb_{0,42}H_{1,55}$	–	–	2,31	–	–	5 / 380
$Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}$+ H_2	$Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}H_{0,67}$	–	–	1,32	–	–	5 / 430

На рис. 10 представлена фотография гидрида $Ti_{0,375}Al_{0,25}Zr_{0,375}H_{0,99}$.

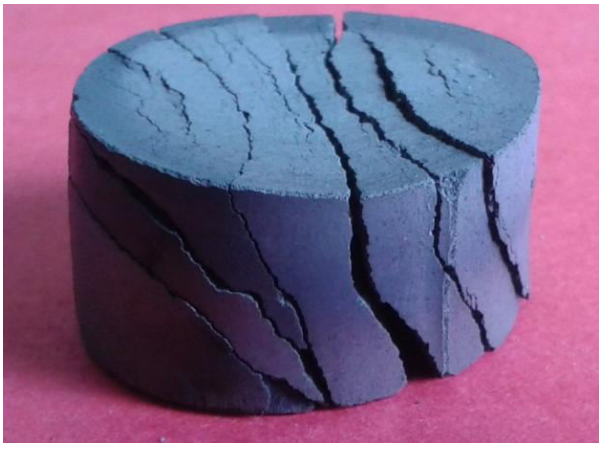


Рис. 10 – Гидрид алюминида $Ti_{0,375}Al_{0,25}Zr_{0,375}H_{0,99}$
Fig. 10 – Hydride of aluminide $Ti_{0.375}Al_{0.25}Zr_{0.375}H_{0.99}$

На рис. 11. представлена термограмма процесса горения алюминида $Nb_{0,75}Al_{0,25}$ в атмосфере водорода при P = 5 атм. По данным ДТА разложение гидрида $Nb_{0,75}Al_{0,25}H_{0,85}$ происходит с одним эндоэффектом при 380 °С.

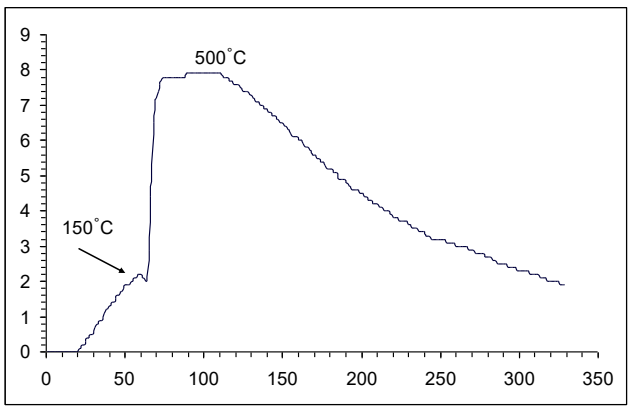


Рис. 11 – Термограмма процесса горения алюминида $Nb_{0,75}Al_{0,25}$ в атмосфере водорода
Fig. 11 – Thermogram of the combustion of aluminide $Nb_{0.75}$ $Al_{0.25}$ in a hydrogen atmosphere

На рис. 12 представлена дифракционная картина $Nb_{0,75}Al_{0,25}H_{0,85}$, которую однозначно идентифицировать трудно.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

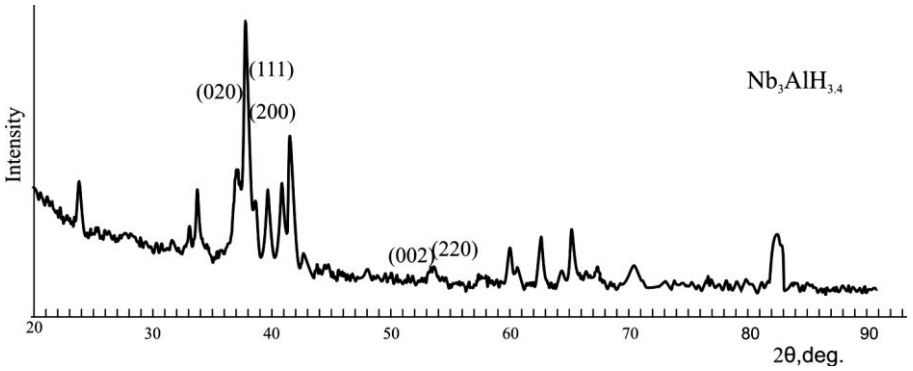


Рис. 12 – Дифракционная картина $Nb_{0,75}Al_{0,25}H_{0,85}$
Fig. 12 – The diffraction pattern $Nb_{0.75}Al_{0.25}H_{0.85}$

В сводной табл. 4 (*а*, *б*, *в*, *г*) приведены значения тепловых эффектов, сопровождающих формирование бинарных и тройных алюминидов на основе титана и циркония как в ГЦ, так и при термическом анализе (ДТА).

Таблица 4

Температуры эндо- и экзоэффектов при формировании алюминидов в ГЦ и при ДТА-анализе

Table 4

The temperatures of endo and exo effects in the formation of aluminides in GC and in DTA analysis

а) **$Me(M')_3Al$**				
Тепловые эффекты	α_2-Ti_3Al, $Ti_{0,75}Al_{0,25}$	Zr_3Al ($Zr_{0,75}Al_{0,25}$)	$Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}$	$Ti_{0,25}Al_{0,25}Zr_{0,5}$
Температуры начала экзоэффектов в ºС из термограмм ГЦ				
Экзоэффект	660	670	670	660
Температуры тепловых эффектов из ДТА-кривых				
Экзоэффект	670	630	670	650
Эндоэффект	480 и 600	150;550; 790	150;520; 640; 820	150; 480; 570; 780
***б*) Me(M')Al**				
Тепловые эффекты	γ-TiAl	ZrAl	$Ti_{0,4}Zr_{0,1}Al_{0,5}$	$Ti_{0,45}Zr_{0,05}Al_{0,5}$
Температуры начала экзоэффектов в ºС из термограмм ГЦ				
Экзоэффект	650	650	670	660
Температуры тепловых эффектов из ДТА-кривых в ºС				
Экзоэффект	670	670	670	680
Эндоэффект	530 и 630	150; 520; 800	150; 500; 600; 740	150; 510; 620; 730
в) $Me(M')Al_3$				
Тепловые эффекты	$TiAl_3$	$ZrAl_3$	$Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$	$Ti_{0,05}Zr_{0,2}Al_{0,75}$
Температуры начала экзоэффектов в ºС из термограмм ГЦ				
Экзоэффект	650	650	670	660
Температур тепловых эффектов из ДТА-кривых в ºС				
Экзоэффект	680	670	680	670
Эндоэффект	440 и 600	550	140; 510; 600; 720	140;480; 570; 780
г) Ti – Al – Nb				
Тепловые эффекты	$Ti_{0,5}Al_{0,23}Nb_{0,27}$	$Ti_{0,333}Al_{0,333}Nb_{0,334}$		$Ti_{0,125}Al_{0,75}Nb_{0,125}$.
Температуры начала экзоэффектов в ºС из термограмм ГЦ				
Экзоэффект	Начало 610; максимум 690	Начало 650; максимум 820		Начало 660; максимум 1 400
Эндоэффект	–	–		–
Температуры тепловых эффектов из ДТА кривых в °С				
Экзоэффект	660	680		760 и 880
Эндоэффект	140, 300,480 и 600 при разложении $NbH_{1,23}$ и TiH_2	140, 300,500 и 600 при разложении $NbH_{1,23}$ и TiH_2		140, 300, 500, 600 при раз-ложении $NbH_{1,23}$ и TiH_2 ; и 660 при плавлении Al

Исходя из результатов, полученных при изучении процессов формирования алюминидов титана и циркония, построен концентрационный треугольник системы Ti–Al–Zr (рис. 13), на сторонах которого нанесены составы алюминидов титана (Ti–Al) [13], алюминидов циркония (Zr–Al) [14] и

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ранее исследованных сплавов на основе Ti–Zr, синтезированных методом ГЦ [6]. Внутри треугольника показаны расположения однофазных и двух-трех фазных алюминидов на основе титана и циркония.

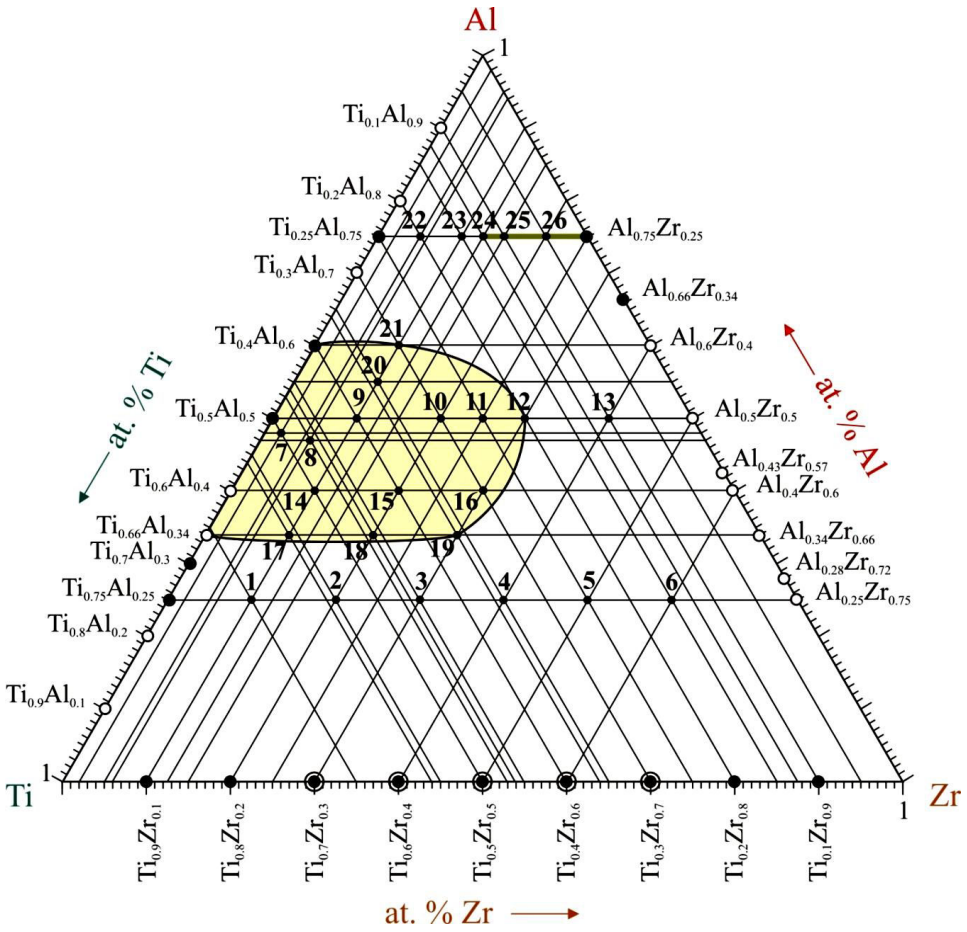


Рис. 13 – Концентрационный треугольник системы Ti-Al-Zr.
На разрезе Ti_3Al - Zr_3Al (25% Al) показан фазовый состав алюминидов по точкам:
1 – $Ti_{0,65}Al_{0,25}Zr_{0,1}$ (DO_{19} + B_2); *2* – $Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}$ (B_2 + $D0_{19}$); *3* – $Ti_{0,45}Al_{0,25}Zr_{0,3}$ (B_2+ $D0_{19}$);
4 –$Ti_{0,35}Al_{0,25}Zr_{0,4}$ (B_2 + тв. раст. Al и Ti в Zr); *5* – $Ti_{0,25}Al_{0,25}Zr_{0,5}$ (тв. раст. Al и Ti в Zr + B_2);
6 – $Ti_{0,15}Al_{0,25}Zr_{0,6}$ (Тв. раст. Al и Ti в Zr + B_2).
На разрезе TiAl – ZrAl (50% Al) – показан фазовый состав алюминидов по точкам:
7 – $Ti_{0,5}Al_{0,48}Zr_{0,02}$(γ-TiAl+X-фаза); *8* – $Ti_{0,47}Al_{0,47}Zr_{0,06}$(γ-TiAl+$Al_2Zr$); *9* – $Ti_{0,4}Al_{0,5}Zr_{0,1}$(γ-TiAl+Al_2Zr); *10* – $Ti_{0,3}Al_{0,5}Zr_{0,2}$(Al_2Zr+γ-TiAl);
11 – $Ti_{0,25}Al_{0,5}Zr_{0,25}$($Al_2Zr$ + γ-TiAl); *12* – $Ti_{0,2}Al_{0,5}Zr_{0,3}$ (Al_2Zr + γ-TiAl); *13* – $Ti_{0,1}Al_{0,5}Zr_{0,4}$; *14* – $Ti_{0,5}Al_{0,4}Zr_{0,1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$);
15 – $Ti_{0,4}Al_{0,4}Zr_{0,2}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *16* – $Ti_{0,3}Al_{0,4}Zr_{0,3}$ ($ZrAl_2$+γ-TiAl); *17* – $Ti_{0,56}Al_{0,34}Zr_{0,1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *18* – $Ti_{0,46}Al_{0,34}Zr_{0,2}$; (γ-TiAl + $ZrAl_2$);
19 – $Ti_{0,36}Al_{0,34}Zr_{0,3}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *20* – $Ti_{0,35}Al_{0,55}Zr_{0,1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *21* – $Ti_{0,3}Al_{0,6}Zr_{0,1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$).
На разрезе $TiAl_3$ – $ZrAl_3$ (75%Al) показан фазовый состав однофазных и двухфазных триалюминидов: *22* – $Ti_{0,2}Al_{0,75}Zr_{0,05}$ ($TiAl_3$ + $ZrAl_3$); *23* – $Ti_{0,15}Al_{0,75}Zr_{0,1}$ ($ZrAl_3$+ следы$TiAl_3$); *24* – $Ti_{0,125}Al_{0,75}Zr_{0,125}$($ZrAl_3$); *25* – $Ti_{0,1}Al_{0,75}Zr_{0,15}$($ZrAl_3$); *26* – $Ti_{0,05}Al_{0,75}Zr_{0,2}$ ($ZrAl_3$)

Fig. 13 – Concentration triangle of the Ti-Al-Zr system.
The Ti_3Al-Zr_3Al (25% Al) section shows the phase composition of the aluminides by the points: *1* – $Ti_{0.65}Al_{0.25}Zr_{0.1}$ (DO_{19} + B_2);
2 – $Ti_{0.55}Al_{0.25}Zr_{0.2}$ (B2 + D019); *3* – $Ti_{0.45}Al_{0.25}Zr_{0.3}$ (B_2 + $D0_{19}$); *4* – $Ti_{0.35}Al_{0.25}Zr_{0.4}$ (B_2 + Tv of Al and Ti in Zr);
5 – $Ti_{0.25}Al_{0.25}Zr_{0.5}$ (Tv of Al and Ti in Zr + B_2); *6* – $Ti_{0.15}Al_{0.25}Zr_{0.6}$ (Tv of Al and Ti in Zr + B_2).
The TiAl-ZrAl (50% Al) section shows the phase composition of the aluminides by points:
7 – $Ti_{0.5}Al_{0.48}Zr_{0.02}$ (γ-TiAl + Xphase); *8* – $Ti_{0.47}Al_{0.47}Zr_{0.06}$ (γ-TiAl + Al_2Zr); *9* – $Ti_{0.4}Al_{0.5}Zr_{0.1}$ (γ-TiAl + Al_2Zr); *10* – $Ti_{0.3}Al_{0.5}Zr_{0.2}$ (Al_2Zr + γ-TiAl);
11 – $Ti_{0.25}Al_{0.5}Zr_{0.25}$ (Al_2Zr + γ-TiAl); *12* – $Ti_{0.2}Al_{0.5}Zr_{0.3}$ (Al_2Zr + γ-TiAl); *13* – $Ti_{0.1}Al_{0.5}Zr_{0.4}$; *14* – $Ti_{0.5}Al_{0.4}Zr_{0.1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$);
15 – $Ti_{0.4}Al_{0.4}Zr_{0.2}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *16* – $Ti_{0.3}Al_{0.4}Zr_{0.3}$ ($ZrAl_2$ + γ-TiAl); *17* – $Ti_{0.56}Al_{0.34}Zr_{0.1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$);
18 – $Ti_{0.46}Al_{0.34}Zr_{0.2}$; (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *19* – $Ti_{0.36}Al_{0.34}Zr_{0.3}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *20* – $Ti_{0.35}Al_{0.55}Zr_{0.1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$); *21* – $Ti_{0.3}Al_{0.6}Zr_{0.1}$ (γ-TiAl + $ZrAl_2$).
The $TiAl_3$ -$ZrAl_3$ (75% Al) section shows the phase composition of single-phase and two-phase tri-aluminum compounds:
22 – $Ti_{0.2}Al_{0.75}Zr_{0.05}$ ($TiAl_3$ + $ZrAl_3$); *23* – $Ti_{0.15}Al_{0.75}Zr_{0.1}$ ($ZrAl_3$ + traces of $TiAl_3$); *24* – $Ti_{0.125}Al_{0.75}Zr_{0.125}$ ($ZrAl_3$); *25* – $Ti_{0.1}Al_{0.75}Zr_{0.15}$ ($ZrAl_3$);
26 – $Ti_{0.05}Al_{0.75}Zr_{0.2}$ ($ZrAl_3$)

Для системы Ti–Al–Nb построен второй концентрационный треугольник (рис. 14), на сторонах которого нанесены составы алюминидов титана (Ti–Al) и ниобия (Nb–Al) и сплавов на основе Ti–Nb, синтезированных методом ГЦ [15]. Внутри треугольника показаны расположения тройных алюминидных фаз для 12-и составов, содержащих орторомбическую фазу (см. табл. 3).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

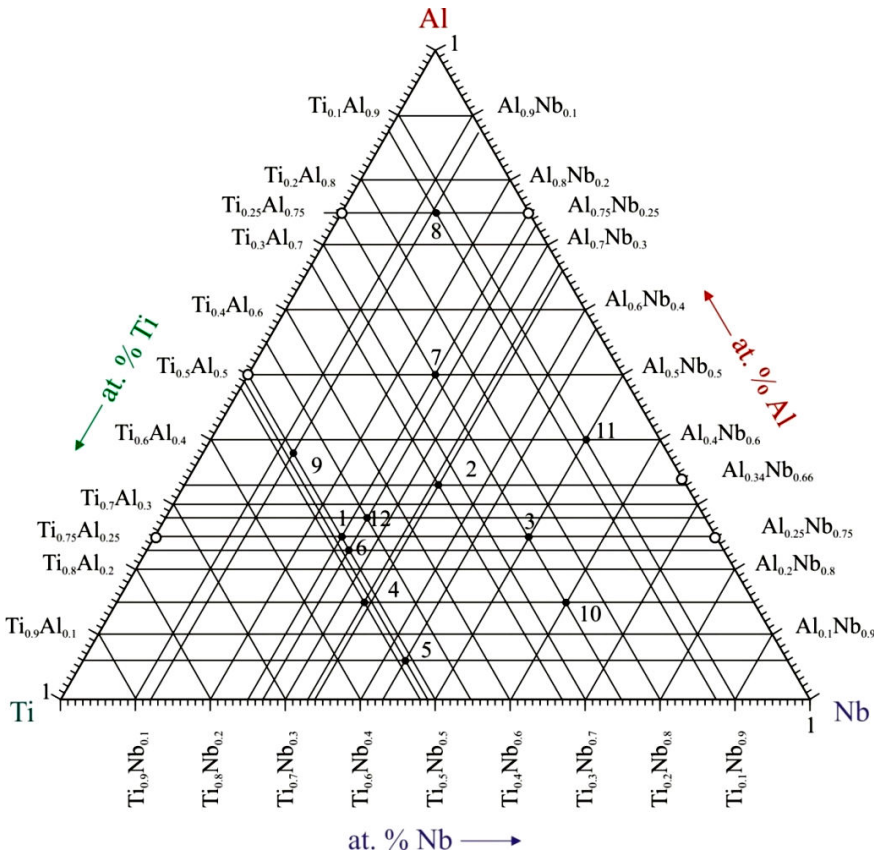


Рис. 14 – Концентрационный треугольник (ат.%) системы Ti–Al–Nb: *1* – $Ti_{0.5}Al_{0.25}Nb_{0.25}$; *2* – $Ti_{0.33}Al_{0.34}Nb_{0.33}$; *3* – $Ti_{0.25}Al_{0.25}Nb_{0.5}$; *4* – $Ti_{0.5}Al_{0.15}Nb_{0.33}$; *5* – $Ti_{0.52}Al_{0.06}Nb_{0.42}$; *6* – $Ti_{0.5}Al_{0.23}Nb_{0.27}$; *7* – $Ti_{0.25}Al_{0.5}Nb_{0.25}$; *8* – $Ti_{0.125}Al_{0.75}Nb_{0.125}$; *9* – $Ti_{0.5}Al_{0.38}Nb_{0.12}$; *10* – $Ti_{0.25}Al_{0.15}Nb_{0.6}$; *11* – $Ti_{0.1}Al_{0.4}Nb_{0.5}$; *12* – $Ti_{0.45}Al_{0.28}Nb_{0.27}$

Fig. 14 – Concentration triangle (at%) of the system Ti–Al–Nb: *1* – $Ti_{0.5}Al_{0.25}Nb_{0.25}$; *2* – $Ti_{0.33}Al_{0.34}Nb_{0.33}$; *3* – $Ti_{0.25}Al_{0.25}Nb_{0.5}$; *4* – $Ti_{0.5}Al_{0.15}Nb_{0.33}$; *5* – $Ti_{0.52}Al_{0.06}Nb_{0.42}$; *6* – $Ti_{0.5}Al_{0.23}Nb_{0.27}$; *7* – $Ti_{0.25}Al_{0.5}Nb_{0.25}$; *8* – $Ti_{0.125}Al_{0.75}Nb_{0.125}$; *9* – $Ti_{0.5}Al_{0.38}Nb_{0.12}$; *10* – $Ti_{0.25}Al_{0.15}Nb_{0.6}$; *11* – $Ti_{0.1}Al_{0.4}Nb_{0.5}$; *12* – $Ti_{0.45}Al_{0.28}Nb_{0.27}$

К сожалению, чистой орторомбической фазы не удалось синтезировать ни при каких изменениях условий эксперимента, доступных в Лаборатории. Фактически, присутствие ниобия, независимо от содержания, всегда стабилизирует ОЦК-фазу, где наряду с ней появляется орторомбическая фаза. Согласно [21, 22], предполагается, что ОЦК-фаза, в результате последовательных фазовых превращений, частично трансформируется в орторомбическую.

Заключение

В рамках исследования ГЦ синтезированы более 30 алюминидов: однофазные алюминиды α_2-Ti_3Al; γ-TiAl; $TiAl_3$; твердые растворы алюминия в цирконии состава Zr_3Al, сопровождаемые различными алюминидными фазами (Zr_4Al_3; ZrAl; Zr_2Al_3), однофазные алюминиды $ZrAl_2$; $ZrAl_3$ и гидрид $Zr_3AlH_{4,49}$; однофазные алюминиды ниобия $NbAl_3$; Nb_2Al и Nb_3Al, содержащие около 10 % Nb_2Al; $Ti_{0,35}Zr_{0,4}Al_{0,25}$; $Ti_{0,55}Zr_{0,2}Al_{0,25}$; $Ti_{0,25}Al_{0,5}Nb_{0,25}$; $Ti_{0,45}Al_{0,28}Nb_{0,27}$ и др. Показано, что некоторые алюминиды без предварительного дробления взаимодействуют с водородом в режиме СВС с образованием обратимых гидридов.

На формирование алюминидов металлов IV–V группы в ГЦ существенное влияние оказывают: природа химической связи Me–H; фазовые переходы; дефектность структуры; физические свойства гидридов – пластичность, высокая диспергируемость до микронных, субмикронных и наномасштабных размеров в зерне порошка; химические свойства (высокое содержание водорода, низкие $T_{\text{диссоц.}}$).

Построены концентрационные треугольники для: Ti–Al–Nb – показаны расположения тройных алюминидных фаз внутри треугольника для 12-и составов, содержащих орторомбическую O-фазу; Ti–Al–Zr – показаны расположения тройных алюминидных фаз внутри треугольника для 26 составов, содержащих $B_2 + D0_{19}$, γ-TiAl и другие фазы.

Определены преимущества метода гидридного цикла при синтезе алюминидов переходных металлов относительно традиционных (индукционная и дуговая плавка и т.д.), а именно:

– Снижение температур процесса формирования сплавов (с $1\,800 \div 2\,600$ °C до $600 \div 1\,200$ °C) и длительности (с десятков часов до $1{,}5 \div 2$ часа), следовательно, низкие энергозатраты, поскольку формирование сплавов происходит по твердофазному механизму, минуя плавление.

– Получение сплавов как бинарных, так и многокомпонентных заданного состава в одну технологическую стадию.

– Высокопроизводительный процесс формирования алюминидов.

– Вместо необходимых дорогих мелкодисперсных порошков тугоплавких металлов в качестве исходных материалов используются более дешевые СВС-гидриды, полученные в высокоэффективном, энергосберегающем технологическом процессе из

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

отходов при механической обработке тугоплавких металлов.

– Синтез $Ti_{0,25}Al_{0,75}$, $Zr_{0,25}Al_{0,75}$; $Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}Ti_{0,2}Zr_{0,05}Al_{0,75}$ и других составов происходит при сравнительно низких температурах (650 ÷ 670 ºС).

Все вышеперечисленные преимущества синтеза алюминидов переходных металлов позволяют упростить технологический процесс, снизить энергозатраты и повысить качество полученных алюминидов.

Компактные алюминиды переходных металлов, содержащие 25 ÷ 40ат. %Al, легко, без предварительного дробления, взаимодействуют с водородом (P_H = = 5 ÷ 10 атм.; $T_{гор.}$= 300 ÷ 500 ºС), формируя гидриды, содержащие 1,12 ÷ 2,49 вес.% H_2: $Ti_{0,9}Al_{0,1}H_{1,17}$; $Ti_{0,8}Al_{0,2}H_{1,15}$; $Ti_{0,75}Al_{0,25}H_{1,0}$; $Zr_{0,75}Al_{0,25}H_{1,12}$; $Nb_{0,75}Al_{0,25}H_{0,85}$; $Ti_{0,55}Al_{0,25}Zr_{0,2}H_{0,67}$; $Ti_{0,5}Al_{0,15}$ $Nb_{0,33}H_{1,14}$; $Ti_{0,25}Al_{0,15}$ $Nb_{0,6}H_{0,93}$; $Ti_{0,52}Al_{0,06}$ $Nb_{0,42}H_{1,56}$ и др. Все полученные гидриды являются обратимыми.

Список литературы

[1] Kazantseva, N.V. Severe plastic deformation and hydrogenation of titanium aluminides / N.V. Kazantseva [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – No. 38. – P. 9307–9311.

[2] Rodríguez, C. Nanostructured Al–$ZrAl_3$ materials consolidated via spark plasma sintering: Evaluation of their mechanical properties / C. Rodríguez [et al.] Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 550. – P. 402–407.

[3] Zhao, Liu. Preparation of Nb_3Al superconductor by powder metallurgy / Liu Zhao [et al.] // J. Mod. Transport. – 2014. – Vol. 22. – No. 1. – P.55–60.

[4] Azevedo, G. Synthesis and Characterization of Aluminum–Zirconium Intermetallic Composites / G. Azevedo, D. B. Santos // Journal of Materials Synthesis and Processing. – 2000. – Vol. 8. – No. 5. – P. 101–107.

[5] Milanese, C. Ignition and reaction mechanism of Co–Al and Nb–Al intermetallic compounds prepared by combustion synthesis / C. Milanese [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. – Vol. 421. – P. 156–161.

[6] Долуханян, С.К. Особенности формирования структур сплавов в системе Ti–Zr–H / С.К. Долуханян [и др.] // Химическая физика. – 2007. – Т. 26. – № 11. – С. 36–43.

[7] Способ получения компактных гидридов переходных металлов. Патент РА № 2299A C01B 6/00 /Долуханян С.К., Алексанян А.Г. – 2009.

[8] Способ получения сплавов переходных металлов. Патент РА № 2308A C22C 1/04 / Долуханян С.К., Алексанян А.Г. – 2009.

[9] Dolukhanyan, S.K. Synthesis of Transition Metal Hydrides and a New Process for Production of Refractory Metal Alloys: An Autoreview / S.K. Dolukhanyan [et al.] // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2010. – Vol. 19. – No. 2. – P. 85–93.

[10] Aleksanyan, A.G. Formation of alloys in Ti–V system in hydride cycle and synthesis of their hydrides in self-propagating high-temperature synthesis regime / A.G. Aleksanyan [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 786– 789.

[11] Aleksanyan, A.G. Formation of alloys in the Ti–Nb system by hydride cycle method and synthesis of their hydrides in self-propagating high-temperature synthesis / A.G. Aleksanyan [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37. – P. 14234–14239.

[12] Долуханян, С.К. Развитие водородного материаловедения в Армении: синтез гидридов переходных металлов и разработка новых технологий получения сплавов / Долуханян С.К. Монография Под ред. д-ра тех. наук, проф. А.С. Буйновского «Редкие и редкоземельные металлы». – Томск: Изд-во НТЛ., 2014. – P. 329–351.

[13] Dolukhanyan, S.K. Synthesis of Titanium Aluminides by Hydride Cycle Process / S.K.Dolukhanyan [et al.] // International Journal of Self Propagating HighTemperature Synthesis. – 2014. – Vol. 23. – No. 2. – P. 78–82.

[14] Мурадян, Г.Н. Особенности формирования алюминидов циркония в режиме гидридного цикла / Г.Н. Мурадян // Химический журнал Армении. – 2016. – Т. 69. – № 4. – С. 416–427.

[15] Долуханян, С. К. Исследование процесса формирования алюминидов ниобия в гидридном цикле / С. К. Долуханян [и др.] // Химическая Физика. – 2015. – Т. 34. – № 9. – С. 1–8.

[16] Edited by A. A. Borisov, L. De Luca, and A.G. Merzhanov. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials. Combustion Science and Technology Book Series. / S.K. Dolukhanyan. – SHS of Binary and Complex Hydrides. – New York: Taylor & Francis, 2002. – P. 219–237.

[17] Долуханян, С.К. СВС-метод получения аккумуляторов водорода / С.К. Долуханян // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2005. – № 11. – С.13–16.

[18] Merzhanov, A.G. Self propagating High Temperature Synthesis of Refractory Inorganic Composites / A.G. Merzhanov, I.P. Borovinskaya // Dokl. AN SSSR. – 1972. –Vol. 204. – № 2. – P. 366–369.

[19] Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Т. 1–3. / Н.П. Лякишев. – М.: Машиностроение, 2000. – 992с.

[20] Tretyachenko, L. Light Metal Systems. Al–Ti–Zr, Al–Nb–Ti / L. Tretyachenko. – Heidelberg: Springer / GmbH, 2005, P. 54–59; 334–379 p.

[21] Lu, Kai-li. Isothermal section of Al−Ti−Zr ternary system at 1073 K / Kai-li Lu [et al.] // Trans. Nonfer. Met. Soc. China. – 2016. – Vol. 26. – P. 3052–3058.

[22] Ding, X.F. A closely-complete peritectic transformation during directional solidification of a $Ti_{-45}Al_{-8.5}Nb$ alloy / X.F. Ding [et al.] // J. Alloys and Compounds. – 2011. – No. 509. – P. 404–409.

[23] Долуханян, С.К. Формирование алюминидов титана и ниобия, индуцированных водородом в гидридном цикле. / С.К. Долуханян [и др.] // Химическая физика. – 2017. – Т. 36. – № 4. – С. 1–11.

References

[1] Kazantseva N.V., Mushnikov N.V, Popov A.G., Terent'ev P.B., Pilyugin V.P. Severe plastic deformation

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

and hydrogenation of titanium aluminides. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011;509(38):9307–9311.

[2] Rodríguez C., Belzunce F.J., Betegon C. Nanostructured Al–$ZrAl_3$ materials consolidated via spark plasma sintering: Evaluation of their mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds,* 2013;550:402–407.

[3] Zhao Liu, Yongliang Chen, Lupeng Du. Preparation of Nb_3Al superconductor by powder metallurgy. *J. Mod. Transport*, 2014;22(1):55–60.

[4] Azevedo G., Santos D.B. Synthesis and Characterization of Aluminum–Zirconium Intermetallic Composites. *Journal of Materials Synthesis and Processing*, 2000;8(5):101–107.

[5] Milanese C., Maglia F., Tacca A. Ignition and reaction mechanism of Co–Al and Nb–Al intermetallic compounds prepared by combustion synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006;421:156–161.

[6] Dolukhanyan S.K., Aleksanyan A.G., Ter-Galstyan O.P., Shekhtman V.Sh, Sakharov M.K., Abrosimova G.E. Specifics of the formation of alloys and their hydrides in the Ti–Zr–H system. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2007;2(6):563–569.

[7] Method for the preparation of compact hydrides of transition metals (Sposob polucheniya compactnykh gidridov perekhodnykh metallowmetallow). Patent RA, No. 2299A. C01B 6/00 / Dolukhanyan S.K., Aleksanyan A.G. – 2009 (in Russ.).

[8] Method for obtaining alloys of transition metals (Sposob polucheniya splavov perekhodnykh metallov). PA Patent No. 2308A. C22C 1/04 / S.K. Dolukhanyan, A.G. Aleksanyan. – 2009 (in Russ.).

[9] Dolukhanyan S.K., Aleksanyan A.G., Shekhtman V.Sh., Hakobyan H.G., Mayilyan D.G., Aghadjanyan N.N., Abrahamyan K.A., Mnatsakanyan N.L., Ter-Galstyan O.P. Synthesis of Transition Metal Hydrides and a New Process for Production of Refractory Metal Alloys: An Autoreview. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2010;19(2):85–93.

[10] Aleksanyan A.G Dolukhanyan S.K., Shekhtman V.Sh., Huot J., Ter-Galstyan O.P., Mnatsakanyan N.L. Formation of alloys in Ti–V system in hydride cycle and synthesis of their hydrides in self-propagating high-temperature synthesis regime. *Journal of Alloys and Compounds,* 2011;509:786–789.

[11] Aleksanyan A.G., Dolukhanyan S.K., Shekhtman V.Sh, Khasarov S.S., Ter-Galstyan O.P., Martirosyan M.V. Formation of alloys in the Ti–Nb system by hydride cycle method and synthesis of their hydrides in self-propagating high-temperature synthesis. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2012;37:14234–14239.

[12] Dolukhanyan S.K. Development of hydrogen material science in Armenia: synthesis of hydrides of transition metals and development of new technologies for obtaining alloys (Razvitie vodorodnogo materialovedeniya v ARMENII: sintez gidridov perekhodnykh metallov I razrabotka novykh technologii polucheniya splavov). Monograph edited by D.Sc., Prof. Buynivskogo A.S. "Rare and rare-earth metals", Tomsk, 2014, pp. 329–351 (in Russ.).

[13] Dolukhanyan S.K., Aleksanyan A.G., TerGalstyan O.P., Shekhtman V.Sh,. Mnatsakanyan N.L. Synthesis of Titanium Aluminides by Hydride Cycle Process. *International Journal of Self Propagating HighTemperature Synthesis*, 2014;23(2):78–82.

[14] Muradyan G.N. Features of the formation of zirconium aluminides in the hydride cycle method (Osobennosti formirovaniya aluminidov tsirkoniya v rezhime gidridnogo tsikla). *The chemical journal of Armenia*, 2016;69(4):416–427 (in Russ.).

[15] Dolukhanyan S.K., Ter-Galstyan O.P., Aleksanyan A.G., Hakobyan A.G., Mnatsakanyan N.L., Shekhtman V.Sh. Study of the formation of niobium aluminides in the hydride cycle. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2015;9(5):702–709.

[16] Edited by A. A. Borisov, L. De Luca, and A.G. Merzhanov. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials. Combustion Science and Technology Book Series^ Dolukhanyan, S.K. SHS of Binary and Complex Hydrides. New York: Taylor & Francis., 2002, pp. 219–237.

[17] Dolukhanyan S.K. SHS method for obtaining hydrogen accumulators (SHS-metod polucheniya akkumulyatorov vodoroda). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2005;11;13–16 (in Russ.).

[18] Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Self propagating High Temperature Synthesis of Refractory Inorganic Composites (Samorasprostranyayuschiisya vysokotemperaturnyi sintez tugoplavkikh neorganicheskikh soedinenii). *Dokl. AN SSSR*, 1972;204(2):366–369 (in Russ.).

[19] Lyakishev N.P. Diagram of the state of double metal systems (Diagramma sostoyaniya dvoinykh metallicheskikh system). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2000;1–3;992 (in Russ.).

[20] Tretyachenko L. Light Metal Systems. Al–Ti–Zr, Al–Nb–Ti. Heidelberg: Springer / GmbH, 2005, pp. 54–59; 334–379.

[21] Lu Kai-li Lu Kai-li, Yang Feng, Xie Zhi-yun. Isothermal section of Al−Ti−Zr ternary system at 1073 K. *Trans. Nonfer. Met. Soc. China*, 2016;26:3052–3058.

[22] Ding, X.F., Ding X.F., Lin J.P., Qi H., Zhang L.Q., Song X.P., Chen G.L. A closely-complete peritectic transformation during directional solidification of a $Ti_{-45}Al_{-8.5}Nb$ alloy. *J. Alloys and Compounds,* 2011;509:404–409.

[23] Dolukhanyan S.K., Ter-Galstyan O. P., Aleksanyan A. G., Muradyan G. N., Mnatsakanyan N. L. Formation of titanium and niobium aluminides induced by hydrogen in the hydride cycle. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2017;11(2):272–281.

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Статья поступила в редакцию 12.03.18. Ред. рег. № 2646 The article has entered in publishing office 12.03.18. Ed. reg. No. 2646

УДК 535.621.373.826

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ НАНОСТРУКТУР ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ, МОЛИБДЕНА И ВОЛЬФРАМА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ*

***В.Т. Карпухин*[1], *М.М. Маликов*[1], *Г.Е. Вальяно*[1], *Т.И. Бородина*[1], *М.А. Казарян*[2]**

[1]ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
стр. 2, д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия
тел.: +7 (495) 485-83-45; e-mail: mmalikov@oivtran.ru
[2] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)
д. 53, Ленинский пр-т, Москва, 119991, Россия
тел.: +7 (499) 135-42-64; e-mail: kazar@sci.lebedev.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.141-148

Заключение совета рецензентов: 21.03.18 Заключение совета экспертов: 30.03.18 Принято к публикации: 10.04.18

Представлены результаты исследования состава и морфологии наноструктур оксидов переходных металлов: циркония, молибдена и вольфрама, полученных методом лазерной абляции чистых металлов в воде.

Высокие температура и давление в зоне взаимодействия импульсного лазерного луча с поверхностью металла в воде способствуют интенсивному синтезу оксидов в виде кластеров частиц размером около 1−2 нанометра, что характерно для металлов с высоким потенциалом ионизации. Как следует из данных рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии, кластеры являются аморфным строительным материалом для наноструктур оксидов вышеперечисленных металлов. Продемонстрирована общность картины их строения, а именно, слоистость материала, из которого сложены пенистые образования, тонкостенные полые округлые частицы, пластины, нити и другие формы наноструктур. Проведённые исследования морфологических свойств полученных в данной работе наноструктур оксидов циркония, молибдена и вольфрама указывают на то, что эти наноструктуры в качестве субстратов позволят достичь высоких значений коэффициента усиления комбинационного рассеяния ~ 10^4–10^8. В этом диапазоне находятся данные по коэффициенту усиления, ранее полученные авторами в экспериментах по синтезу нанооксидов циркония при использовании их в качестве субстрата. Это указывает на то, что подобные наноструктуры оксидов молибдена и вольфрама также могут служить эффективными субстратами и применяться в качестве высокочувствительных сенсоров в анализаторах состава веществ на основе гигантского комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: лазер; абляция; наноструктуры; гигантское комбинационное рассеяние; цирконий; молибден; вольфрам; оксиды металлов.

Карпухин В.Т., Маликов М.М., Вальяно Г.Е., Бородина Т.И., Казарян М.А. Особенности морфологии наноструктур оксидов циркония, молибдена и вольфрама, синтезированных методом лазерной абляции металлов в воде // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):141-148.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

THE MORPHOLOGY FEATURES OF NANOSTRUCTURE OF ZIRCONIUM, MOLYBDENUM AND WOLFRAM OXIDES SYNTHESISED BY LASER ABLATION OF METALS IN WATER

V.T. Karpukhin[1], M.M. Malikov[1], G.E. Valyano[1], T.I. Borodina[1], M.A. Kazaryan[2]

[1]Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS)
13/2 Izhorskaya St., Moscow, 127412, Russia
tel.: +7 (495) 485 83 45, e-mail: mmalikov@oivtran.ru
[2]Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences (LPI RAS)
53 Leninskii Av., Moscow, 119991, Russia
tel.: +7 (499) 135 42 64, e-mail: kazar@sci.lebedev.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.141-148

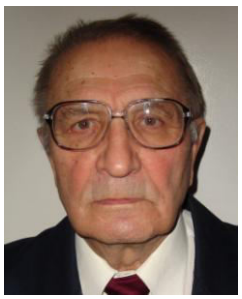
Referred 21 March 2018 Received in revised form 30 March 2018 Accepted 10 April 2018

The paper gives the investigation results of composition and morphology of oxide nanostructures of transition metals – zirconium, molybdenum and wolfram synthesized by laser ablation pure metals in water.

High temperatures and pressures in zone of interaction of the pulse laser beam with the surface of metal in water contribute to the intensive synthesis of oxides in the form of clusters of particles with size about 1−2 nanometres. This is characteristic for metals with high ionization potential. As it follows from the data of X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy, specifically, the clusters are amorphous building material for nanostructures of the oxides of the metals enumerated above. The paper demonstrates the general pattern of their structure, namely, the stratification of the material from which the foam formations, thin-walled hollow round particles, plates, filaments, and other forms of nanostructures are composed. The research of morphological features of the nanostructures of zirconium, molybdenum and wolfram oxides obtained by the authors indicates that their use as substrates will achieve high gain values of Raman scattering ~ 10^4−10^8. In this range, there are the gain data previously obtained by the authors in the experiments on the synthesis of zirconium nano-oxides when using them as a substrate.

This indicates that the nanostructures of molybdenum and wolfram nano-oxides also can serve as the effective substrates and can be used as a sensor in the high sensitive composition of substances analyzers based on surface enhanced Raman scattering.

Keywords: laser; ablation; nanostructures; enhanced Raman scattering; zirconium; molybdenum; wolfram; oxides of metals.



Вячеслав Тимофеевич Карпухин
Vyacheslav Karpukhin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Образование: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (1959 г.).

Область научных интересов: физика плазмы; газодинамика; оптика; лазерные технологии; нанотехнологии.

Публикации: 200.

h-index: РИНЦ – 5, Scopus – 5, WoS – 6

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Chief Researcher, Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS).

Education: M.V. Lomonosov Moscow State University, 1959.

Research interests: plasma physics; gas dynamics; optics; laser technology; nanotechnology.

Publications: 200.

Михаил Максимович Маликов
Mikhail Malikov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Образование: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (1966 г.).

Область научных интересов: физика лазеров; физика низкотемпературной плазмы; оптика; лазерные технологии.

Публикации: 150.

h-index: РИНЦ – 5, Scopus – 4, WoS – 6

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS).

Education: M.V. Lomonosov Moscow State University, 1966.

Research interests: physics of lasers; physics of low-temperature plasma; optics; laser technology.

Publications: 150.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Георгий Евгеньевич Вальяно
George Valyano

Сведения об авторе: старший научный сотрудник, Объединённый институт высоких температур РАН.

Образование: Московский государственный педагогический институт, физический факультет (1967 г.).

Область научных интересов: электронная микроскопия; атомно-силовая микроскопия; рентгеноспектральный анализ.

Публикации: 80.

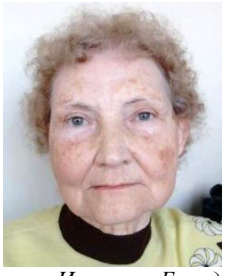
h-index 5

Information about the author: Senior Researcher, Joint Institute of High Temperatures of RAS.

Education: Moscow State Pedagogical Institute, Faculty of Physics, 1967.

Research interests: electron microscopy; atomic force microscopy; EDX-analysis.

Publications: 80.



Татьяна Ивановна Бородина
Tatiana Borodina

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Объединённый институт высоких температур РАН.

Образование: Московский государственный университет, физический факультет (1970 г.).

Область научных интересов: структурная кристаллография; рентгеновская дифрактометрия; комбинационное рассеяние.

Публикации: 85.

h-index 7

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Joint Institute of High Temperatures of RAS.

Education: M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, 1970.

Research interests: structural crystallography; X-ray diffraction; Raman scattering.

Publications: 85.

Мишик Айразатович Казарян
Mishik Kazaryan

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1970 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 600.

h-index 9; Scopus 9;
РИНЦ 10; WoS 9

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Physical Institute named after P. N. Lebedev RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

Research interests: laser machining of composite materials; physical optics.

Publications: 600.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1. Введение

В настоящее время очевидна возрастающая опасность тотального загрязнения окружающей среды в результате интенсивной промышленной, сельскохозяйственной и другой производственной деятельности человека. Значительную долю общего загрязнения составляют вредные газы, жидкие и твёрдые отходы производства тепловой и электрической энергии. При решении проблемы снижения указанных видов загрязнения весьма актуальна проблема контроля состава и количества вредных веществ. Эта задача решается не только совершенствованием традиционных аналитических методов, таких как хроматография, спектрофотометрия, электрохимический анализ, но и развитием новых, более точных, быстродействующих и портативных измерительных устройств на базе физических явлений: флюоресценции, фотохромизма, гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) и др. [1−3]. При этом аналитический метод определения вещества, основанный на эффекте ГКР, обладает чрезвычайно высокой чувствительностью – практической возможностью идентифицирования даже одной молекулы [4, 5]. Основными физическими механизмами колоссального усиления комбинационного рассеяния лазерного излучения в системе «анализируемая молекула (аналит) одного вещества − наноструктура другого вещества (субстрат)» являются плазмонный и зарядово-обменный [6]. Плазмонный механизм характерен для субстратов на основе металлов с высокой электропроводностью − золота, серебра, меди. Коэффициент усиления сигнала рассеяния $E_{\text{гкр}}$ для таких субстратов составляет ~ $10^{12} \div 10^{14}$ и более. Подобные субстраты используются при создании различного рода биосенсоров в медицине и биологии [7, 8]. Зарядово-обменный механизм отличает субстраты, изготовленные из полупроводниковых материалов, в частности, оксидов переходных металлов. Коэффициент усиления $E_{\text{гкр}}$ в этом случае существенно меньше и лежит в диапазоне $10^4 \div 10^9$. Однако исследования указывают на лучшую поверхностную связь таких субстратов с аналитом. Кроме того, субстраты на основе оксидов химически более стабильны, а стоимость их производства ниже [9, 10]. Поиск эффективных субстратов ведётся не только за счёт подбора составов, но и развития технологий создания наноструктур определённого вида, поскольку доказано су-

щественное влияние морфологии структуры субстрата (размеров и формы наночастиц, плотности их упаковки и др.) на усиление рассеяния [11−14].

В настоящей работе проведено исследование морфологии наноструктур оксидов переходных металлов циркония, молибдена и вольфрама, полученных в схожих условиях методом лазерной абляции металла в воде, с целью определения возможности использования их в качестве субстратов для ГКР. Впервые проведено сравнение свойств полученных наноструктур оксидов этих металлов. Обнаружен ряд новых закономерностей, таких как подобие форм нанообразований этих оксидов и высокая развитость их поверхности.

Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
E	Коэффициент усиления сигнала рассеяния
Индексы нижние	
гкр	Гигантское комбинационное рассеяние
Аббревиатуры	
ГКР	Гигантское комбинационное рассеяние
СЭМ	Сканирующий электронный микроскоп

2. Теоретическая часть

Метод лазерной абляции заключается во взаимодействии мощного лазерного импульса с металлической мишенью в жидкости. В месте контакта луча и металла возникает плазменно-паровой факел (пузырь), ограниченный жидкостью. Внутри этого объема давление среды достигает нескольких ГПа, плотность частиц $10^{22} \div 10^{23}$ см^3, температура 4 000 ÷ 5 000 К и более [15, 16]. В этих условиях реакция синтеза оксидов протекает весьма интенсивно. По окончании лазерного импульса, в процессе охлаждения смеси в расширяющемся пузыре, происходит нуклеация и последующая кластеризация частиц с образованием коллоидного раствора наночастиц. В принципе, регулируя мощность и частоту следования лазерных импульсов, а также время воздействия, можно достаточно гибко влиять на процесс образования наноструктур, их размер, состав и морфологию.

3. Экспериментальный стенд и диагностический комплекс

В основе стенда для получения наноструктурированных материалов в качестве источника излучения использовался медно-паровой лазер с длиной волны излучения 510 нм и 578 нм, работавший в частотно-импульсном режиме с длительностью импульса излучения ~20 нс, частотой следования 10 кГц и средней выходной мощностью ~10 ÷ 15 Вт [17]. Состав, кристаллическая структура образцов определялись стандартным методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-2 (линия K_α меди). Морфология наноструктур исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) NOVA NANOSEM 650 с системой энергодисперсионного анализа EDAX и СЭМ HITACHI S405A. Подготовка образцов к анализу включала центрифугирование коллоида при 15 000 об/мин и последующую сушку осадка.

3.1. Данные рентгеноструктурного анализа

На рис. 1 изображены дифрактограммы осадков коллоидных растворов, полученных при абляции циркония, вольфрама и молибдена в воде (в течение трёх часов).

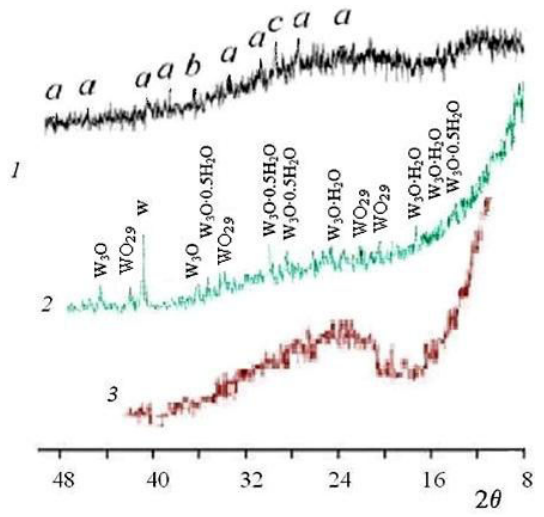


Рис. 1 − Рентгеновские дифрактограммы осадков коллоида, полученного абляцией циркония (*1*), вольфрама (*2*) и молибдена (*3*) в воде: *a* − моноклинная фаза; *b* − тетрагональная фаза ZrO_2; *c* – металлического циркония

Fig. 1 − X-ray diffractograms of precipitates isolated from colloidal solutions obtained with ablation and zirconium (1), wolfram (2) and molybdenum (3) in water: *a* – monoclinic phase; *b* – tetragonal phase ZrO_2; *c* – metallic zirconium

Анализ дифрактограммы *1* указывает на наличие в Zr-осадке в основном рентгеноаморфной фазы с размером частиц ~1 ÷ 2 нм, а также в небольшом количестве кристаллов размером 60 ÷ 80 нм.

Из дифрактограммы *2* следует, что W-осадок состоит из кристаллической и рентгеноаморфной частей. В состав кристаллической части материала входят вольфрам, его оксиды W_3O, $WO_{2,9}$ и гидроксиды $WO_3 \cdot H_2O$, $WO_3 \cdot 0{,}5H_2O$. Основная часть материала находится в рентгеноаморфном состоянии, на что указывает присутствующее в рентгеновском дифракционном спектре диффузное гало, расположенное в области брэгговских углов 2θ = 20º – 35º. Угловое положение гало позволяет предположить, что в

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

рентгеноаморфной компоненте преобладает фаза $WO_3 \cdot H_2O$. В меньшем количестве в рентгеноаморфную часть материала входят $WO_3 \cdot 0{,}5H_2O$ и $WO_{2,9}$.

Дифрактограмма *3* Mo-осадка характеризуется наличием протяжённого гало в области углов $2\theta = 20^\circ - 38^\circ$, что отражает присутствие оксидов молибдена MoO_3, Mo_4O_{11}, а также гидроксидов $MoO(OH)_2$ $Mo_5O_8(OH)_8$. Отсутствие ярко выраженных линий в спектре подтверждает тот факт, что основная масса осадка (~ 15 % по объёму), как и в случае с цирконием и вольфрамом, находится в рентгеноаморфном состоянии. Кроме того, в осадке имеется небольшое количество металлического молибдена.

Из сравнения вышеприведенных спектров циркония, молибдена и вольфрама следует, во-первых, что абляция в воде приводит к образованию наноразмерных частиц оксидов и гидроксидов; во-вторых, тугоплавкие металлы (цирконий, молибден, вольфрам) дают в основном рентгеноаморфные осадки с размером частиц ~1 ÷ 2 нм. В то же время в осадках присутствует и небольшая доля наночастиц чистых металлов размером ~100 нм и более.

3.2. Морфология синтезированных оксидов

На рис. 2 показана поверхность Zr-осадка, снятая с помощью СЭМ HITACHI S405A. На первой части рисунка (рис. 2*a*) наблюдается однородное поле осадка с достаточно редкими, но большими «островами-конгломератами» произвольной формы средним размером ~15 ÷ 50 мкм. При большем увеличении (рис. 2*b*) видно, что конгломераты представляют собой не только ансамбли сплошных округлых частиц, но и пенистую массу с множественными включениями в виде сплошных и полых шаров (рис. 2*c*).

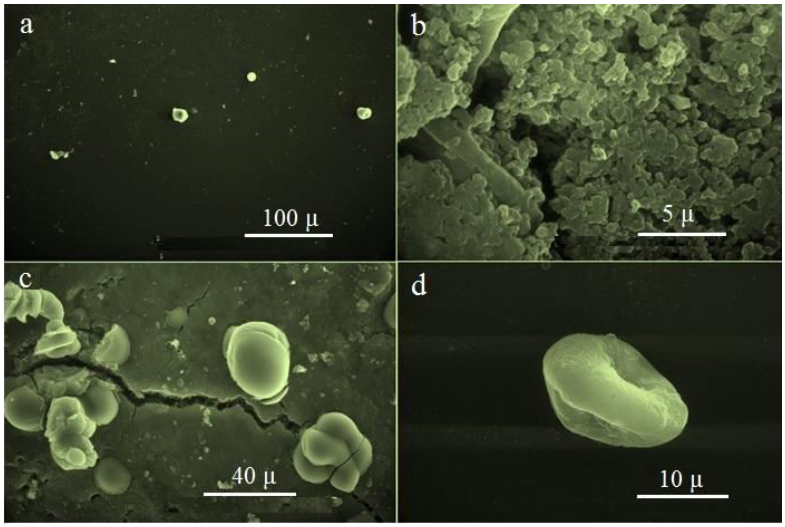


Рис. 2 – Наноструктуры твёрдого осадка коллоида, полученного абляцией циркония в воде, масштаб: *a* – 100 мкм; *b* – 5 мкм; *c* – 40 мкм; *d* – 10 мкм
Fig. 2 – Nano-structures of the solid phase of a colloid obtained by ablation of zirconium in water, scale: *a* – 100 μm; *b* – 5 μm; *c* – 40 μm; *d* – 10 μm

В этой же части рисунка заметны трещины в сплошной массе осадка. Крупные округлые структуры (рис. 2*d*), в свою очередь, состоят из тонких слоёв более мелких частиц.

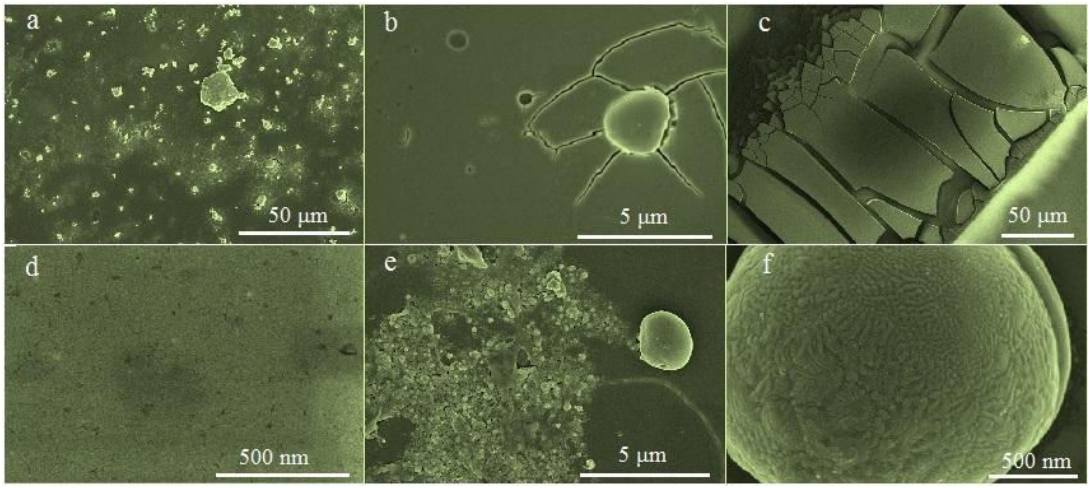


Рис. 3 – Наноструктуры твёрдого осадка коллоида, полученного абляцией молибдена в воде, масштаб: *a, c* – 50 мкм, *b, e* – 5 мкм, *d, f* – 500 мкм
Fig. 3 – Nano-structures of the solid phase of a colloid, obtained by ablation of molybdenum in water, scale: *a, c* – 50 μm, *b, e* – 5 μm, *d, f* – 500 μm

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Исследование высохших Mo-суспензий показало, что они имеют две основные составляющие микроструктуры (рис. 3*a*): растрескавшиеся плотные аморфные массы и расположенные на их поверхности и в приповерхностном слое агрегаты округлых частиц, а также пенистые образования, достигающие в некоторых зонах десятков микрон. Приблизительно оценить суммарное содержание агрегатов и образований можно в несколько объёмных процентов. При более высоком увеличении в местах растрескивания аморфной массы (рис. 3*b*) можно видеть её слоистую структуру (рис. 3*c*). Границы между частицами в плотных слоях явно не выражены (рис. 3*d*). Как следует из рассмотрения отдельных агрегатов частиц и пенных образований, они состоят из сплошных и полых квазисфер размером, как правило, от единиц до нескольких десятков нанометров (рис. 3*e*). На основе анализа строения поверхности наиболее крупных частиц (рис. 3*f*) можно заключить, что все частицы (и полые, и сплошные) сложены из структур существенно меньшего размера.

На рис. 4 представлены элементы картины поверхности W-осадка. Как и в случае с цирконием и молибденом, поверхность осадка представляет сплошную растрескавшуюся аморфную массу (рис. 4*a*).

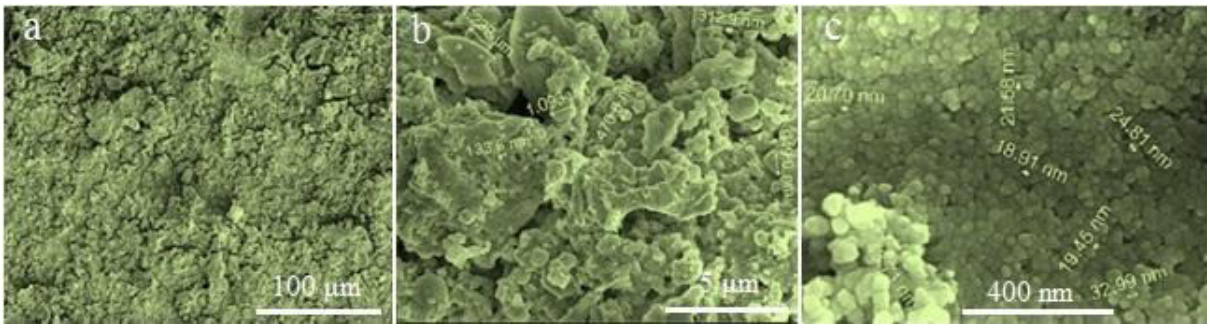


Рис. 4 – Наноструктуры твёрдого осадка коллоида, полученного абляцией вольфрама в воде, масштаб: *a* – 100 мкм, *b* – 5 мкм, *c* – 400 нм
Fig. 4 – Nano-structures of the solid phase of a colloid, obtained by ablation of wolfram in water scale: *a* – 100 μm, *b* – 5 μm, *c* – 400 nm

При большем увеличении видно, что фрагменты сплошной массы состоят из слоистых образований различных форм размерами от сотен нанометров до единиц, десятков микрон (рис. 4*b*). В свою очередь, на поверхности этих образований расположены округлые структуры размерами в десятки нанометров (рис. 4*c*).

4. Результаты и их обсуждение

Детальное сравнение изображений поверхности наноструктур оксидов циркония, молибдена и вольфрама выявляет ряд общих особенностей. Первой и, по-видимому, главной является то, что строительным материалом всех элементов структур (агрегатов сплошных и полых частиц разнообразных форм, пенистых образований и др.) служит аморфная масса. Как следует из дифрактограмм, эта масса «рентгеноаморфна», иначе говоря, размер частиц (кластеров атомов, молекул), из которых она состоит, не превышает 1 ÷ 2 нм. Известно, что переходные металлы с высоким потенциалом ионизации (молибден и др.) склонны к образованию кластерных структур [18, 19]. Этому способствует и режим резкого охлаждения плазменно-парового объёма при абляции. Во-вторых, можно говорить о «слоистом» строении практически всех видов наноструктур. Как отмечалось в работе [20], основным механизмом создания слоистых образований являются эффекты Оствальда и Киркендала. В-третьих, для всех оксидов характерна высокая развитость поверхности наноструктур. Отмеченные особенности структур указанных оксидов позволяют сделать предположение о возможности использования их в качестве субстратов, обеспечивающих достаточно высокий коэффициент усиления комбинационного рассеяния. Это предположение основывается на результате экспериментов по измерению $E_{гкр}$ для оксидов циркония, где были зафиксированы значения коэффициента усиления в области 10^4 [21].

5. Заключение

В настоящей работе проведено экспериментальное изучение структурных и морфологических характеристик нанооксидов циркония, молибдена и вольфрама, синтезированных методом лазерной абляции чистых металлов в воде. Показаны аморфность материала, из которого сложены наноструктуры, высокая развитость поверхности и подобие форм нанообразований этих оксидов. Отмеченные особенности структур указывают на перспективность применения этих оксидов в качестве субстратов в аналитическом методе на основе ГКР. Полученные в настоящей работе данные могут быть использованы при создании высокочувствительных измерителей состава потоков газов и жидкостей [22, 23], а также твёрдых веществ.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список литературы

[1] Koeber, R. Determination of benzo[a]pyrene diones in air particulate matter with liquid chromatography mass spectrometry / R. Koeber, J.M. Bayona, R. Niessner // Environ. Sci. Technol. – 1999. – Vol. 33. – No. 10. – P. 1522–1558.

[2] Hilmi, A. Micromachined electrophoresis chips with electrochemical detectors for analysis of explosive compounds in soil and groundwater / A. Hilmi, J.H.T. Luong // Environ. Sci. Technol. – 2000. – Vol. 34. – No. 14. – P. 3046–3050.

[3] Li, Da-Wei. Recent progress in surface enhanced Raman spectroscopy for the detection of environmental pollutants / Da-Wei Li [et al.] // Microchim Acta. – 2013. DOI 10.1007/s00604–013–1115–3.

[4] Зуев, В.С. Поверхностные поляритоны и плазмоны: спонтанное излучение атома вблизи тела малого размера / В.С. Зуев // ФИАН. – 2006. – препринт – № 3. – С. 16.

[5] Емельянов, В.И. Эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами / В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев // УФН. – 1981. – Т. 135. – С. 345–361.

[6] Lombardi, J.R. Theory of Surface-Enhanced RAMAN Scattering in Semiconductors / J.R. Lombardi, R.L. Birke // J. Phys. Chem. C. – 2014 .– Vol. 118. – No. 20. – P. 11120–11130.

[7] Мамичев, Д.А. Оптические сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса для высокочувствительного биохимического анализа / Д.А. Мамичев [и др.] // Молекулярная медицина. – 2012. – № 6. – P. 56–61

[8] Нобиев, И.Р. Гигантское комбинационное рассеяние и его применение к изучению биологических молекул / И.Р. Нобиев, Р.Г. Ефремов, Г.Д. Чуманов // УФН. – 1988. –Т. 154.– С. 459–496.

[9] Wei, Ji. Semiconductor materials in analitical applications of surface- enhanced Raman scattering / Ji Wei, Zhao Bing, Ozaki Yukihiro // J. Raman Spectroscopy. – 2016. – Vol. 47. – P. 51–58.

[10] Aroca, R . Surface enhanced Vibrational Spectroscopy / R. Aroca. – Wiley, Chichester, 2006.

[11] Yuko S. Yamamoto. Why and how do the shapes of surface enhanced Raman scattering spectra change Recent progress from mechanistic studies / Yuko S. Yamamoto and Tamitake Itoh // J. Raman Spectroscopy. – 2016. – Vol. 47. – P. 78–88.

[12] LienDeng, Yu. Black silicon SERS substrate: Effect of surface morphology on SERS detection and application of single algal cell analysis / Yu. LienDeng, Yi . JeJuang // Biosensors and Bioelectronics. – 15 march 2014. – Vol. 53. – P. 37–42.

[13] Rigo, I. Comparative analysis of SERS substrates of different morphology / I. Rigo [et al.] // Procedia Engineering. – 2016. – 30th Eurosensors Conference, EUROSENSORS 2016.

[14] Li, W.Q. Geometrical and morphological optimizations of plasmonic nanoarrats for high – performance SERS detection / W.Q. Li [et all.] // Nanoscale. – 2015. – Vol. 7. – P. 15487.

[15] Yang, G.W. Laser ablation in liquids: Application in synthesis of nanocrystalls / G.W. Yang // Progress in Material Science. – 2007. – Vol. 52. – No. 4. – P. 648–698.

[16] Simakin, A.V. Nanoparticle formation during laser ablation of solids in liquids / A.V. Simakin, V.V. Voronov, G.A. Shafeev // Phys. of Wave Phenomena. – 2007. – Vol. 15. – P. 218.

[17] Батенин, В.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / В.М. Батенин [и др.]. – М.: Физматлит, 2011. – Т. 2. – С. 608.

[18] Novogenov, V.A. Introduction into inorganic chemistry / V.A. Novogenov. – Publ. into Altai state university, Barnaul, 2001.

[19] Бурцева, К.Г. Об изополисоединениях молибдена и вольфрама / К.Г. Бурцева, Л.А. Воропанова, Л.А. Кочубей // ЖНХ. – 1984. – Т. 29. – № 6. – С. 1463–1467.

[20] Karpukhin, V.T. Structural Morphological and Optical Properties of Nanoproducts of Zirconium Target Laser Ablation in Water and Aqueous SDS Solutions / V.T. Karpukhin [et al.]. – Chemical and Structure Modification of Polymers. Edited by K. Pyrzynski. G. Nyszko and G.E, Zaikov. Apple Academic Press. – 2015. – P. 187–204.

[21] Karpukhin, V.T. An investigation of the effect of surface-enhanced Raman scattering on zirconium and molybdenum nanostructures synthesized by laser ablation in a liquid environment in book "Laser Ablation: Advances in Research and Applications" / V.T. Karpukhin [et al.] // Nova Science Publishers, Hauppauge, New York 2017. – P. 179–192. ISBN: 978–1–53612–405–7.

[22] Varaksin, A.Yu. Controlling the Behavior of Air Tornados /A.Yu. Varaksin, M.E. Romash, V.N. Kopeitsev // High Temperature. – 2009. – Vol. 47. – № 6. – P. 836–842.

[23] Varaksin, A.Yu. Simulation of Free Heat Vortexes: Generation, Stability, Control / A.Yu. Varaksin [et al.] // High Temperature. – 2010. – Vol. 48. – № 6.– P. 918–925.

References

[1] Koeber R., Bayona J.M., Niessner R. Determination of benzo[a]pyrene diones in air particulate matter with liquid chromatography mass spectrometry. *Environ. Sci. Technol.*, 1999;33(10):1522–1558.

[2] Hilmi A, Luong JHT. Micromachined electrophoresis chips with electrochemical detectors for analysis of explosive compounds in soil and groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 2000;34(14):3046–3050.

[3] Da-Wei Li, Wen-Lei Zhai , Yuan-Ting Li , Yi-Tao Long. Recent progress in surface enhanced Raman spectroscopy for the detection of environmental pollut-

ants. *Microchim Acta*, 2013, DOI 10.1007/s00604-013-1115-3.

[4] Zuev V.S. Surface polaritons and plasmons: spontaneous emission of an atom near a small body (Poverkhnostnye polyaritony i plazmony: spontannoe izluchenie atoma vblizi tela malogo razmera), *FIAN*, 2006, 16 p. (preprint no. 3) (in Russ.).

[5] Emel'yanov V.I., Koroteev N.I. The effect of giant Raman scattering of light by molecules (Effekt gigantskogo kombinatsionnogo rasseyaniya sveta molekulami). *UFN*, 1981;135:345−361 (in Russ.).

[6] Lombardi J.R., Birke R.L. Theory of Surface-Enhanced RAMAN Scattering in Semiconductors. *J. Phys. Chem. C*, 2014;118(20):11120−11130.

[7] Mamichev I.E., Kuznetsov N.E., Maslova M.L., Zanaveskin S.S. Optical sensors based on surface plasmon resonance for highly sensitive biochemical analysis, (Opticheskie sensory na osnove poverkhnostnogo plazmonnogo rezonansa dlya vysokochuvstvitel'nogo biokhimicheskogo analiza). *Molekulyarnaya meditsina*, 2012;6:56−61 (in Russ.).

[8] Nobiev I.R., Efremov R.G., Chumanov G.D. Giant Raman scattering and its application to the study of biological molecules (Gigantskoe kombinatsionnoe rasseyanie i ego primenenie k izucheniyu biologicheskikh molekul). *UFN*, 1988;154:459−496 (in Russ.).

[9] Wei Ji, Bing Zhao, Yukihiro Ozaki. Semiconductor materials in analitical applications of surface-enhanced Raman scattering. *J. Raman Spectroscopy*, 2016;47:51−58.

[10] Aroca R. Surface enhanced Vibrational Spectroscopy. Wiley, Chichester, 2006

[11] Yamamoto Yuko S., Tamitake Itoh. Why and how do the shapes of surface enhanced Raman scattering spectra change? Recent progress from mechanistic studies. *J. Raman Spectroscopy*., 2016;47:78−88.

[12] Yu-LienDeng, Yi-JeJuang. Black silicon SERS substrate: Effect of surface morphology on SERS detection and application of single algal cell analysis. *Biosensors and Bioelectronics,* 2014;53:37−42.

[13] Rigo I., Veres V., Himics L., Toth S., Czitrovszky A., Nagy A., Furjes P. Comparative analysis of SERS substrates of different morphology. *Procedia Engineering*, 2016; 30th Eurosensors Conference, EUROSENSORS 2016.

[14] Li W.Q., Wang G., Zhang X.N., Geng H.P., Shen J.L., Wang L.S., Zhao J., Xu L.F., Zhang L.J., Wu Y.Q., Tai R.Z., Chen G. Geometrical and morphological optimizations of plasmonic nanoarrats for high-performance SERS detection. *Nanoscale*, 2015;7:15487.

[15] Yang G.W. Laser ablation in liquids: Application in synthesis of nanocrystalls. *Progress in Material Science,* 2007;52(4);648−698.

[16] Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. Nanoparticle Formation During Laser Ablation of Solids in Liquids. *Phys. of Wave Phenomena,* 2007;15:218.

[17] Batenin V.M., Bokhan P.A., Buchanov V.V., Evtushenko G.S., Kazaryan M.A., Karpukhin V.T., Klimovskii I.I., Malikov M.M. The self-terminating lasers the transitions of atoms of metals (Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov), Vol. 2. Moscow: Fizmatlit Publ., 2011 (in Russ.).

[18] Novogenov V.A. Introduction into inorganic chemistry. Barnaul: Altai State University Publ., 2001.

[19] Burtseva K.G., Voropanova L.A., Kochubei L.A. About isopoliteia of molybdenum and wolfram (Ob izopolisoedineniyakh molibdena i vol'frama). *ZhNKh*, 1984;29(6):1463−1467 (in Russ.).

[20] Karpukhin V.T., Malikov M.M., Borodina T.I., Valyano G.E., Gololobova O.A. and Strikanov D.A. Structural Morphological and Optical Properties of Nanoproducts of Zirconium Target Laser Ablation in Water and Aqueous SDS Solutions. Chemical and Structure Modification of Polymers. Edited by Pyrzynski K., Nyszko G., and Zaikov G.E. Apple Academic Press, 2015; pp.187−204.

[21] Karpukhin V.T., Malikov M.M., Borodina T.I., Val'yano G.E., Gololobova O.A. An investigation of the effect of surface-enhanced Raman scattering on zirconium and molybdenum nanostructures synthesized by laser ablation in a liquid environment in book “Laser Ablation: Advances in Research and Applications”, 2017; ch. 6, pp. 179−192, Nova Science Publishers, Hauppauge, New York 2017, 199 p. ISBN: 978-1-53612-405-7.

[22] Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Controlling the Behavior of Air Tornados. *High Temperature*, 2009;47(6):836–842.

[23] Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Simulation of Free Heat Vortexes: Generation, Stability, Control. *High Temperature*, 2010;48(6):918–925.

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals “Space”

Международный издательский дом научной периодики “Спейс”

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА И ИХ ВНЕДРЕНИЕ

INNOVATION SOLUTIONS TECHNOLOGIES FACILITIES AND THEIR INNOVATION

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ

INNOVATIVE SOLUTIONS IN ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

Статья поступила в редакцию 04.05.18. Ред. рег. № 2661 The article has entered in publishing office 04.05.18. Ed. reg. No. 2661

УДК 621.3.018.72

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ*

Р.А. Амерханов[1], Э.А. Бекиров[2], М.М. Асанов[2], И.В. Шеметов[2], П.Ю. Босько[2]

[1]ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»
д. 13, ул. Калинина, Краснодар, Краснодарский край, 350004, Россия
тел.: +7 (861) 221-58-54, e-mail: energyksay@mail.ru
[2]ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
д. 4, проспект Академика Вернадского, г. Симферополь, Республика Крым, 295007, Россия
тел.: +7 (365) 254-50-36

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.149-156

Заключение совета рецензентов: 10.05.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 18.05.18

Работа посвящена проблеме определения наличия высших гармоник в силовой сети. Отмечено негативное влияние высших гармоник напряжения и тока на элементы систем электроснабжения и линии связи. В ходе проведенных исследований было разработано электронное устройство для анализа высших гармоник силовой сети солнечных электростанций, работающих по принципу разложения функции в ряд Фурье. Основным элементом устройства является плата Arduino на микроконтроллере Atmega328p. Для корректной работы устройства было создано соответствующее программное обеспечение. Результатом моделирования работы предлагаемого устройства является набор величин гармоник исследуемого сигнала в удобном для дальнейшего анализа виде.

Ключевые слова: солнечная энергетика; солнечные электростанции; высшие гармоники; переменный ток.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES FOR MEASURING THE HIGHER HARMONICS FOR SOLAR POWER PLANTS OF ALTERNATING CURRENT OF INDUSTRIAL FREQUENCY

R.A. Amerhanov[1], E.A. Bekirov[2], M.M. Asanov[2], I.V. Shemetov[2], P.Yu. Bosko[2]

[1]Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin
13 Kalinin St., Krasnodar, Krasnodar Reg., 350004, Russia
tel.: +7 (861) 221 58 54, e-mail: energyksay@mail.ru
[2]V.I. Vernadsky Crimean Federal University
4 Academic Vernadsky Av., Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia
tel.: +7 (365) 254 50 36

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.149-156

**Амерханов Р.А., Бекиров Э.А., Асанов М.М., Шеметов И.В., Босько П.Ю.* Разработка электронных устройств для измерения высших гармоник для солнечных электростанций переменного тока промышленной частоты // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):149-156.

Referred 10 May 2018 Received in revised form 15 May 2018 Accepted 18 May 2018

The paper is devoted to the problem of determining the higher harmonics presence in a power network. The paper notes the negative influence of higher harmonics of voltage and current on the power supply system's elements and communication lines. During the research, a device has been developed to analyze the higher harmonics of the power network. The main element of the device is the Arduino board on the Atmega328p microcontroller. For the correct operation of the device, the corresponding software has been created. The result of modeling of the proposed device operation is a set of harmonic values of the investigated signal in a form suitable for further analysis.

Keywords: solar energy; solar power stations; higher harmonics; alternating current.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Роберт Александрович Амерханов
Robert Amerkhanov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина.

Образование: Краснодарский институт пищевой промышленности (1960 г.).

Область научных интересов: энергосбережение естественных ресурсов при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе.

Публикации: около 500.

h-index (РИНЦ): 15

h-index (Скопус): 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Department of Electric Technology, Heat Technology and Renewable Sources of Energy, Kuban State Agrarian University.

Education: Krasnodar Institute of Food Industry, 1960.

Research interests: energy saving of natural resources under usage of non-traditional and renewable sources of energy in agro-industrial complex.

Publications: more than 500.

SPIN-код: 4139-7234

Scopus ID: 55480629300

Эскендер Алимович Бекиров
Eskender Bekirov

Сведения об авторе: д-р техн. наук; профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Казахский политехнический институт (1974 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; обработка статистических данных.

Публикации: 210.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: Kazakh Polytechnic Institute 1974.

Research interests: renewable energy sources; statistical data processing.

Publications: 210.

Марлен Мустафаевич Асанов
Marlen Asanov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2007 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; обработка статистических данных; анализ надежности; математическое моделирование.

Публикации: 55.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2007.

Research interests: renewable energy sources; statistical data processing; reliability analysis; mathematical modeling.

Publications: 55.

Илья Владимирович Шеметов
Ilya Shemetov

Сведения об авторе: магистрант, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (2017 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Information about the author: Master, Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: V.I. Vernadsky Crimean Federal University 2017.

Research interests: renewable energy sources.

Павел Юрьевич Босько
Pavel Bosko

Сведения об авторе: магистрант, кафедра электроэнергетики и электротехники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Образование: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (2017 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Information about the author: Master, Electrical Energy and Electrical Engineering Department, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Education: V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2017.

Research interests: renewable energy sources.

1. Введение

Приборы и оборудование с нелинейными характеристиками являются источниками высших гармоник в электрической сети, присутствие которых искажает форму тока или напряжения, что означает наличие возмущений в распределительной сети и ухудшение качества поставляемой электроэнергии [1].

Среди нелинейных нагрузок можно выделить следующие примеры: промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители); преобразователи частоты для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока; источники бесперебойного питания; офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.); бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы); некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы систем электроснабжения и линии связи [2]. Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

– увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие резонансов;

– снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;

– старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока службы этого оборудования;

– ложная работа оборудования.

Приборы для анализа гармонического состава сети созданы и активно применяются [3–6].

Цель данной работы заключалась в разработке прибора для обнаружения высших гармоник в сети переменного тока, обладающего высокой степенью точности и низкой стоимостью компонентов.

На солнечной электростанции прибор будет установлен на выходе инверторов для мониторинга параметров.

В соответствии с заданной целью были определены следующие задачи:

1. Изучить простые методы анализа несинусоидального сигнала.
2. Разработать принципиальную схему прибора для анализа несинусоидального сигнала.
3. Разработать программную прошивку прибора.

Поскольку наличие высших гармоник в электрической сети является отрицательным явлением, следовательно, задачи по их выявлению и анализу являются первостепенными.

Предлагаемое авторами данной статьи устройство является цифровым, следовательно, обладает высокой точностью и чувствительностью, информация представляется в удобном для восприятия и дальнейшего анализа виде, имеет собственное программное обеспечение для корректной работы, а его стоимость невысока.

Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
a_0, a_n, b_n	Коэффициенты Фурье периодической функции
f	Частота
$f(x)$	Периодическая функция
Нижние индексы	
вх	Входящий
дет	Детектируемый
дис	Дискретизация
сет	Сетевой
Аббревиатуры	
LCD	Liquid crystal display
АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

2. Основная часть

2.1. Теоретические основы анализа несинусоидальных сигналов

Изначально для обнаружения высших гармоник в силовой сети было решено использовать упрощенное преобразование Фурье – быстрое преобразование Хартли [7]. Для отладочной платы Arduino уже написана библиотека, позволяющая проводить данное преобразование [8]. Библиотека FHT (Fast Hartley Transform) позволяет произвести спектральный анализ входящего сигнала. Практика показала, что присутствующие гармоники высших частот корректно обнаруживаются, если их амплитудное значение сопоставимо с максимальной амплитудой сигнала. При значениях амплитуд высших гармоник в 5–10 раз меньше, они уже слабо отличимы от фона. Это и послужило причиной для отказа от данного метода.

Поскольку главная задача работы – анализ сигнала на наличие гармоник, в данном случае интерес представляют только частоты, кратные 50 Гц. Для этих целей отлично подойдет метод разложения функции в тригонометрический ряд Фурье.

Любую периодическую функцию $f(x)$ можно разложить в ряд:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)), \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)dx, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\cos(nx)dx, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\sin(nx)dx. \quad (4)$$

Числа a_0, a_n и b_n называются коэффициентами Фурье функции $f(x)$. В ходе разложения в ряд Фурье необходимо найти указанные коэффициенты. Принцип вывода формул для определения коэффициентов заключается в следующем: из-за ортогональности sin и cos, а также ввиду того что их произведение при интегрировании будет равно нулю, если умножить правую часть на cos(nx) и проинтегрировать, то в ноль обратятся все слагаемые кроме одного. Из полученного равенства выводится формула для a_n и аналогично для b_n [9].

Если коэффициенты a_n и b_n равны нулю, значит, в анализируемой функции отсутствует sin(nx) и cos(nx). Это и будет главным критерием в детектировании высших гармоник.

2.2. Принципиальная схема прибора и аппаратные ограничения

В качестве вычислительной мощности была выбрана отладочная плата Arduino на микроконтроллере Atmega 328p благодаря низкой стоимости, функциональности и простоте в работе. Технические характеристики представлены в табл. 1 [10].

Таблица 1

Технические характеристики платы Arduino на Atmega 328p

Table 1

Technical specifications of the Arduino board on Atmega 328p

Рабочее напряжение	5 В
Напряжение питания	7 ÷ 12 В
Цифровые входы/выходы	14
Аналоговые входы	6
Flash-память	32 КБ
SRAM	2 КБ

Первым аппаратным ограничением является оперативная память. Разрешение встроенного АЦП составляет 10 бит или 1 024 ед. Для того чтобы не потерять глубину дискретизации, приходится использовать переменные типа int, 2 байта. Такая размерность дает диапазон от –32 768 до 32 767. Доступная оперативная память содержит 2 048 байт, таким образом, 2 048/2 = 1 024 байт – максимальный объем массива, хранящего мгновенные значения амплитуд с выхода АЦП. Интересующий нас участок – от 0 до 2π или 1/50 = 0,02 с. Максимальная частота дискретизации $f_{дис}$ = 1 024/0,02 = 51 200 Гц. По теореме Котельникова получаем максимальную детектируемую частоту $f_{дет}$ = 51 200/2 = 25 600 Гц. Однако при заполнении оперативной памяти свыше 75 % микроконтроллер может работать нестабильно, также необходимо выделить место под другие глобальные переменные. На считывание значения с АЦП и записи в массив тратится время, максимальная частота уменьшается. На практике при использовании задержки между считываниями в 5 мкс, с учетом времени исполнения кода за 0,02 с удается снять 550 значений: $f_{дис}$ = 550/0,02 = 27 500 Гц, $f_{дет}$ = 27 500/2 = 13 750 Гц.

Вторым аппаратным ограничением является глубина дискретизации. Как говорилось ранее, разрешение встроенного АЦП составляет 1 024 ед., а диапазон входного напряжения от 0 до 5 В. Следовательно, сетевое напряжение с амплитудой $A_{сет} = 220 \cdot \sqrt{2}$ =310 В нужно понизить активным делителем напряжения до приемлемого значения $A_{вх}$ = 5/2 = 2,5 В. В таком случае АЦП будет захватывать всю волну, но есть вероятность потери значений около max и min. В симуляции использовалась главная амплитуда 2 В. Полученные максимальное и минимальное значения с выхода АЦП при чистом синусоидальном сигнале амплитудой 2 В составляют 969 и 150 единиц соот-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ветственно. Фактическая глубина дискретизации составляет 969 – 150 = 819 единиц.

На практике максимальный порядковый номер полученного коэффициента при его амплитуде $A_{вх\ гар}$ = = 5 мВ, 0,25 % от $A_{вх}$ или 1,5 В на стороне 220 В равен 50, частота соответствующей гармоники $f_{дет}$ = = 50 · 50 = 2 500 Гц. Предел последовательного выведения первых 50 гармоник обусловлен оперативной памятью. Для точного подсчета коэффициенты Фурье необходимо хранить в массиве типа float, 4 байта. При объеме массива в 200 байт глобальные переменные используют 2 034 байт (99 %) динамической памяти. Последовательное выведение гармоник с 50 по 100 плохо сказывается на микроконтроллере, программа перезагружается, устройство работает не корректно. Как предсказывал расчет, это существенно меньше 13 750 Гц.

Симуляция работы устройства проводилась в программном комплексе Proteus 8. Схема устройства приведена на рис. 1.

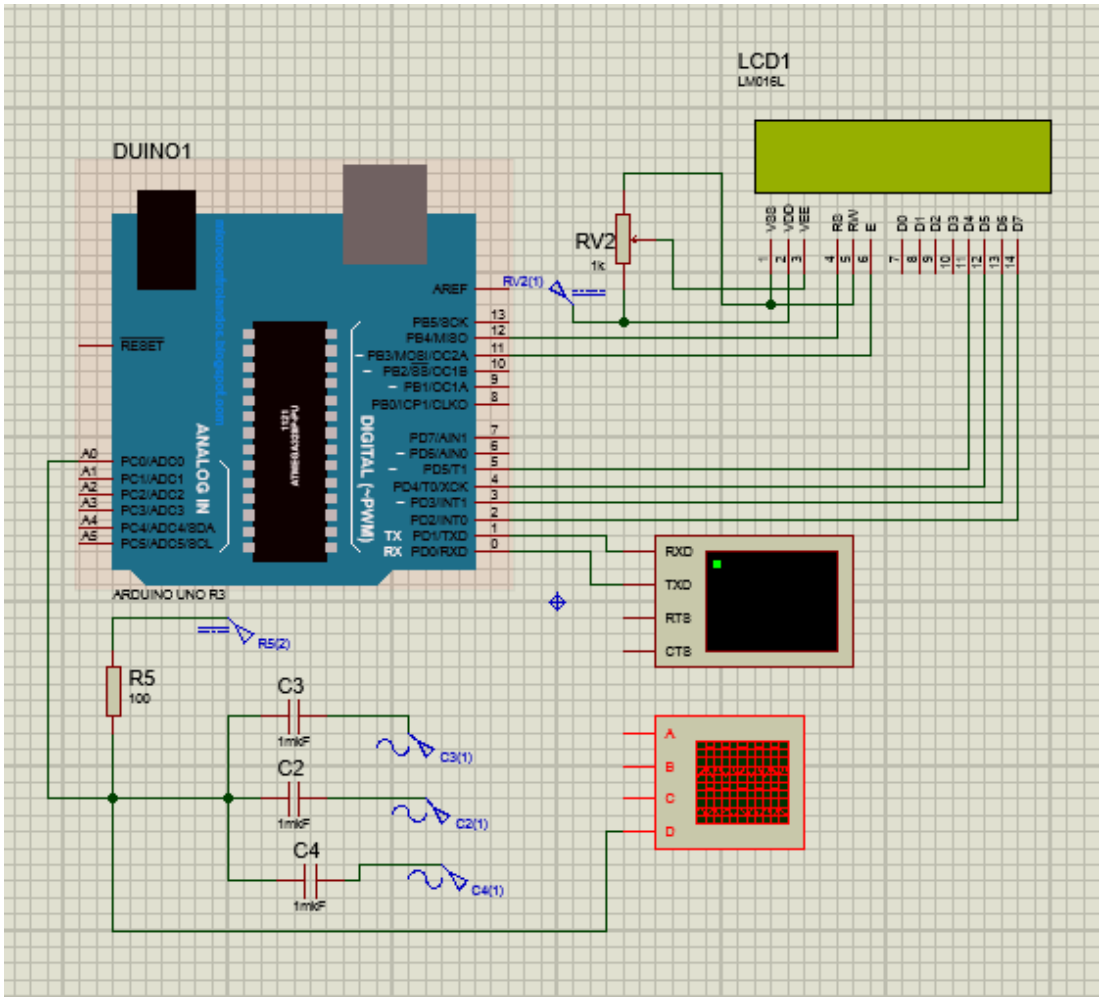


Рис. 1 – Схема прототипа прибора для анализа гармоник силовой сети:
сверху слева – отладочная плата ArduinoUno; сверху справа – двухстрочный LCD-дисплей; снизу слева – 3 осциллятора и источник постоянного напряжения; снизу справа – монитор COM-порта и осциллограф

Fig. 1 – The diagram of the prototype device for the power network harmonics analysis: above left is the ArduinoUno debug board; on the top right is a two-line LCD display; on the bottom left there are 3 oscillators and a constant voltage source; on the bottom right is a COM port monitor and an oscilloscope

Три генератора синусоидальных сигналов подключены через конденсаторы емкостью 1 мкФ к аналоговому пину 0, параллельно, через сопротивление, подключен источник постоянного напряжения. Максимальный диапазон колебаний осцилляторов составляет от –2 В до 2 В, поэтому напряжение после конденсаторов поднимается источником постоянного напряжения на 2,5 В, чтобы уложится в диапазон входных напряжений аналогового входа от 0 до 5 В (вход АЦП).

На схеме присутствуют монитор порта и осциллограф. Осциллограф служит для визуальной оценки, а монитор порта – для удобного вывода большого количества значений (это необходимо в процессе разработки).

На LCD-дисплее отображаются детектируемые гармоники в максимально удобном для восприятия виде.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

3. Результаты симуляции прибора

Анализ данных с монитора порта приведен на рис. 2. Абсолютная погрешность захвата значений для анализа не превышает 5 мкс. Первое и последнее значения в интервале практически совпадают. Успешно детектируются гармоники со следующими амплитудами (на стороне входа с АЦП) и частотами: 2 В, 50 Гц; 100 мВ, 500 Гц; 5 мВ; 600 Гц.

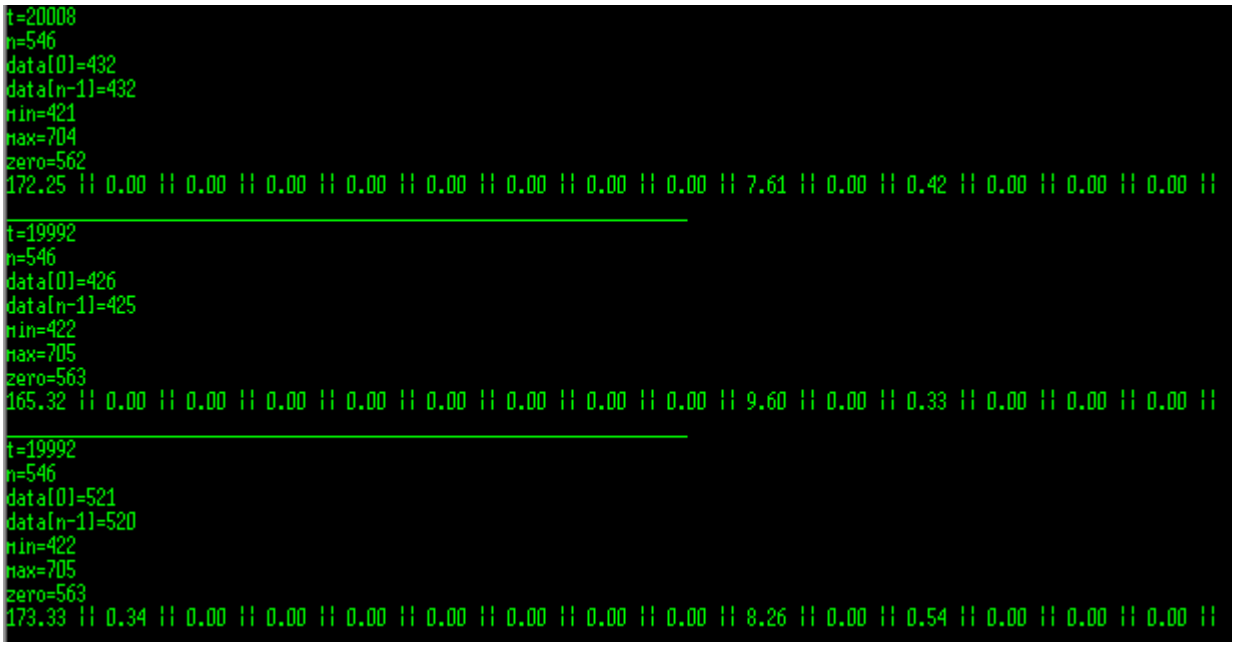


Рис. 2 – Скриншот окна терминала. Характеристика собранных данных и детектируемый ряд первых 15-ти гармоник
Fig. 2 – Screenshot of the terminal window. The characteristic of the collected data and the detectable line of the first 15 harmonics

На рис. 3 представлены неотфильтрованные данные. Заметный шум в районе 2-ой гармоники (отмечен красной рамкой). В самом худшем случае шум достигает значения в 0,32 % от максимальной амплитуды. При учете этого удается удачно отфильтровать остальные гармоники. Результат удовлетворительный.

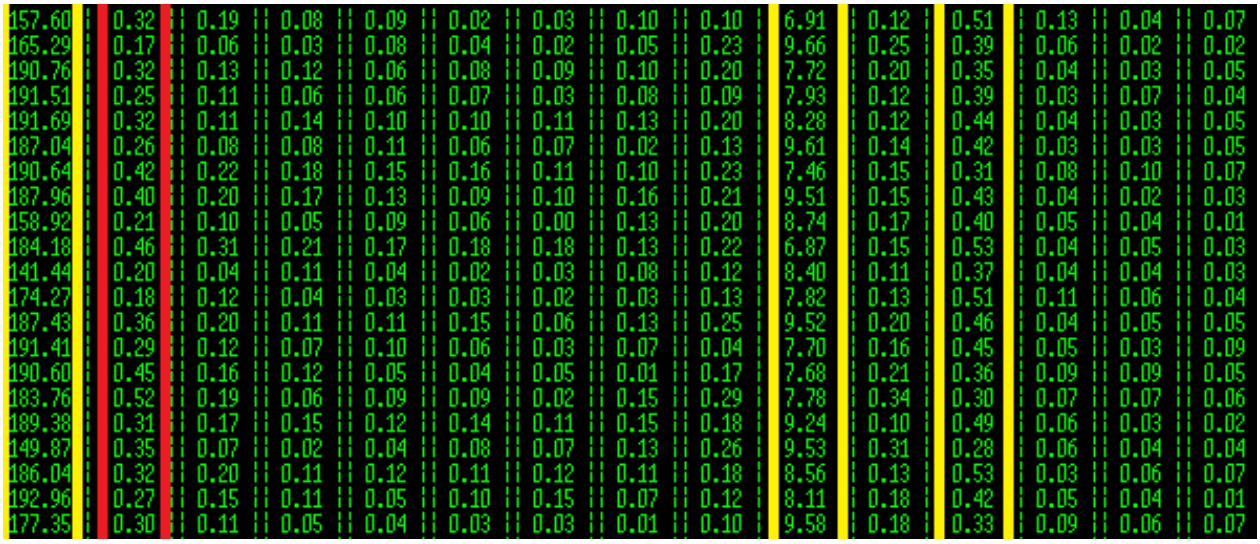


Рис. 3 – Скриншот окна терминала. Неотфильтрованные показатели амплитуд гармоник
Fig. 3 – Screenshot of the terminal window. Unfiltered amplitudes of harmonics

Успешная детекция предельно возможных гармоник амплитудой 10 мВ с частотами 1 900 Гц и 2 150 Гц наглядно показана на рис. 4. Колебания 2 В, 50 Гц присутствуют, фильтр отсутствует.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

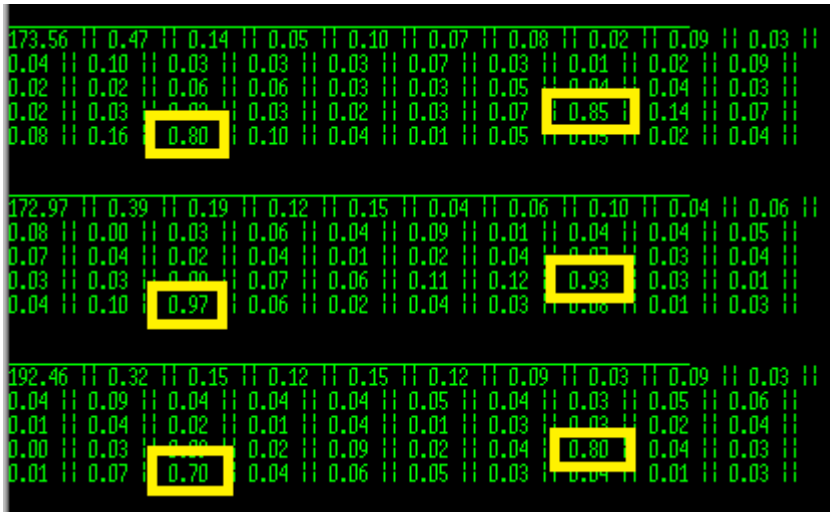


Рис. 4 – Определение гармоник с частотами, близкими к предельно возможным
Fig. 4 – Determination of harmonics with frequencies close to the maximum possible

Для быстрой и удобной оценки присутствующих гармоник информация выводится на LCD-дисплей (рис. 5): 10 гармоник на строчку, порядковые номера совпадают. Зафиксированные частоты, помимо 50 Гц, – 400 Гц и 800 Гц.

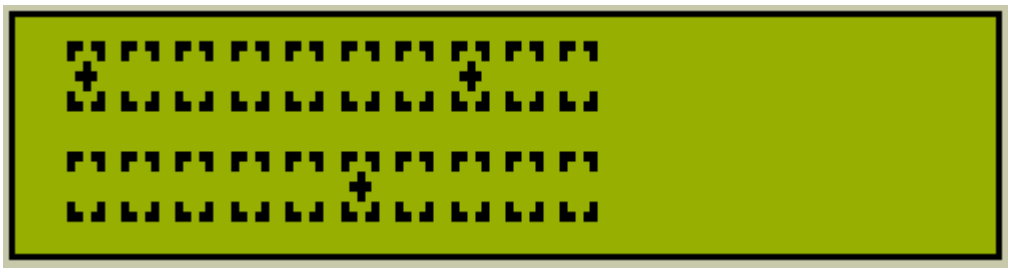


Рис. 5 – Индикация присутствующих гармоник на LCD-дисплее
Fig. 5 – Indication of the harmonics present on the LCD display

4. Заключение

Вопросам качества электрической энергии уделяется значительное внимание, о чем свидетельствует проведенный литературный анализ. В ходе выполнения работы отмечено, что присутствие высших гармоник напряжения и тока, источником которых является нелинейная нагрузка, отрицательно сказывается на качестве электрической энергии в промышленной сети. Это ведет к большим экономическим потерям поставщиков электрической энергии, а также к снижению надежности, долговечности компонентов сети. Генерируемая возобновляемыми источниками, в частности солнечными электростанциями, электрическая энергия также должна соответствовать требованиям по ее качеству. Для непрерывного мониторинга параметров напряжения и тока на выходе инверторов солнечной электростанции и выявления наличия высших гармоник был разработан прибор, функционирующий по принципу разложения функции в ряд Фурье. Выполнено моделирование работы прибора и приведены его результаты. Полученные возможности прибора отражены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики разработанного прибора

Table 2

The main characteristics of the developed device

Максимальный порядковый номер обнаруживаемой гармоники	50
Максимальная частота обнаруживаемой гармоники	2 500 Гц
Минимальная амплитуда обнаруживаемой гармоники	0,5 мВ на стороне 0 ÷ 5 В, 1,5 В на стороне 220
Время детекции одной гармоники	1 с
Стоимость главных электронных компонентов без учета доставки	216 руб.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Список литературы

[1] Измерение и устранение гармоник. Выпуск № 30. Техническая коллекция SchneiderElectric, 2009. – 48 с.

[2] Саенко, Ю.Л. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками / Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, Е.В. Бараненко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – Вып. 26. – С. 204–210.

[3] Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко: 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

[4] Asiminoaei, L. Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications / L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen // Proceedings of Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005 "APEC 2005". – P. 635–641.

[5] Довгун, А.А. Автоматизация расчета высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой / А.А. Довгун [и др.] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2016. – №3. – С. 46–52.

[6] Durdhavale, S.R. A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System / S.R. Durdhavale, D.D. Ahire // International Journal of Computer Applications. – 2016. – Vol. 143. – No. 10. – P. 42–45.

[7] Bracewell, R.N. Computing with the Hartley Transform / R.N. Bracewell // Computers in Physics. – 1995. – Vol. 9 (4). – P. 373–379.

[8] ArduinoFHTlibrary [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.05.2018).

[9] Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с фр. под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

[10] ArduinoUnoRev3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.05.2018).

References

[1] Measurement and elimination of harmonics: Issue 30. Technical collection of Schneider Electric (Izmerenie i ustranenie garmonik: vypusk 30. Tekhnicheskaya kollekciya Schneider Electric), 2009, 48 p.

[2] Saenko Yu.L., Baranenko T., Baranenko E.V. Methods for compensating reactive power in networks with nonlinear loads (Metody kompensacii reaktivnoi moshchnosti v setyah s nelinejnymi nagruzkami). *Bulletin of the Priazov State Technical University. Series: Engineering science*, 2013;26:204–210 (in Russ.).

[3] Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises (Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatii). Moscow: Energoatomizdat, 2000, 331 p. (in Russ.).

[4] Asiminoaei L., Blaabjerg F., Hansen S. Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications. *Proceedings of Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005 "APEC 2005"*, pp. 635–641.

[5] Dovgun A.A., Alferov.A.A. , AlferovaT.V. , Rudenko Yu.A. Automation of higher harmonics calculation in electrical networks of industrial enterprises with nonlinear load (Avtomatizaciya rascheta vysshih garmoniki v elektricheskih setyah promyshlennyh predpriyatii s nelinejnoi nagruzkoi). *Bulletin of P.O. Suhoy GGTU*, 2016;(3):46–52 (in Russ.).

[6] Durdhavale S.R., Ahire D.D.A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System. *International Journal of Computer Applications*, 2016;143(10):42–45.

[7] Bracewell, R.N. Computing with the Hartley Transform. *Computers in Physics*, 1995:9(4):373–379.

[8] ArduinoFHTlibrary [E-resource]. Available on: http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT (05.01.2018).

[9] Ango A. Mathematics for electric and radio engineers (Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov). Moscow: Nauka Publ., 1964, 772 p.

[10] ArduinoUnoRev3 [E-resource]. – Available on: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3 (05.01.2018).

Транслитерация по BSI

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Роберт Александрович Амерханов

Международная ассоциация альтернативной энергетики и экологии (IAAEE) по представлению Наградного комитета редколлегии Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE) №207/2018 вручает высшую награду ISJAEE – Орден Антуана де Сент-Экзюпери «За повышение качества жизни на планете людей» – доктору технических наук, профессору Роберту Александровичу Амерханову.

Роберт Александрович Амерханов – доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заслуженный деятель науки Кубани (1998 г.), заслуженный работник высшей школы РФ (2004 г.), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2007 г.), Кавалер Ордена Почета РФ (2008 г.), почетный работник по науке и технике РФ (2011 г.), награжден почетной грамотой Президента РФ Путина Владимира Владимировича (2014 г.), «Радетель Краснодара» – диплом и памятная медаль (2015 г.), президент Академии научно-технического и социального прогресса Краснодарского края имени Б.Н. Пономаренко (с 2013 г.).

ПОЗДРАВЛЕНИЯ

Международная ассоциация альтернативной энергетики и экологии (IAAEE) и редколлегия Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE) поздравляют доктора технических наук, профессора Роберта Александровича Амерханова с юбилеем и получением Ордена Антуана де Сент Экзюпери «За повышение качества жизни на планете людей».

Желаем счастья, здоровья, радости и дальнейших творческих успехов на благо альтернативной энергетики и экологии!

МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCES

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СОВЕТ МИНИСТРОВ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ
КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМ. В.И. ВЕРНАДСКОГО
ФИЗИКО–ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМ. В.И. ВЕРНАДСКОГО

ПРИ УЧАСТИИ:
МИНИСТЕРСТВА ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
МИНИСТЕРСТВА ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ
РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
СОЮЗА СТРОИТЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
РОССИЙСКОЙ АССОЦИАЦИИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ
АССОЦИАЦИИ ВОК
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК
ЛЮБЛИНСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ПОЛЬСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ПОЛЬША)
ООО ДУСТИ-АМИРХОН РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
(РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН)

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

I МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
"ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ПРИРОДООБУСТРОЙСТВЕ"

17–21 сентября 2018
Евпатория, Республика Крым

Цель конференции

Формирование своевременных ответов на «большие вызовы» согласно Стратегии научно-технологического развития РФ, путем становления опережающего характера содержания образования, развития инновационных технологий в инженерных системах, строительстве, производстве строительных материалов и изделий, природообустройстве.

Задачи конференции

Состояние и пути решения научных проблем по инженерным системам и энергоэффективному строительству и природообустройству, научные достижения в этих отраслях, результаты исследований и их внедрение в производство.

Представление научных и практических результатов российских и зарубежных исследовательских центров, научных школ, которые занимаются проблемами инженерных систем и энергоэффективности в строительстве и природообустройстве.

Интеграция российских и зарубежных специалистов и научных школ в области подготовки специалистов по инженерным системам и энергоэффективности в строительстве и природообустройстве, а также исследований и практического использования их результатов.

Работа конференции планируется по следующим секциям:

1. **Водоснабжение, водоотведение, акватроника.**

Тематики: водоснабжение, водоотведение, строительные системы охраны водных ресурсов, акватроника.

2. **Тепло-, газоснабжение и вентиляция.**

Тематики: энергоэффективные системы теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования, газоснабжения. энергоэффективные здания и сооружения. возобновляемые и альтернативные источники тепловой энергии.

2. **Организация и технологии строительного производства, строительные материалы и конструкции.**

Тематики: проблемы энерго- и материалосбережения| в технике и технологиях строительства и природообустройства, строительные конструкции, здания и сооружения, строительные материалы и изделия.

3. **Электроэнергетика и возобновляемые источники энергии.**

Тематики: электроснабжение, электрические системы и сети, электрооборудование, релейная защита и автоматика, освещение, использование возобновляемых источников электроэнергии.

Организаторы:

Место проведения:

Конференция проводится в современном отеле в г. Евпатория на Южном берегу Крыма. Размещение участников в комфортабельных номерах. Проживание и питание участники оплачивают самостоятельно в зависимости от сроков пребывания и типа номера. Стоимость проживания с трехразовым питанием до 2500 рублей в сутки. Для бронирования размещения просим сообщить сроки заезда и пребывания до 17.08.2018 г. на электронный адрес конференции: ***energia-09@mail.ru***.

Участники конференции будут доставлены в отель из г. Симферополя автобусом.

Время работы конференции:

17.09.2018. – Заезд и размещение участников
18.09.2018. – Открытие конференции, пленарное заседание.
19.09.2018. – Работа в секциях.
20.09.2018. – Заключительное пленарное заседание.
21.09.2018. – Отъезд участников конференции.

Оплата за участие в конференции:

Организационный взнос участника конференции составляет в сумме эквивалентной – 1500 рублей, который включает регистрацию, издание тезисов докладов, организационные расходы, информационный пакет участника. Оргвзнос оплачивается при регистрации при наличии заполненной регистрационной формы участника. Для получения регистрационной формы и счета обращайтесь по тел.: +7(978)7250028
или на электронный адрес ***energia-09@mail.ru***.

Участники из других стран платят оргвзнос при регистрации во время проведения конференции.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Научный комитет

С.И. ФЕДОРКИН – *председатель*
О.Н. ЗАЙЦЕВ – *сопредседатель*
И.В. НИКОЛЕНКО – *сопредседатель*
Э.И. САЛИЕВ – *сопредседатель*
Н.В. ЛЮБОМИРСКИ – *сопредседатель*
Э.А. БЕКИРОВ – *сопредседатель*

Члены комитета:

Бакаева Н.В., *ЮЗГУ, Курск*
Bok T., *Munich (Germany)*
Bulgakov A. G. *Dresden (Germany)*
Ветрова Н.М., *АСА КФУ, Симферополь*
Гогина Е.С., *МГАСУ, Москва*
Дворецкий А.Т., *АСА КФУ, Симферополь*
Krasowsky E., *Lublin, (Poland)*
Mukhtarov Amirhan K. *(Tajikistan)*
Самбурский Г.А., *РАВВ, Москва* **Субботкин Л.Д.,** *АСА КФУ, Симферополь*
Толстой М.Ю., *ИрНИТУ, Иркутск*
Урецкий Е.А. - *БИТА, Брест (Белоруссия)*
Цопа Н.В., *АСА КФУ, Симферополь*
Чемодуров В.Т., *АСА КФУ, Симферополь*
Шаленный В.Т., *АСА КФУ, Симферополь*

Организационный комитет

С. И. ФЕДОРКИН – председатель
Э.И. САЛИЕВ – вицепредседатель
О.Н. ЗАЙЦЕВ – вицепредседатель
И.В. НИКОЛЕНКО – вицепредседатель
Н.В. ЛЮБОМИРСКИЙ – вицепредседатель
Э.А. БЕКИРОВ - вицепредседатель
Р.С. КРЫМОВ – ученый секретарь
Н.А. СТЕПАНЦОВА – секретарь

Дополнительную информацию можно получить:

Адрес для переписки:
Академия строительства и архитектуры
ул. Киевска,181,
Симферополь, 295943
Республика Крым
Россия

Э.И. Салиев – факультет ВРиЭ
О.Н. Зайцев – кафедра ТГВ
И.В. Николенко кафедра ВВиСТ

E-mail: energia-09@mail.ru

Будем благодарны за извещение
Ваших коллег об этой конференции

Информационное сообщение № 1

Международный Информационный Нобелевский Центр (МИНЦ),
Тамбовское региональное отделение Российской академии естественных наук,
Непубличное Акционерное Общество «САЛЮС»,
Российский новый университет, Тамбовский государственный технический университет

«НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ОБЩЕСТВО И МЕЖДУНАРОДНОЕ НОБЕЛЕВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ»

(Нобелевский конгресс – 12 Международная встреча-конференция лауреатов Нобелевских премий и нобелистов)
27-30 августа 2019 года, г. Тамбов (Россия)

Дорогие друзья!

Приглашаем Вас принять участие в Нобелевском Конгрессе – 12 Международной встрече-конференции лауреатов Нобелевских премий и нобелистов «***Наука, технологии, общество и Международное Нобелевское движение***», которая состоится в Тамбове (Россия) с 27 по 30 августа 2019 года. Конгресс посвящается *120-летию Нобелевских премий, 160-летию со дня рождения Эмануэля Нобеля (1859-1932), 180-летию первого нобелевского лауреата по литературе А.Сюлли-Прюдома (1839-1907) и 190-летию со дня рождения Роберта Нобеля (1829-1896).*

В заседаниях Конгресса примут участие российские и зарубежные учёные и специалисты, нобелисты, представители международных организаций, преподаватели вузов, студенты, работники информационных центров, библиотек, музеев и архивов, представители нобелевских фирм, писатели и журналисты, коллекционеры и др.

Лауреаты Нобелевских премий, их родственники и коллеги выступят с научными и популярными лекциями, проведут пресс-конференции, встречи.

Участники конгресса могут представить статьи, доклады, сообщения, краткие заметки для публикации, а также материалы по нобелистике (книги, брошюры, журнальные и газетные публикации, оригинальные документы или их копии, коллекции фотографий, открыток, марок, монет и т.п.) для выставок, или быть гостями без выступлений.

Тематика материалов: жизнь и деятельность А.Нобеля и всех представителей династии Нобелей, Нобелевские премии, Нобелевский Фонд и комитеты, нобелевские фирмы, жизнь и деятельность лауреатов Нобелевских премий, анализ работ лауреатов и развитие их идей, международное нобелевское движение, нобелевские акции в мире, наукометрия и библиометрия нобелевской информации, проблемы таланта и гениальности, исследования нобелевского уровня, а также иные аспекты нобелистики. Лауреаты Нобелевских премий могут представить доклад на любую тему.

Требования к оформлению материалов для публикации в сборнике: объём – от нескольких строк до 0,5 печ.л. (20 тыс. знаков); формат А5 (поля везде по 20 мм), без переносов; структура: заголовок, Ф.И.О. авторов, название организации, электронная почта, текст материала; таблицы, рисунки, схемы, фотографии вставлять в текст или сопровождать отдельными файлами .jpg; литература в конце материала. Оргвзнос за участие с публикацией – 10000 руб., без публикации – 3000 руб. Лучшие доклады будут опубликованы в журнале, зарегистрированном в Scopus.

Официальные языки – русский, английский, немецкий, французский.

Просьба направлять материалы для публикации и вести переписку по электронной почте до ***30 апреля 2019 г.***

Конгресс откроется торжественным заседанием, на котором состоится знакомство участников, вручение дипломов и наград, выступления. В программе предусмотрена работа в Нобелевской научной библиотеке, Музее семейства Нобелей и лауреатов Нобелевских премий, Нобелевском архиве, выставка-продажа продукции издательства МИНЦ «Нобелистика», мероприятия культурной программы.

Адрес Оргкомитета:
Россия, 392680. г. Тамбов, ул. Монтажников, 3. МИНЦ.
Телефоны: +7-4752-504600; +7-910-750-2807.
E-Mail: vmtyutyunnik@gmail.com или vmt@tmb.ru

Председатель Оргкомитета, президент МИНЦ,
профессор ***В.М.Тютюнник***

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Announcement No.1

International Information Nobel Centre, Ltd. (IINC, Russia), RANS Tambov Regional Department (Russia),
Not Public Joint Stock Company "SALUS" (Russia),
Russian New University, Tambov State Technical University

«SCIENCE, TECHNOLOGY, SOCIETY AND INTERNATIONAL NOBEL MOVEMENT»

International Nobel Congress
(The Twelve International Meeting-Conference for Nobel Prize Winners and nobelists)
August 27-30, 2019, Tambov, Russia

Dear Friends,

We invite you to take part in the International Nobel Congress – 12th International Meeting-Conference for Nobel Prize Winners and nobelists ***"Science, Technology, Society and International Nobel Movement"***, which will take place in Tambov (Russia) 27-30 August 2019. The Congress is devoted to the *120th anniversary of the Nobel Prizes, the 160th anniversary of Emanuel Nobel (1859-1932), 180th anniversary of the first Nobel Prize Winner in Literature A. Sully Prudhomme (1839-1907) and 190th anniversary of Robert Nobel (1829-1896).*

The Russian and foreign scientists and specialists, nobelists, the representatives of the international organizations, University professors, students, the employees of information centers, libraries, museums and archives, the representatives of Nobel's firms, writers and journalists, collectors and other people will take part in the International Congress.

The Nobel Prize Laureates, their relatives and colleagues will make scientific and popular lectures, hold press conferences and meetings.

The participants of the Congress can present articles, reports, abstracts, short notes for the publication, as well as materials on nobelistics (books, booklets, magazine and newspaper articles, original documents or their copies, the collections of photographs, stamps, coins, etc.) for exhibition or attend the Congress without any reports.

The main topics: A.Nobel's and his relatives' life and activity, the Nobel Prizes, The Nobel Foundation and Nobel Committees, Nobel's firms, the Nobel Prize Winners' life and activity, the analysis of laureates' works and the development of their ideas, the International Nobel movement, the Nobel actions in the world, bioscientometrics and biobibliometrics of the Nobel information, problems of talent and genius, Nobel-level researches, and other aspects of nobelistics. Nobel Prize Winners may report on any topic.

The requirements for the design of materials for the publication in the Collection: volume is from several lines up to 0,5 printed sheet (20000 letters); format A5 (all margins 20 mm), without any hyphens; structure: title, names of authors, institutions, post address, telephones, e-mail, the text itself; tables, figures, photos must be inserted into the text or presented in separate jpeg-files; references are at the end of text.

Organizing fee for participation with publishing – $200, without publishing – $50.

Official languages – Russian, English, German, French.

*Deadline for publications – **April 30, 2019.***

Please correspond with the Organization Committee and send materials for the publication by *E-Mail*.

The Congress will be opened with the grand meeting at which the acquaintance of participants, the presentation of diplomas and prizes, speeches will take place. The program includes conferences in the Nobel Scientific Library, the Museum of the Nobel's Family and Nobel Prize Winners, and the Nobel Archives, the exhibition-selling of the "Nobelistics" IINC Publishing House books, cultural arrangements.

The Organization Committee address:
IINC, 3 Montazhnikov Street, Tambov, 392680, Russia.
Telephones: +7-4752-504600; +7-910-750-2807.
E-Mail: vmtyutyunnik@gmail.com or vmt@tmb.ru
URL: www.nobel-centre.com

*Professor **V.M.Tyutyunnik**,*
IINC President,
Organization Committee Chairman

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

СТАТУТЫ*

НЕПУБЛИЧНОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «САЛЮС» (НАО «САЛЮС») и МЕЖДУНАРОДНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО НОБЕЛЕВСКОГО ЦЕНТРА (МИНЦ), объявленные 24.10.2017 г., с изменениями от 01.06.2018 г. и 07.07.2018 г.

Вводная часть

§1. На пресс-конференции в рамках Нобелевского конгресса – XI Международной встречи-конференции лауреатов Нобелевских премий и нобелистов «Наука, технологии, общество и Международное Нобелевское движение», которая состоялась в Тамбове (Россия) с 24 по 28 октября 2017 г., руководство «Нобелевского Траста Устойчивости» (НТУ) при участии НАО «САЛЮС» и МИНЦ официально объявило об учреждении одной международной ежегодной Премии НТУ «за технологические решения, способствующие устойчивому развитию человечества».

НАО «САЛЮС» и МИНЦ приняли решение значительно развить и расширить идею НТУ и учредить собственную серию ежегодных международных наград «за технологические решения, способствующие устойчивому развитию человечества» (далее – «Награда»). Этот новый подход, основанный на синергии бизнеса и науки, позволит провести качественный отбор технологических решений, способствующих устойчивому развитию человечества, с изучением и объединением международных практик, для последующего внедрения номинированных технологий и их сопровождения вплоть до запуска в серийное производство и налаживания закупочно-сбытовых цепочек. Инфраструктуры компаний «САЛЮС» и МИНЦ позволяют реализовать эту задачу, а также ускорить трансфер научных технологий в международном масштабе с защитой прав интеллектуальной собственности.

§2. Юридическим основанием для учреждения Премии являются: Соглашение о намерениях между НАО «САЛЮС» и НТУ о реализации инвестиционных проектов, которое подписано 24 октября 2017 г. в Тамбове; Соглашение о сотрудничестве между НАО «САЛЮС» и МИНЦ, подписанное 15 марта 2018 г. в Москве; Соглашение о намерениях между НТУ, НАО «САЛЮС» и МИНЦ, подписанное в Стокгольме 22 мая 2018 г. награждающая организация

§3. Награда учреждается с 2018 г. Первое вручение состоится во втором квартале 2019 г. в Санкт-Петербурге (Россия). Последующие ежегодные вручения могут осуществляться в различных городах. Награждающими организациями являются НАО «САЛЮС» и МИНЦ; генеральный спонсор Награды – НАО «САЛЮС»; МИНЦ отвечает за научно-организационную поддержку Награды.

* Статуты – собрание правил, определяющих полномочия и порядок деятельности.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

§4. НАО «САЛЮС» при научно-организационной поддержке МИНЦ проводят ежегодный международный конкурсный отбор и *вручают не ограничиваемое заранее количество Наград в виде дипломов и инвестиционных договоров по каждому из 10 направлений*, описанных в §12. Сумма договора определяется с каждым победителем индивидуально. Общий инвестиционный бюджет НАО «САЛЮС» составляет 50.000.000 (Пятьдесят миллионов) долларов США. Правила проведения конкурсного отбора, подписания договоров, последующего инвестирования и продвижения проектов-победителей описаны ниже.

§5. Статуты являются общими для всех, на кого возложено распределение Наград, и кто определяет способ и условия Наград, заключения и развития инвестиционных договоров; они составлены и утверждены НАО «САЛЮС» и МИНЦ.

§6. Награды присуждаются ежегодно лично авторам (не более трёх на один проект) выдающихся технологических решений, использование которых направлено на пользу человечеству и способствует его устойчивому развитию. Требование Награды о том, что она должна относиться к технологическим работам, сделанным в течение прошедшего года, должно пониматься в том смысле, что заслуживающими награждения будут считаться разработки самых новых технологий в областях, указанных ниже; более ранние работы принимаются во внимание в том случае, когда их значение будет доказано в последнее время. *Организации, учреждения, предприятия и фирмы не могут быть удостоены Награды.*

§7. Всякое технологическое решение может быть допущено к конкурсу на Награду, если оно опубликовано в печатном или электронном виде в одном из журналов мира, а также имеется, по крайней мере, опытный образец, доступный для экспонирования.

§8. Награда может быть разделена между двумя или тремя лицами, если вклад каждого из них будет признан одинаково достойным. Если награждаемая технологическая разработка является результатом творчества двух или трёх лиц, то Награда может быть выдана только всем вместе. Технология, автор которой умер, не может быть награждена.

§9. Разработанная технология не может быть удостоена Награды до тех пор, пока испытанием, по крайней мере, опытного образца, или надлежащим экспертным рассмотрением ни будет доказана её значимость.

§10. Чтобы быть допущенным к конкурсу в качестве номинанта на Награду, необходимо быть письменно номинированным лицом, уполномоченным делать такие предложения. Уполномоченными лицами (номинаторами) являются местные или иностранные учёные и специалисты в соответствующей области технологий, которые могут номинировать от имени научной или учебной организации, а также от имени бизнес-структуры.

Ежегодный конкурс рассматривает все предложения, поступившие **до 15 ноября предшествующего года.**

§11. Каждое выдвижение должно быть мотивированно и сопровождено письменными документами, подтверждающими мотивацию. Номинанты представляют всю документацию на английском или русском языке. В случае представления на русском языке, название проекта, авторы, аффилиация, аннотация и ключевые слова должны быть повторены на английском языке.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Выдвижение на Награду НАО «САЛЮС» и МИНЦ

§12. На Награду НАО «САЛЮС» и МИНЦ могут быть номинированы технологические разработки по следующим направлениям:

12.1. Натуральное и товарное хозяйство – технологии в сельском хозяйстве (земледелие, растениеводство, животноводство, садоводство и т.п.), лесном хозяйстве, рыбоводстве, промыслах, мелиорации и т.п.

12.2. Добыча и очистка воды – технологии очистки природной воды, насосное и трубопроводное оборудование, технологии опреснения, получения чистой питьевой воды, анализа качества воды и т.п.

12.3. Охрана природы и экологической среды человека – технологии воздуха и окружающей среды, мониторинга биосферы и техносферы, определения загрязнений и борьбы с ними, защиты воздуха и окружающей среды, утилизации мусора и твёрдых бытовых отходов и т.п.

12.4. Чистая промышленность – технологии экологически чистого производства, предотвращения загрязнений окружающей среды, технологии замкнутых производственных циклов, сокращения выбросов и сбросов загрязняющих окружающую среду отходов производства, сокращения ресурсоёмкости и землеёмкости производств, снижения риска для здоровья персонала, улучшения условий труда и т.п.

12.5. Транспорт и транспортировка – технологии перемещения и хранения сырья, продуктов производства и грузов, повышения безопасности и надёжности железнодорожного, автомобильного, водного, воздушного, трубопроводного и общественного транспорта и т.п.

12.6. Возобновляемые альтернативные источники энергии – технологии использования энергии ветра, солнца, приливов и отливов, морских течений, биомассы и биогаза, геотермальной энергии, тепловой энергии океанов, водородной и т.п. энергетики.

12.7. Использование и потребление энергии – технологии повышения эффективности использования и потребления, накопления и хранения всех видов энергии, полученных любым способом.

12.8. Генная инженерия и биотехнология – технологии использования живых организмов (или их составных частей) в практических целях на базе достижений молекулярной биологии, технологии манипуляций с веществом наследственности и т.п.

12.9. Медицина и здравоохранение, физическая культура и спорт – лечебно-профилактические, санитарно-профилактические, аптечные, фармацевтические, физкультурные, спортивные и иные технологии и технические решения.

12.10. Социальная сфера и быт – технологии устойчивого развития социальной сферы общества и человека, быта личности и семьи, повышения благосостояния людей в жилищно-коммунальном хозяйстве, бытовом обслуживании, образовании, культуре, искусстве, туризме и отдыхе, розничной торговле, общественном питании и т.п.

§13. Каждый номинант на Награду НАО «САЛЮС» и МИНЦ представляет:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

13.1. Детальное описание технологического решения (проекта) в электронном виде на адрес: tyutyunnik.49@mail.ru. Это описание будет выставлено на сайте МИНЦ (www.nobel-centre.com) для открытого общественного обсуждения, начиная с 20 июля 2018 г.

13.2. Фотографию (в электронном виде) опытного образца разработанного технологического решения, которая также будет выставлена на сайт МИНЦ.

§14. Предпочтительная структура описания технологического решения (проекта) должна включать следующие обязательные элементы (количество слайдов не регламентируется):

14.1. Название технологического решения (проекта).

14.2. Номер направления из §12.

14.3. Автор (авторы): фамилия, имя, отчество.

14.4. Аффилиация каждого автора: полное наименовании организации (учреждения, предприятия, фирмы), юридический и почтовый адреса, телефон, факс, E-Mail. Аннотация (не менее 100 слов), ключевые слова.

14.5. Введение (область исследования, аналитический литературный обзор, ограничения и недостатки существующих аналогичных технологических решений, постановка проблемы, цели и задач).

14.6. Детальное текстовое описание предлагаемого технологического решения с приведением фотографий, рисунков, схем, таблиц, формул и т.п.

14.7. Результаты испытаний (тестирования) опытного образца и их анализ (обязательно указывается место испытания, условия, участники и эксперты).

14.8. Сведения об экспертной оценке функционирования предлагаемого технического и технологического решения (если имеются).

14.9. Коммерциализационная стратегия проекта – расчёт окупаемости, требуемые ресурсы (трудовые, информационные, материальные, финансовые и др.), матрица оценки рисков, SWOT-анализ (возможные негативные последствия и способы их преодоления).

14.10. Заключение – предложения и выводы по тактике и стратегии развития проекта. В выводах необходимо указать один из трёх вариантов:

а) необходимы средства и другие ресурсы для завершения исследований и испытаний опытного образца;

б) необходимы средства и другие ресурсы, а также администрирование для внедрения технологии;

в) необходимы средства и другие ресурсы, а также администрирование для продажи разработанной и опробованной технологии.

14.11. Список публикаций автора (авторов) по теме проекта. Если имеются патенты, то они обязательно включаются в список, и такие авторы имеют преимущества в процедуре рассмотрения номинаций.

14.12. Скан-копии подписей авторов.

Экспертиза представленных проектов

§15. Каждое технологическое решение, представленное на Награду НАО «САЛЮС» и МИНЦ, подвергается экспертной оценке в несколько этапов:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

15.1. Техническая экспертиза – осуществляется научными сотрудниками МИНЦ и состоит в оценке формального соответствия номинации требованиям, описанным в данных Статутах. Сроки – со дня подачи номинации до 25 ноября текущего года. По результатам экспертизы заполняется специальная «Карта технической экспертизы» (Приложение 1), которая передаётся вместе с номинацией на последующие этапы. Технологические решения, направленные не на пользу человечеству, отфильтровываются на этом этапе. Финансирование технической экспертизы осуществляет НАО «САЛЮС» на основе отдельных договоров, заключённых с МИНЦ.

15.2. Сущностная институциональная экспертиза – осуществляется в институтах академий наук, университетах и других высших учебных заведениях, а также в известных научных учреждениях, в которых по их собственной инициативе создаются «Комитеты по Награде». Состав Комитета: председатель, учёный секретарь, 1-3 члена. Все 3-5 членов Комитета должны быть ведущими специалистами по одному из перечисленных в §12 направлений. Если Комитет решает номинировать или подвергать экспертизе номинации по двум или более направлениям, то в состав Комитета вводятся 1-3 ведущих специалиста по каждому направлению. Сроки – со дня подачи номинации до 1 февраля следующего года. По результатам экспертизы заполняется специальная «Карта сущностной экспертизы» (Приложение 2), которая передаётся на заключительный этап в МИНЦ. Финансирование сущностной институциональной экспертизы осуществляется организацией, в которой создан Комитет.

15.3. Сущностная индивидуальная экспертиза – осуществляется индивидуально отобранными экспертами из России и зарубежных стран. База данных таких экспертов «Эксперты по Наградам» будет формироваться в МИНЦ постепенно по мере поступления номинаций, начиная с 20 июля 2018 г. Сроки – со дня подачи номинации до 1 февраля следующего года. По результатам экспертизы заполняется специальная «Карта сущностной экспертизы» (Приложение 2), которая передаётся на заключительный этап в МИНЦ. Финансирование сущностной индивидуальной экспертизы осуществляет НАО «САЛЮС» посредством заключения договора с каждым экспертом-индивидуумом.

15.4. Сущностная заключительная экспертиза – отбор награждённых – осуществляется из числа прошедших экспертизы номинантов «Премиальным Комитетом» в составе двух руководителей НАО «САЛЮС» и МИНЦ, а также (при необходимости) привлечённых учёных и специалистов. Награждённые определяются по каждому из перечисленных в §12 направлению. Объявление награждённых осуществляется на специальной пресс-конференции 12 февраля – в Международный день науки и гуманизма (Darwin Day). Место пресс-конференции определяется отдельно.

§16. Заключения относительно присуждения Наград «Премиальным Комитетом» делаются негласно. Протестов относительно награждений быть не должно. Если появятся разногласия при обсуждении кандидатов, то их запрещается вносить в протокол заседания или обнародовать иными способами. Всю документацию по выдвижению и награждению хранит МИНЦ.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

§17. Для оказания содействия в предварительном рассмотрении работ и для выполнения других задач НАО «САЛЮС» и МИНЦ могут учредить научные институты и другие организации, предприятия, учреждения, фирмы.

Награды НАО «САЛЮС» и МИНЦ

§18. После сущностной заключительной экспертизы каждый лауреат и номинант получает официальное извещение.

§19. Каждый лауреат и номинант, прошедший сущностную экспертизу (п.п. 15.2, 15.3 и 15.4), после получения извещения, размещает свой опытный образец и описание в электронном и бумажном видах в различных павильонах ВДНХ (в соответствии с направлением номинированного проекта), с которыми предварительно НАО «САЛЮС» заключает договора аренды выставочных площадей. Сроки экспонирования: один месяц до вручения наград в 2019 г.

Павильоны для экспонирования:

Направление 12.1: павильон 36 «Переработка продукции сельского хозяйства».

Направление 12.2: павильон 20 «Химическая промышленность.

Направление 12.3: павильон 63 «Охрана природы».

Направление 12.4: павильон 11 «Металлургия».

Направление 12.5: павильон 26 «Транспорт».

Направление 12.6: павильон 55 «Электрификация».

Направление 12.7: павильон 55 «Электрификация».

Направление 12.8: павильон 30 «Микробиологическая промышленность».

Направление 12.9: павильон 13 «Здравоохранение», павильон 27 «Физкультура и спорт».

Направление 12.10: павильон 12 «Выставочный центр профсоюзов».

§20. Каждый лауреат (от каждого из 10 направлений) обязан прочитать 30-минутную публичную лекцию с демонстрацией слайдов и показом функционирования награждённой технологии на специально организуемой двухдневной научно-технической конференции «Технологии будущего – на благо человечества». Место проведения: павильон №75 «Международный выставочный центр МосЭкспо» ВДНХ. Время проведения: два дня до вручения наград в 2019 г. Подробная программа будет сформирована МИНЦ после 12 февраля 2019 г.

§21. Каждый лауреат и номинант, прошедший сущностную экспертизу, а также почётные гости, получают бесплатный доступ в павильоны для экспонирования и публичных лекций. Остальные слушатели получают доступ в соответствии с купленными билетами.

§22. Все лауреаты, номинанты, прошедшие сущностную экспертизу, почётные гости, представители НАО «САЛЮС» и МИНЦ переезжают из Москвы в С.-Петербург поездами «Сапсан», которые отправляются с Ленинградского вокзала в 15.30, 15.40, 17.40 и 19.30. Время в пути – около 4-х часов.

§23. Торжественная церемония награждения производится в Большом концертном зале «Октябрьский» (С.-Петербург, Лиговский проспект, 6) вместимостью 3700 мест, с 16.00 до 17.30 час. Точная дата будет определена позже. Информация о продаже билетов будет объявлена дополнительно не позже 25 ноября 2018 г.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Формирование списка приглашённых (почётных гостей, представителей государств, научных и технических кругов, спонсоров, представителей СМИ и др.), подготовка пригласительных и входных билетов, сертификатов, выбор оркестра, музыкальных произведений, артистов, украшений зала, дресс-кода и т.п. для торжественной церемонии вручения Награды осуществляется НАО «САЛЮС» и МИНЦ.

§24. Каждый лауреат Награды получает специально оформленный диплом, а также подписывает инвестиционный договор с руководителем НАО «САЛЮС»: с первыми 10-ю лауреатами – публично в С.-Петербурге, с остальными – за 1 день до торжества в Москве.

Разработку макетов и изготовление дипломов и инвестиционных договоров осуществляет НАО «САЛЮС» и МИНЦ.

§25. После торжественной церемонии награждений почётные гости приглашаются на гала-ужин в один из банкетных залов С.-Петербурга (по специальным пригласительным билетам), который состоится с 19.00 до 21.30 час. Порядок проведения гала-ужина определяется НАО «САЛЮС» и МИНЦ.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Дополнительные замечания

§26. Развивая и реализуя главную идею Награды – устойчивое развитие технологий на благо человечества, НАО «САЛЮС» при участии МИНЦ намерено осуществлять последующую организационную деятельность:

26.1. С каждым из номинантов, прошедших содержательную экспертизу, НАО «САЛЮС» подпишет инвестиционный договор для сопровождения, мониторинга и оценки перспектив использования награждённой технологии – насколько эта технология устойчиво развивалась в течение года после награждения.

26.2. Со всеми номинантами, которые не удостоены Награды в текущем году, но успешно прошли содержательную экспертизу, НАО «САЛЮС» осуществит ту же деятельность, что описана в п.26.1.

Изменения в Статутах

§27. Предложения об изменениях в Статутах могут быть выдвинуты НАО «САЛЮС» или МИНЦ; изменения вносятся после согласования с каждой из сторон.

Генеральный директор НАО «САЛЮС»	Генеральный директор ООО «МИНЦ»
Е.А.Иванков	В.М.Тютюнник

ПОЯСНЕНИЯ К СТАТУТАМ

Непубличное акционерное общество «САЛЮС», НАО «САЛЮС» ("SALUS") является Международной Группой Компаний, имеет штаб-квартиру в Москве и осуществляет предпринимательскую деятельность с 2012 г. Является членом Финансово-банковской ассоциации стран участников Евроазиатского сотрудничества (ФБА ЕАС), Центральным контрагентом на Универсальной товарно-сырьевой бирже Евразийского сотрудничества (УТСБ ЕС). НАО «САЛЮС» осуществляет консультирование бизнес-структур по вопросам коммерческой деятельности и управления, готовит документацию к проведению биржевых торгов; выполняет юридическое сопровождения сделок, доверительное управление, управление активами; проводит инвестиционную деятельность, сделки купли-продажи форвардных и фьючерсных контрактов, свопов и аукционов, имущественных прав и ценных бумаг. НАО «САЛЮС» имеет широкую сеть региональных и зарубежных представительств, является управляющей компанией Премии, состоит в договорных отношениях с МИНЦ и другими отечественными и международными организациями. Главные условия функционирования компании – открытость, честность, надёжность, заинтересованность в максимальном удовлетворении требований клиентов, постоянная нацеленность на эффективное и перспективное сотрудничество. Бессменный руководитель – генеральный директор Е.А.Иванков – является обладателем Золотой медали МИНЦ в 2017 г.

Международный Информационный Нобелевский Центр, МИНЦ (International Information Nobel Centre, IINC) основан в 1987 г. в виде научно-технического кооператива «Информатик», официально зарегистрирован в 1988 г., в 1999 г. перерегистрирован в ЗАО МИНЦ, а в 2011 г. – в ООО МИНЦ. Бессменный руководитель – профессор В.М.Тютюнник (директор, президент, генеральный директор). Штаб-квартира МИНЦ все 30 лет располагается в г. Тамбове (Россия), сначала в помещениях Тамбовского филиала Московского государственного университета культуры и искусств, а с 2016 г. – в собственных. Филиалы МИНЦ открыты и работают в Москве, С.-Петербурге, Баку, Вене, Гамбурге и др. городах мира. В структуре МИНЦ: «Музей семейства Нобелей и лауреатов Нобелевских премий», «Нобелевская научная библиотека», «Архив семейства Нобелей и лауреатов Нобелевских премий», электронные базы данных по нобелистике, международное издательство МИНЦ «Нобелистика», типография. С 1989 г. проведено 11 международных встреч лауреатов Нобелевских премий и нобелистов, в которых приняло участие около 600 учёных из 32 стран мира; в 2019 г. готовится 12-й Нобелевский конгресс. Вся отечественная нобелистика родилась в Тамбове усилиями сотрудников МИНЦ и его руководителя. В настоящее время термин «нобелистика» общепризнан в мировой литературе и обозначает науку о формировании, функционировании, переработке, анализе и распространении информации, связанной с феноменом династии Нобелей, – объектно-ориентированный симбиоз науковедения и информатики. Сотрудники МИНЦ (ещё начиная с 1967 г., задолго до оформления отдельной организации, на общественных началах) проделали колоссальную исследовательскую и организационную работу не только по популяризации Нобелевской премии; по восстановлению незаслуженно забытых в СССР/России имён многочисленного семейства Нобелей; по развитию Международного Нобелевского движения, сделав более 500 публикаций по нобелистике. Профессор В.М.Тютюнник является официальным представителем НТУ в России с 2017 г.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

STATUTES*
of The NON-PUBLIC JOINT-STOCK COMPANY "SALUS" (NPJSC "SALUS") and The INTERNATIONAL INFORMATION NOBEL CENTRE (IINC) declared on 24.10.2017, with changes from 01.06.2018 and 07.07.2018

Introductory part

§1. Guide of The Nobel Sustainability Trust (NST), with the participation of the NPJSC "SALUS" and IINC, officially announced the establishment of one of the NST annual International Prize "for technology solutions that promote to the sustainable development of mankind" at the press-conference in the framework of Nobel Congress – XI International Meeting-Conference for Nobel Prizes Winners and nobelists "Science, Technology, Society and the International Nobel Movement", which took place in Tambov (Russia) from 24 till 28 October 2017.

NPJSC "SALUS" and IINC decided to significantly develop and expand the idea of NST and to establish its own series of annual international rewards "for technology solutions that promote to the sustainable development of mankind" (hereinafter referred to as «Rewards»). This new approach based on synergies between business and science, will allow for a qualitative selection of technological solutions that contribute to the sustainable development of humankind, with the study and the unification of international practices, for the subsequent introduction of the nominated technology and their escorts up to run in batch production and establish purchasing and supply chains. Infrastructure of "SALUS" and IINC companies allow to implement this task, as well as to accelerate the transfer of research technology on an international scale with the protection of intellectual property rights.

§2. The legal basis for the establishment of the Rewards are: Agreement of intent between NST and NPJSC "SALUS" on realization of investment projects, signed on October 24, 2017; Agreement of cooperation between the NPJSC "SALUS" and IINC, signed in Moscow on March 15, 2018; Agreement of intent between the NST, NPJSC "SALUS" and IINC, signed in Stockholm on May 22, 2018.

§3. The Reward was established from 2018. The first reward ceremony will be held in the second quarter, 2019 in St.-Petersburg (Russia). Subsequent annual reward ceremonies can be carried out in various cities of Russia. NPJSC "SALUS" and IINC are awarding organizations; NPJSC "SALUS" is general sponsor of the Rewards; IINC is responsible for scientific and organizational support for the Rewards.

§4. NPJSC "SALUS" (with scientific and organizational support from IINC) spend annual international competitive selection and *hand not limited in advance number of Rewards in the form of diplomas and investment contracts for each of the 10 direction*s, described in §12. Amount of a contract is determined with each winner individually. The total investment budget of NPJSC "SALUS" is 50 million US$ (fifty million). The rules for the conduct of the selection process, the signing of contracts, subsequent investments and promotion of projects-winners are described below.

§5. The Statutes are common to all, who entrusted the distribution of Rewards and who determines how and awarding conditions and delivery, as well as for everyone who

* Статуты – собрание правил, определяющих полномочия и порядок деятельности.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

determines how and winning conditions of Rewards, the signing and development investment contracts; it drafted and approved by NPJSC "SALUS" and IINC.

§6. Rewards are awarded annually to the authors of outstanding technological solutions (no more than three authors per project), which seeks to benefit mankind and contributes to its sustainable development. Founders claim that issuance of Rewards should relate to the technological work done during the past year should be understood in the sense that merit awards will be considered the development of the newest technologies in the areas indicated below; earlier work are taken into account when their value is proven lately. *Organizations, institutions, enterprises and firms cannot be awarded.*

§7. Any technological project may be admitted to the competition for the Rewards, if it is published in print or electronic form in one of the scientific journal of the world, as well as at least a prototype available for exhibiting.

§8. Reward may be shared between two or three persons if the contribution of each of them will be recognized as equally worthy. If awarded the technological development is the result of two or three persons, Reward can only be issued together. Technology, the author of which died, could not be awarded.

§9. The developed technology cannot receive Reward until the test for at least the prototype or by the appropriate expert consideration will prove its significance.

§10. To be admitted to the competition as a nominee for the Reward, author(s) must be nominated in writing by a person authorized to make such offers. Authorized persons are local or foreign scientists and specialists in the relevant field of technology, which can nominate on behalf of scientific or academic organizations, as well as on behalf of the business structure.

The annual competition examines all suggestions received **before 15 November** of the preceding year.

§11. Each nomination must be motivated and accompanied by written evidence of the motivation. Nominators provide all documentation in English or Russian. In the case of the Russian language, project title, authors, affiliations, abstract, and keywords should be repeated in English.

The nomination for the Reward from NPJSC "SALUS" and IINC

§12. Technological development in the following areas can be nominated on the Reward from NPJSC "SALUS" and IINC:

12.1. Natural and commodity economy – agriculture technologies (farming, crop growing, livestock breeding, gardening, etc.), forestry, aquaculture, fisheries, land reclamation technologies, etc.

12.2. Extraction and purification of water – purification technology of natural water, the pump and pipeline equipment, desalination, obtaining clean drinking water, water quality analysis, etc.

12.3. The conservancy of nature and environmental human medium – technology environment and air medium, environmental monitoring of biosphere and technosphere, defining and combating pollution, protection of the air and the environment medium, disposal of garbage and solid waste, etc.

12.4. Clear industry – cleaner production technology, prevention of environmental pollution medium, technology of closed production cycles, technologies to reduce emissions and discharges of wastes polluting the medium, reduction of resource productions, reduce the risk to the health of personnel, the improvement of working conditions, etc.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

12.5. Transport and transportation – technology of moving and storage of raw materials, products and goods, improving the safety and reliability of railway, road, water, air, pipeline and public transport, etc.

12.6. Renewable alternative energy sources – wind energy technology, Sun energy technology, tides, sea currents, biomass and biogas, geothermal energy, ocean thermal energy, hydrogen energy, etc.

12.7. Use and consumption of energy – technologies to improve the efficiency of use and consumption, accumulation and storage of all types of energy obtained by any means.

12.8. Genetic engineering and biotechnology – technology for use of living organisms (or their parts) for practical purposes, based on advances in molecular biology, the technology of manipulation with the substance of heredity, etc.

12.9. Medicine and health, physical culture and sports – medical, hygiene, pharmaceutical, physical, sporting and other technologies and technical solutions.

12.10. Social sphere and everyday life – technologies of sustainable development of social sphere of society and human life, personal and family life, improving the well-being of people in housing and communal services, consumer services, education, culture, art, tourism and leisure, retail trade, catering, etc.

§13. Each nominee at NPJSC "SALUS" and IINC Rewards shall present:

13.1. Detailed description of technological solutions (project) in an electronic form to the following address: tyutyunnik.49@mail.ru. This description will be put on the IINC site (www.nobel-centre.com) for open public discussion starting from July 20, 2018.

13.2. Photo (electronically) of prototype developed technological solution, which will also be exhibited on the site.

§14. The preferred structure of the technological solution (of the project) description must include the following mandatory elements (the number of slides is not regulated):

14.1. The name of the technological solution (of the project).

14.2. The direction's number (from §12).

14.3. The author (authors): surname, name, patronymic name.

14.4. Affiliation of each author: full name of the organization (university, institute, enterprise, company), legal and postal address, phone, fax, E-Mail. Abstract (at least 100 words), key words.

14.5. Introduction (field of study, analytic literature review, limits and shortcomings of existing similar technological solutions, problem statement, goals and objectives).

14.6. Detailed text description of the proposed technological solutions (with photos, drawings, diagrams, tables, formulas, etc.).

14.7. Test results of the prototype and their analysis (be sure to specify the place of test, conditions, participants and experts).

14.8. Information about peer review of the operation of the proposed technical and technological solutions (if any).

14.9. Commercialization strategy for project: payback calculation, the required resources (labor, material, financial, etc.), the risk assessment matrix, SWOT analysis (possible negative consequences and ways to overcome them).

14.10. The conclusions and suggestions on tactics and strategy of development of the project:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

a) need money and other resources to complete the research and testing of the prototype;

b) need money and other resources, as well as administration for the introduction of technology;

c) need money and other resources, as well as administration for sale developed and proven technology.

14.11. List of publications of the author(s) on the project's topic. Patents are necessarily included in the list, and such authors have advantages in the procedure of nominations.

14.12. Scanned copies of signatures of the authors.

Examination of the submitted projects

§15. Each technology solution presented at NPJSC "SALUS" and IINC Rewards will undergo by expert evaluation in several stages:

15.1. *Technical expertise* will carry out by the IINC's research staff by evaluating of formal compliance nomination to the requirements that are described in the Statutes. Deadline is from the day of the nomination filing up to 25 November of the current year. On examination results is filled with special "Card of technical expertise" (annex 1), which is transmitted along with the nomination for the next stages. Technological solutions aimed not for the benefit of mankind, are filtered out at this stage. Financing for technical expertise is implementing a management company NPJSC "SALUS" on the basis of individual contracts concluded with IINC.

15.2. *Institutional entity expertise* is carried out in the laboratories of the Academies of Sciences, universities and other institutions of higher learning, as well as renowned scientific institutions where the "Reward Committees" will create on their own initiative. The Committee composition: Chairman, Scientific Secretary, 1-3 members. All 3-5 members of the Committee shall be the leading experts on one of the directions listed at §12. If the Committee decides to nominate or submit the nominations examination in two or more directions, then 1-3 leading specialist in each direction will introduce in the Committee composition. Deadline is from the day of filing the nomination up to 1 February of the following year. On examination results is filled with special "Card of entity expertise" (annex 2), which is transmitted along with the nomination for the next stages. Financing for entity institutional expertise is carried out by the organization that created the Committee.

15.3. *Individual entity expertise* is carried out by individually selected experts from Russia and foreign countries. The database of such experts "Rewards Experts" will be formed in IINC gradually upon receipt of the nominations, starting with July 20, 2018. Deadline is from the day of filing the nomination up to 1 February of the following year. On examination results is filled with special "Card of entity expertise" (annex 2), which is transmitted along with the nomination for the next stages. Financing for individual essential expertise is implementing a management company NPJSC "SALUS" on the basis of individual contracts concluded with each expert-individual.

15.4. *Final entity expertise* – selection of recipients – is carried out from among the nominees who passed the expertise by "The Reward Committee" consisting of two heads of NPJSC "SALUS" and IINC, as well as (optionally) attracted scientists and specialists. Winners are determined for each direction listed in §12. The proclamation of the awarded persons is performed at a special press conference on February 12, on the

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

international day of science and humanism (*Darwin Day*). Press conference place is determined separately.

§16. "The Reward Committee" final decisions regarding awards are being made behind the scenes. Protests concerning the awards should not be. If differences appear when discussing the candidates, they never carry out in the minutes of the meeting or otherwise disclose. IINC holds all documentation for nominating and rewarding.

§17. NPJSC "SALUS" (with the IINC participation) may establish research institutes and other organizations, enterprises, institutions, firms to assist in the preliminary examination of the works and to perform other tasks.

Awarding of NPJSC "SALUS" and IINC Rewards

§18. Each winner and nominee receives official notice after the final expertise.

§19. Each winner and nominee, past entity expertise (paras 15.2, 15.3 и 15.4), after receipt of the notification, will place your prototype and description in electronic and paper forms in various pavilions of The Exhibition of Achievements of National Economy (VDNH). NPJSC "SALUS" tentatively concludes a contract of lease of the VDNH exhibition space. The timing of the exhibition: one month prior to the awarding, 2019.

Pavilions for exhibiting:

Direction 12.1 in Pavilion No.36 "Processing of agricultural products".

Direction 12.2 in Pavilion No.20 "Chemical industry".

Direction 12.3 in Pavilion No.63 "Nature Conservancy".

Direction 12.4 in Pavilion No.11 "Metallurgy".

Direction 12.5 in Pavilion No.26 "Transport".

Direction 12.6 in Pavilion No.55 "Electrification".

Direction 12.7 in Pavilion No.55 "Electrification".

Direction 12.8 in Pavilion No.30 "Microbiological industry."

Direction 12.9 in Pavilion No.13 "Health care" and Pavilion No.27 "Physical training and sport".

Direction 12.10 in Pavilion No.12 "Exhibition center of Trade unions".

§20. Each winner (from each of the 10 directions) shall read 30-minute public lecture with slide show and show the functioning of awarding technology on specially organized a two-day scientific and technical conference "*The technology of the future aimed to the benefit of mankind*". Venue: Pavilion No.75 "MosExpo" International Exhibition Centre" at the VDNH. Duration: two days before the awards, 2019. A detailed programme will be formed by IINC after the February 12, 2019.

§21. Each winner and nominee, past entity expertise, as well as honorary guests receives complimentary access to the pavilions for exhibiting and public lectures. The remaining attendees receive access in accordance with purchased tickets.

§22. All winners, nominees, past entity expertise, honorary guests, representatives of the NPJSC "SALUS" and IINC are moving from Moscow to St.-Petersburg by trains "Sapsan", which are sent from the Leningrad rail station at 15.30, 15.40, 17.40 and 19.30. The length of the path is about 4 hours.

§23. The solemn awarding ceremony is performed in large concert hall "Oktyabr'sky" (S.-Petersburg, Ligovsky Prospekt, 6), with a capacity of 3700 seats, on the second quarter, 2019. Information about ticket sales will be announced no later than November 25, 2018.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

NPJSC "SALUS" and IINC are developing a list of invitees (honorary guests, representatives of states, the scientific and technological community, sponsors, media representatives, etc.), preparation of invitations and tickets, certificates, choice of the orchestra, the music, the artists, the decorations of the Hall, dress-code, etc. for the solemn awarding ceremony.

§24. Each winner of the Reward receives a specially designed diploma, as well as signs investment agreement with the head of the NPJSC "SALUS": publicly in St.-Petersburg with the first 10 laureates, for 1 day before celebrations in Moscow with the rest of the nominee.

NPJSC "SALUS" and IINC are currently developing layouts and production of diplomas and investment agreements.

§25. After the awarding ceremony honored guests invited to the gala dinner in one of the banquet halls of St.-Petersburg (by special invitation only), which will take place from 19.00 till 21.30. NPJSC "SALUS" and IINC will determined the order of holding the gala dinner.

Additional comments

§26. Developing and implementing the main idea of the Reward that is sustainable development technologies for the benefit of mankind, NPJSC "SALUS" with the participation of IINC intends to follow organizational activities:

26.1. NPJSC "SALUS" will sign an investment agreement with each of the winners and finalists of the Reward for tracking, monitoring and evaluation of the use of awarding technology, i.e. how far this technology has steadily progressed during the year after awarding.

26.2. NPJSC "SALUS" will carry out the same activities described in section 26.1, with all the nominees that are not awarded the Rewards this year, but have successfully passed an entity expertise.

Changes in the Statutes

NPJSC "SALUS" or IINC can make proposals about changes in the Statutes; changes are made after consultation with each of the parties.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

EXPLANATION OF THE STATUTES

Non-public joint-stock company "SALUS", NPJSC "SALUS", is an international group of companies, it has headquarters in Moscow and carries on business with 2012. It is a member of the Finance and Banking Association of countries that are parties to the Euro-Asian Cooperation (FBA EAC), the Central counterparty for the Universal commodity exchange of Eurasian Cooperation (UCE EAC). NPJSC "SALUS" advises businesses on questions of commercial activity and management, preparing documentation to conduct trades; carries out legal support of transactions, trust management, asset management; conducts investment activities, sale of forward and futures contracts, swaps and auctions, property rights and securities. NPJSC "SALUS" has a wide network of regional and foreign missions, is a finance managing company of the Prize, is in a contractual relationship with IINC and other domestic and international organizations. The main conditions for the functioning of the company are openness, honesty, dependability, motivation to maximize the satisfaction of customer requirements, the constant focus on effective and promising cooperation. Permanent Head is the Director-General E.A.Ivankov; he has won the IINC Gold Medal in 2017.

International Information Nobel Centre, **IINC**, founded in 1987, in the form of scientific and technological cooperative "Informatics", officially registered in 1988, re-registered to close joint-stock company IINC in 1999, and to open joint-stock company IINC in 2011. Permanent Head is Professor V.M.Tyutyunnik (Director, President, CEO). The IINC headquarters is located in the city of Tambov (Russia) of all 30 years, first, in the premises of the Tambov Branch of the Moscow State University of Culture and Arts, and resides in own premises since 2016. IINC Branches are open and working in Moscow, St.-Petersburg, Baku, Vienna, Hamburg, Bouake etc. cities around the world. In the IINC structures are: "The Museum for Nobel's family and Nobel Prize Winners", "The Nobel's Scientific Library", "The Archives of Nobel's family and Nobel Prize Winners", electronic database on nobelistics, the international publishing house "Nobelistics" IINC, and typography. 11 international meetings for the Nobel Prizes laureates and nobelists held since 1989, attended by approximately 600 scientists from 32 countries of the world; 12-th Nobel Congress prepares in 2019. All Russian nobelistics was born in Tambov by efforts of IINC employees and its head. Currently, the term *nobelistics* is recognized in world literature and refers to the science of formation, functioning, processing, analyzing and disseminating information related to the phenomenon of the Nobel's dynasty, is object-oriented symbiosis of science of science and informatics. IINC staff (since 1967, well before the registration of a separate organization, on a voluntary basis) have done tremendous research and organizational work not only to publicize the Nobel Prize, but the International Nobel movement, making more than 500 publications on nobelistics. Professor V.M.Tyutyunnik is the official representative of NST in Russia since 2017.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

VII Бакеевская Всероссийская
с международным участием конференция
«МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ
НАНООБЪЕКТЫ И ПОЛИМЕРНЫЕ
НАНОКОМПОЗИТЫ»
7–12 октября, 2018
Москва

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе регулярной **VII Бакеевской Всероссийской с международным участием конференции «Макромолекулярные нанообъекты и полимерные нанокомпозиты»**, которая будет проходить 7–12 октября 2018 г.

На конференции будут представлены последние достижения в области синтеза и модификации наночастиц, способов получения полимерных нанокомпозитов, исследования их структуры и свойств. Программой конференции предусмотрены пленарные доклады ведущих ученых, активно работающих в области полимерного материаловедения и наноматериалов, устные сообщения специалистов и аспирантов, проведение стендовых сессий.

Основные тематические направления конференции:

- *Макромолекулярные нанообъекты.*
- *Функциональные полимерные нанообъекты и нанокомпозиты.*
- *Теория и компьютерное моделирование полимерных нанокомпозитов.*
- *Полимерные композиционные наноматериалы для аддитивных технологий.*
- *Современные методы исследования наночастиц и полимерных нанокомпозитов.*

Запланировано проведение Круглого стола, посвященного наиболее актуальным вопросам производства и применения нанокомпозитов, подготовки кадров, проблемам импортозамещения.

Регистрация, прием тезисов и ранних регистрационных взносов – **до 17 июня 2018 г.**

Будем рады видеть Вас среди участников и гостей конференции!

Место проведения: санаторий «Красная Пахра» (Москва).
Сайт конференции: www.nano2018.ru
Тел. +7 (499) 135-50-53
E-mail: nano@ineos.ac.ru

Организаторы: ИНЭОС РАН, ИСПМ РАН, ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИИ И НАУК О МАТЕРИАЛАХ РАН, НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ, РФФИ, РНФ

СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

VII Bakeyev All-Russian with International Participation Conference
«MACROMOLECULE NANOOBJECTS AND POLYMER NANOCOMPOSITES»
October 7–12, 2018
Moscow, Russia

Dear colleagues!

Organizing committee cordially invites you to take part in the **VII Bakeyev All-Russian with International Participation Conference «Macromolecule Nanoobjects and Polymer Nanocomposites»** held on **07–12 October 2018** in Moscow, Russia.

At the conference it is intended to introduce the latest achievements in the field of synthesis and modification of nanoparticles, methods for obtaining polymeric nanocomposites, studies of their structure and properties. The conference program includes plenary reports of leading scientists actively working in the field of polymer materials science and nanomaterials, oral reports of specialists and post-graduate students, holding poster sessions.

Main topics of the conference:

- *Macromolecular nanoobjects;*
- *Functional polymer nanoobjects and nanocomposites;*
- *Theory and computer modeling of polymer nanocomposites;*
- *Polymer composite nanomaterials for additive technologies;*
- *Modern methods for studying nanoparticles and polymeric nanocomposites.*

Conference languages: Russian, English.

The conference is open for scientists from all countries. However, we draw your attention that the majority of the reports will be presented in Russian language, and the organizers of the conference do not provide a translation or interpreter services.

Registration, abstract acceptance, and registration fee payment are available until August 16, 2018.

Registration fee includes: accommodation, participation in all scientific events of the conference, conference materials, coffee breaks, welcome drink.

Those who are going to come, in spite of the possible language bounds, we will be happy to see among the participants in the conference!

Location: "Krasnaya Pakhra" Resort (about 30 km from the Moscow Ring Road).
Website: www.nano2018.ru
Тел. +7 (499) 135-50-53
E-mail: nano@ineos.ac.ru

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT COMPANIES AND MANUFACTURERS

Компания HPBS приняла участие в международной конференции Greenbuild Europe 2018!

Завершилась международная конференция **Greenbuild Europe 2018 в Берлине**, где собрались лидеры зеленого строительства со всей Европы.

Россию на конференции представляла компания **HPBS.**

Глава представительства GBCI (Институт сертификации зеленого бизнеса) в Европе Kay Killmann рассказал о реализованном пилотном проекте сертификации целого города по системе LEED. На конференции 350 экспертов Европы и США делились опытом решения сложных задач в области устойчивого развития.

Рассмотрено множество современных кейсов.

Ключевыми темами конференции стали:

- снижение выбросов парниковых газов во всем мире;
- особое внимание уделили управлению пищевыми отходами на всей цепочке жизненного цикла;
- связь архитектуры и здоровья человека – стандарт WELL.

Развивалась тема анализа жизненного цикла продуктов, материалов, зданий, производств. Рассматривался каждый этап в процессе производства и его влияние на экологию.

Например, ваше здание может быть энергоэффективным, теплым и суперсовременным в эксплуатации, но при строительстве и производстве материалов для строительства было затрачено колоссальное количество энергии, иногда даже большее, чем за все время эксплуатации.

В Германии развита ветряная и солнечная энергетика, много инновационных решений в строительстве современных умных зданий. Не вызывает сомнений тот факт, что здания должны благоприятно влиять на общество, экономику и природу.

Треть площади Берлина – это реки и парки. Имеется практика в сертификации целого района Potsdam Plats, где расположены такие знаковые объекты, как Sony Center и Deutsche Bahn.

Кампания HPBS поделилась практикой реализации крупных проектов в области устойчивого развития, городов, заводов, жилых и офисных зданий на территории Российской Федерации и европейских городов. Опыт HPBS вызвал интерес, и были рассмотрены новые перспективы для сотрудничества.

Экспертиза компании HPBS была оценена на европейском рынке.

С уважением, команда **HPBS**
http://hpb-s.com/ru/
+7 (916) 534-06-48

Невидимый газ-убийца в Вашем доме. Способы защиты

Проблеме защиты объектов гражданского и промышленного строительства от радиоактивного газа радона в нашей стране уделяется недостаточное внимание. Во многом это происходит из-за недооценки угрозы здоровью людей и дороговизны мер по снижению опасности. Применение новых мембранных материалов на основе полиэтилена высокой плотности, непроницаемого для большинства газов, позволяет снизить затраты на организацию противорадоновой защиты. Это сделает её доступнее для любых строительных проектов, в первую очередь в тех регионах, где эта проблема ощущается острее всего, – на Урале и в Восточной Сибири.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Невидимая опасность

Радиоактивный газ радон постоянно образуется в горных породах и через трещины в земной коре или с потоками грунтовых вод выходит на поверхность. Являясь источником альфа-излучения, он оказывает сильный мутагенный эффект на организм человека. Доказано, что его высокая концентрация во вдыхаемом воздухе приводит к многочисленным повреждениям хромосом и образованию злокачественных опухолей.

По данным Всемирной организации здравоохранения, до 20 % всех онкологических заболеваний лёгких связаны именно с радоном. Также он негативно влияет на костный мозг, щитовидную железу, печень, репродуктивные органы и сердечно-сосудистую систему.

Радон в 7,6 раза тяжелее воздуха, он скапливается в низинах, колодцах и любых сооружениях, контактирующих с грунтом. Наибольшую опасность представляет накопление радиоактивного газа в подвальных и цокольных помещениях, а также просачивание его на первые этажи зданий. Данная проблема наиболее остро стоит в тех местностях, где горные породы представлены гранитами с высоким содержанием радиоактивных элементов. Эксперты к таким районам относят Северный Кавказ, Кольский полуостров, Алтайский край. Но особенно в этом отношении выделяется Урал. Здесь до 10 % заселённых территорий являются радоноопасными зонами – не только расположены жилые кварталы, но и по сей день продолжается активное строительство.

Согласно российским нормативам, концентрация радона в жилых помещениях не должна превышать 200 Бк/куб.м. Однако на практике в помещениях, расположенных на первых этажах многоквартирных и частных домов, а также социальных объектов (школ, детсадов и т.п.), часто отмечается значительное превышение предельно допустимого содержания этого радиоактивного газа.

По данным Института промышленной экологии Уральского отделения РАН, мониторинг сотен квартир и домов Екатеринбурга показал в одном из коттеджей Чкаловского района города концентрацию радона 2 тыс. Бк/куб.м!

Несколько лет назад свердловское управление Роспотребнадзора обозначило 11 территорий с высоким выделением радона – в их числе Каменск-Уральский, Реж, Качканар, Первоуральск, Североуральск, Невьянск, Екатеринбург, Нижний Тагил, Краснотурьинск, Сысерть, Белоярский район. Та же проблема весьма остра в Новосибирской и Кемеровской областях. Например, осенью 2017 года Роспотребнадзору из-за превышения допустимого уровня радона пришлось закрыть три кабинета начальных классов в школе города Осинники Кемеровской области. Немного ранее по той же причине в Осинниках на три месяца приостанавливали работу спортзала в школе-интернате.

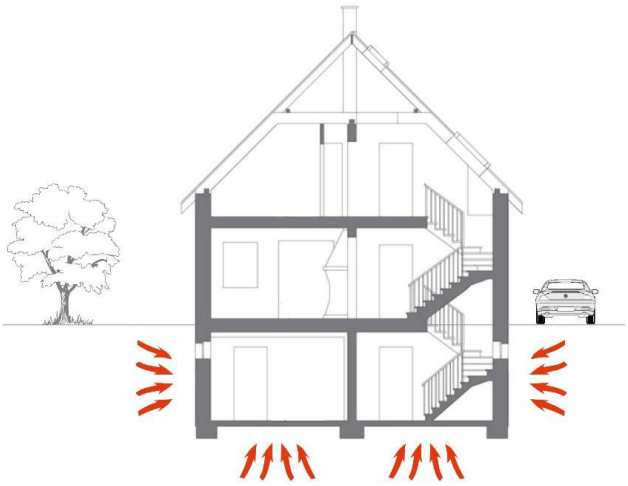
МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА:

Валерий Суслин, эксперт по радиационной безопасности:

«Новосибирску не повезло: он находится на гранитном батолите – крупном массиве магматических горных пород с высоким содержанием радионуклидов. По заказу мэрии города и комитета по охране окружающей среды мы вместе с геологами составили карту радиационной обстановки и радоноопасности Новосибирска. В пределах города и даже в одном городском районе интенсивность выделения радона из грунта может различаться в 10–30 раз! Наиболее безопасны в этом плане Первомайский и Советский районы».

Применяемые решения

Если инженерно-геологические изыскания на участке застройки показали наличие радононасыщенных грунтов, то ещё на этапе проектирования здания должна предусматриваться противорадоновая защита. Это целый комплекс мер, которые направлены как на недопущение накопления этого газа в воздушной среде подвалов, помещений цокольных и первых этажей зданий, так и на предотвращение проникновения радиоактивного газа сквозь строительные конструкции в жилые помещения.



Нормативной базой для проектирования противорадоновой защиты объектов гражданского и промышленного строительства являются «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-96), СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства» и МГСН 2. 02-97 «Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки».

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Понизить концентрацию этого газа в помещениях до безопасных значений помогают комплексные меры:

✓ приточно-вытяжная вентиляция – проверенное решение, но с очевидным минусом в виде постоянных затрат электроэнергии на принудительную циркуляцию воздуха;

✓ предотвращение проникновения радона в здание на этапе проектирования фундамента и земельных работ в котловане. В частности, одно из затратных, но эффективных решений – устройство под зданием зоны пониженного давления с использованием специальных полостей (коллекторов радона) и вытяжной системы;

✓ понижение газопроницаемости строительных конструкций и сплошная герметизация подземной части здания: оснований под полы в подвалах, подошв наружных стен фундаментов, входов трубопроводов и кабельных коммуникаций. Для этого применяют проникающие и обмазочные материалы, так называемые тяжёлые бетоны с пониженной газопроницаемостью, а также наплавляемые битумные рулонные материалы с металлизированным слоем.

Все перечисленные меры значительно увеличивают затраты на проектирование и строительство и тем самым снижают рентабельность проектов.

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА:

Александр Дунин, директор представительства TEGOLA в Екатеринбурге:

«Для Екатеринбурга и в целом для Урала проблема защиты от радона очень актуальна. Целые кварталы жилой застройки возведены на радононасыщенных грунтах. Вместе с тем очевидно, что из-за недооценки уровня опасности ни регулирующие органы, ни застройщики не уделяют этому аспекту строительства должного внимания».

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Новый материал для противорадоновой защиты

В поисках более экономичных решений проектировщики и застройщики обратили внимание на профилированные мембраны из полиэтилена высокой плотности (ПВП) серии ТЕФОНД «СТАР».

Они уже хорошо известны российским строителям в качестве гидроизоляции и защиты конструкций фундамента и бетонных сооружений. Исследования показали, что, поскольку свободный просвет между атомами в кристаллической решётке материала ТЕФОНД «СТАР» составляет всего 250 пм (*пикометр, 1пм = 10^{-12} м*), через этот материал возможно проникновение только водорода и гелия.

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА:

Роман Савелькаев, представитель «ТеМа» в Новосибирске:

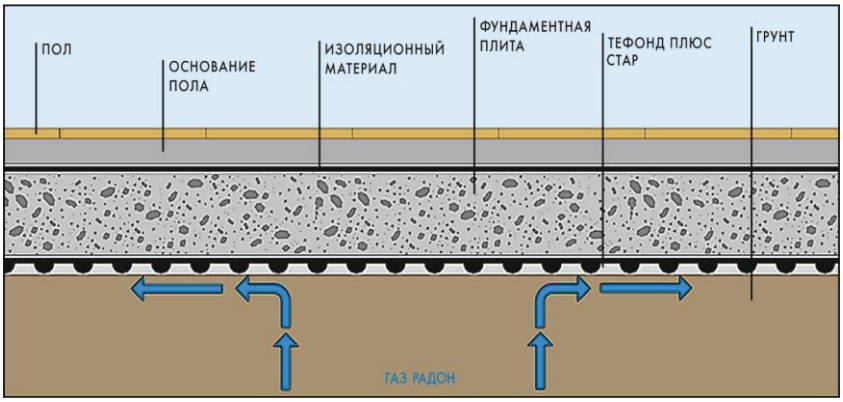
«Благодаря молекулярной структуре материала профилированные мембраны серии ТЕФОНД СТАР непроницаемы для большинства газов, в том числе радона. Кроме того, непроницаемость продольного стыка полотнищ ТЕФОНД СТАР для газов обеспечивается конструкцией мембраны: наличием механического замка и битумного герметика. А герметичность поперечных стыков и примыканий к строительным конструкциям достигается проклейкой высокоадгезионными герметизирующими лентами».

Таким образом, свойства ПВП и способ монтажа полотен профилированных мембран серии ТЕФОНД «СТАР» позволяют использовать их не только для гидроизоляции и защиты фундаментов, но и для устройства экономичной и надёжной противорадоновой защиты зданий и сооружений.

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА:

Максим Среданович, ведущий инженер направления «ТеМа» (комплексные решения для систем дренажа, защиты и изоляции в промышленном и гражданском строительстве):

«По нашим оценкам, использование профилированных мембран ТЕФОНД примерно вдвое дешевле по сравнению с традиционными методами с применением рулонных направляемых материалов, где битумные составляющие нанесены на металлическую фольгу».



Уже в ближайшее время российские проектировщики и застройщики получат реальный опыт применения профилированных ПВП-мембран для обустройства противорадоновой защиты зданий. Тогда появится возможность сравнить теоретические оценки с реальными показателями экономичности этого решения. Но на данный момент эта технология выглядит очень многообещающей.

С Уважением,
Вероника Жукова,

press-service@tegola.su
+7 (985) 759-96-43
http://www.tegola.ru/
https://www.facebook.com/TegolaRussia
https://www.youtube.com/user/tegolaru
https://www.instagram.com/tegola_russia/

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Climeon opens representation office in Japan

Climeon opens a representation office in Nagano, Japan to explore and evaluate the company's ability to sell primarily geothermal heat power modules in the country. Japan is one of Climeon's priority markets.

Climeon employees will be based in the country to work with partners to explore and deepen the understanding of the Japanese market.

"Japan has all the prerequisites for becoming a big market for Climeon. By opening a representation office, we get the right conditions to get to know the market while showing local stakeholders that we have a long-term perspective," says CEO Thomas Öström.

After the accident at the Fukushima nuclear power plant, Japan's energy production has been significantly reduced, which means that more than 90 percent of all energy is imported. The country has the potential to become more self-sufficient by increasing the utilization of geothermal energy. Japan is located in one of the world's most active volcanic areas and has many hot springs around the country, but today only utilizes just over 2 percent of its known geothermal energy resources. In recent years, the Japanese government has introduced economic incentives and simplified the requirements for permits and surveys to accelerate the shift to local green electricity. The price of electricity generated from geothermal power in Japan today is just over SEK 3 per kWh, which is eight times higher than the electricity price in Sweden.

For additional information, please contact:

Thomas Öström, CEO, Climeon +46 708 94 96 05; thomas.ostrom@climeon.com

Christoffer Andersson, COO, Climeon +46 762 00 72 99; christoffer.andersson@climeon.com

About Climeon

Climeon is a Swedish product company within energy technology. The company's unique technology for thermal power – "Heat Power" - provides sustainable electricity around the clock all year round, in abundance and cheaper than the alternatives, and thus outperforms other types of energy. Climeon aims to become a global leader and the world's number one climate solver. The B share is listed on Nasdaq Stockholm First North Premier. Certified Adviser is FNCA Sweden AB.

This information was brought to you by Cision http://news.cision.com
http://news.cision.com/climeon/r/climeon-opens-representation-office-in-japan,c2517851

If you would rather not receive future communications from Climeon, please go tohttps://optout.ne.cision.com/en/61yc6MnsqzgvDSoQtGgVADJGjsn5J5vhJwosUvvQum439c2SrnN6ZoMapGFjnoZqNk7tAxjLedTQMSLDjNnLtCmM.
Climeon, Jan Stenbecks Torg 17, Stockholm, 164 40 Sweden

РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT COMPANIES AND MANUFACTURERS

Компания HPBS приняла участие в международной конференции Greenbuild Europe 2018!

Завершилась международная конференция **Greenbuild Europe 2018 в Берлине**, где собрались лидеры зеленого строительства со всей Европы.

Россию на конференции представляла компания **HPBS.**

Глава представительства GBCI (Институт сертификации зеленого бизнеса) в Европе Kay Killmann рассказал о реализованном пилотном проекте сертификации целого города по системе LEED. На конференции 350 экспертов Европы и США делились опытом решения сложных задач в области устойчивого развития.

Рассмотрено множество современных кейсов.

Ключевыми темами конференции стали:

- снижение выбросов парниковых газов во всем мире;
- особое внимание уделили управлению пищевыми отходами на всей цепочке жизненного цикла;
- связь архитектуры и здоровья человека – стандарт WELL.

Развивалась тема анализа жизненного цикла продуктов, материалов, зданий, производств. Рассматривался каждый этап в процессе производства и его влияние на экологию.

Например, ваше здание может быть энергоэффективным, теплым и суперсовременным в эксплуатации, но при строительстве и производстве материалов для строительства было затрачено колоссальное количество энергии, иногда даже большее, чем за все время эксплуатации.

В Германии развита ветряная и солнечная энергетика, много инновационных решений в строительстве современных умных зданий. Не вызывает сомнений тот факт, что здания должны благоприятно влиять на общество, экономику и природу.

Треть площади Берлина – это реки и парки. Имеется практика в сертификации целого района Potsdam Plats, где расположены такие знаковые объекты, как Sony Center и Deutsche Bahn.

Кампания HPBS поделилась практикой реализации крупных проектов в области устойчивого развития, городов, заводов, жилых и офисных зданий на территории Российской Федерации и европейских городов. Опыт HPBS вызвал интерес, и были рассмотрены новые перспективы для сотрудничества.

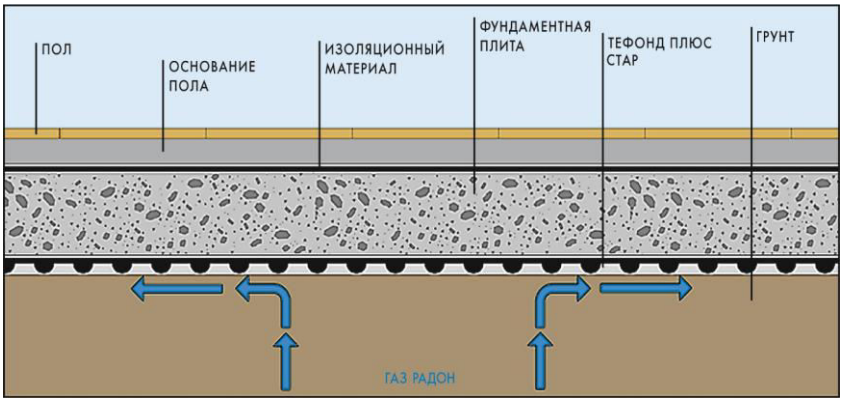
Экспертиза компании HPBS была оценена на европейском рынке.

С уважением, команда **HPBS**
http://hpb-s.com/ru/
+7 (916) 534-06-48

Невидимый газ-убийца в Вашем доме. Способы защиты

Проблеме защиты объектов гражданского и промышленного строительства от радиоактивного газа радона в нашей стране уделяется недостаточное внимание. Во многом это происходит из-за недооценки угрозы здоровью людей и дороговизны мер по снижению опасности. Применение новых мембранных материалов на основе полиэтилена высокой плотности, непроницаемого для большинства газов, позволяет снизить затраты на организацию противорадоновой защиты. Это сделает её доступнее для любых строительных проектов, в первую очередь в тех регионах, где эта проблема ощущается острее всего, – на Урале и в Восточной Сибири.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Уже в ближайшее время российские проектировщики и застройщики получат реальный опыт применения профилированных ПВП-мембран для обустройства противорадоновой защиты зданий. Тогда появится возможность сравнить теоретические оценки с реальными показателями экономичности этого решения. Но на данный момент эта технология выглядит очень многообещающей.

С Уважением,
Вероника Жукова,

press-service@tegola.su
+7 (985) 759-96-43
http://www.tegola.ru/
https://www.facebook.com/TegolaRussia
https://www.youtube.com/user/tegolaru
https://www.instagram.com/tegola_russia/

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Climeon opens representation office in Japan

Climeon opens a representation office in Nagano, Japan to explore and evaluate the company's ability to sell primarily geothermal heat power modules in the country. Japan is one of Climeon's priority markets.

Climeon employees will be based in the country to work with partners to explore and deepen the understanding of the Japanese market.

"Japan has all the prerequisites for becoming a big market for Climeon. By opening a representation office, we get the right conditions to get to know the market while showing local stakeholders that we have a long-term perspective," says CEO Thomas Öström.

After the accident at the Fukushima nuclear power plant, Japan's energy production has been significantly reduced, which means that more than 90 percent of all energy is imported. The country has the potential to become more self-sufficient by increasing the utilization of geothermal energy. Japan is located in one of the world's most active volcanic areas and has many hot springs around the country, but today only utilizes just over 2 percent of its known geothermal energy resources. In recent years, the Japanese government has introduced economic incentives and simplified the requirements for permits and surveys to accelerate the shift to local green electricity. The price of electricity generated from geothermal power in Japan today is just over SEK 3 per kWh, which is eight times higher than the electricity price in Sweden.

For additional information, please contact:

Thomas Öström, CEO, Climeon +46 708 94 96 05; thomas.ostrom@climeon.com

Christoffer Andersson, COO, Climeon +46 762 00 72 99; christoffer.andersson@climeon.com

About Climeon

Climeon is a Swedish product company within energy technology. The company's unique technology for thermal power – "Heat Power" - provides sustainable electricity around the clock all year round, in abundance and cheaper than the alternatives, and thus outperforms other types of energy. Climeon aims to become a global leader and the world's number one climate solver. The B share is listed on Nasdaq Stockholm First North Premier. Certified Adviser is FNCA Sweden AB.

This information was brought to you by Cision http://news.cision.com
http://news.cision.com/climeon/r/climeon-opens-representation-office-in-japan,c2517851

If you would rather not receive future communications from Climeon, please go tohttps://optout.ne.cision.com/en/61yc6MnsqzgvDSoQtGgVADJGjsn5J5vhJwosUvvQum439c2SrnN6ZoMapGFjnoZqNk7tAxjLedTQMSLDjNnLtCmM.
Climeon, Jan Stenbecks Torg 17, Stockholm, 164 40 Sweden

Meyer Burger divests its Solar Systems business to Patrick Hofer-Noser

(PresseBox) As part of the optimisation programme regarding the Thun manufacturing site and the company's product portfolio which was communicated on 2 November 2017, Meyer Burger Technology Ltd (SIX Swiss Exchange: MBTN) announced today that it will transfer its Solar Systems business ("Energy Systems") and the 32 impacted employees to 3S Solar Plus AG, a company which will be newly created and which has been sold to Dr Patrick Hofer-Noser. In the past few months Meyer Burger had evaluated various strategic options for the business which mainly addresses the Swiss market with its MegaSlate® products. The sale will result in a loss for Meyer Burger in the low single-digit million range including a goodwill recycling of around CHF 1 million. [...]

Upon publication, please provide us with a copy.

Your contacts

Ingrid Carstensen
Head of Corporate Communications
Tel: +41 (33) 43938-34
E-Mail: ingrid.carstensen@meyerburger.com

Dr Patrick Hofer-Noser
3S Solar Plus AG
Tel: +41 (79) 43740-41
E-Mail: patrick.hofer-noser@g-neration.com

About Meyer Burger Technology AG

Meyer Burger is a leading global technology company specialising on innovative systems and processes based on semiconductor technologies. The company's focus is on photovoltaics (solar industry) while its competencies and technologies also cover important areas of the semiconductor and the optoelectronic industries as well as other selected high-end markets based on semiconductor materials. Over the past ten years, Meyer Burger has risen to the forefront of the photovoltaic market and established itself as an international premium brand by offering superior precision products and innovative technologies.

Meyer Burger's offering in systems, production equipment and services along the photovoltaic value chain includes the manufacturing processes for wafers, solar cells, solar modules and solar systems. Meyer Burger provides substantial added value to its customers and clearly differentiates itself from its competitors by focusing on core technologies of the value chain.

The company's comprehensive product portfolio is complemented by a worldwide service network with spare parts, consumables, process know-how, customer support, after-sales services, training and other services. Meyer Burger is represented in Europe, Asia and North America in the respective key markets and has subsidiaries and own service centres in China, Germany, India, Japan, Korea, Malaysia, the Netherlands, Switzerland, Singapore, Taiwan and the USA. The company is also working intensively to develop new markets such as South America, Africa and the Arab region. The registered shares of Meyer Burger Technology Ltd are listed on the SIX Swiss Exchange (Ticker: MBTN).

Two markets become one – Sweden and Denmark reach agreement on harmonisation

The Swedish and Danish gas transmission network companies Swedegas and Energinet have decided to make the investments necessary to integrate the gas markets in Sweden and Denmark. This initiative will reinforce security of supply and lead to more participants entering the gas market. It is also in line with the EU's endeavour to harmonise markets within the Union.

Working closely with other gas market bodies – end-users, suppliers, system operators and regulatory authorities in both Sweden and Denmark – the conditions for joint balancing and trade have been analysed in detail during the past year.

Market integration offers several benefits:

- Improved security of supply by merging the transmission systems and as a result becoming more robust and less sensitive to variations
- More gas traders on the market means increased competition, benefitting end-users
- More effective administration.

"This development of the Swedish gas market is taking place with the end-user firmly in focus," said Johan Zettergren, Swedegas CEO. "Our ambition is to make it straightforward and attractive for industry, the transport sector and households to choose gas, including renewable alternatives."

The aim is for the joint balancing zone to be operational by April 2019. Discussions are taking place with market organisations to determine which adaptations and adjustments to IT systems and routines will be required as part of the preparatory process.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

"A joint balancing zone will make the Danish/Swedish gas market more interesting. We will now begin to develop the solution in collaboration with the market bodies concerned in order to optimise the value," said Jeppe Danø, Director, Gas System Operator, Energinet.

The project has its own website https://en.energinet.dk/Gas/Shippers/Swedegas-Joint-Balancing-Zone

For further information, please contact Saila Horttanainen, Vice President, Communications, Swedegas, +46 70 622 76 06, or Jeppe Danø, Director, Gas System Operator, Energinet, +45 23 33 88 05.

Fact file: Swedegas

Swedegas is an infrastructure company that invests in smart energy systems. The company owns the gas transmission network, transporting energy to distributors and directly connected customers. Extending from Dragør in Denmark to Stenungsund in Sweden, the network supplies 33 municipal areas with gas, as well as industrial enterprises, combined heat and power plants and filling stations. Swedegas is in the process of developing new infrastructure for biogas, hydrogen gas and liquefied natural gas (LNG).

Fact file: Energinet

Energinet is an independent public enterprise, owned by the Danish Ministry of Climate, Energy and Building. It owns, operates and develops the electricity and gas transmission networks in Denmark with the aim of integrating more renewable energy, maintaining security of supply, and ensuring market access to the networks on equal terms. The company is developing the gas transmission network to prepare it for the energy solutions of the future. It is also constructing new cross-border pipelines and working to make gas more eco-friendly.

ENGINEERING TOMORROW Danfoss

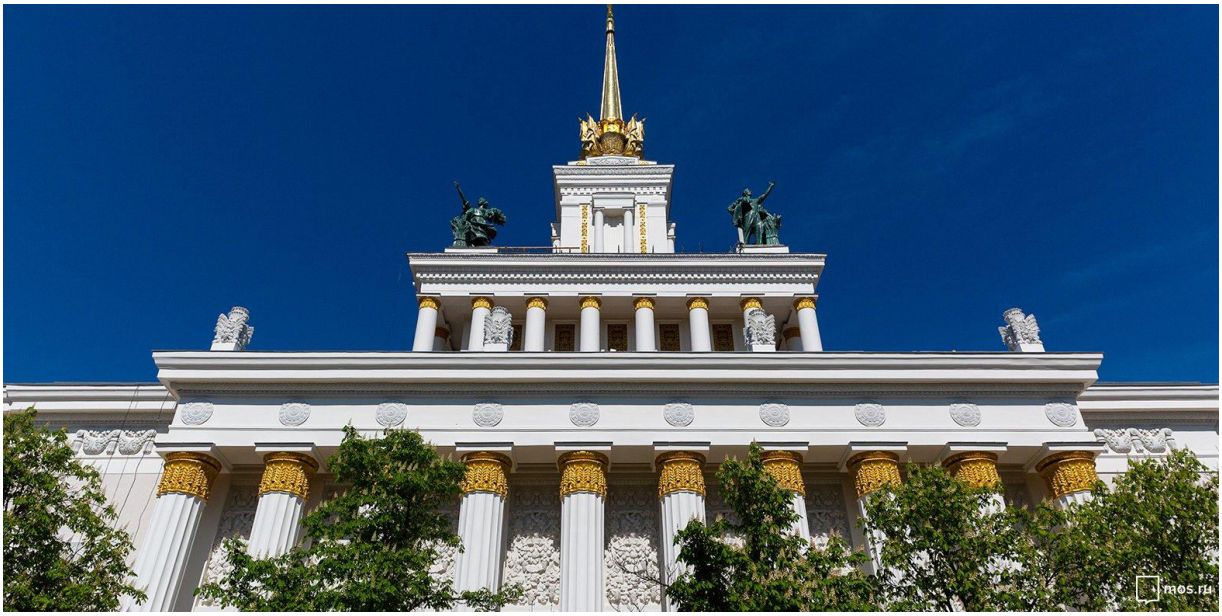
Пресс-релиз

ООО «Данфосс»

Дата: 17.05.2018

Тепловая автоматика на треть снизит расходы на отопление ВДНХ

При реконструкции сети теплоснабжения использовано оборудование «Данфосс».



В конце 2017 года были подведены итоги тестовой эксплуатации системы диспетчеризации индивидуальных тепловых пунктов АИИС Comfort Contour на территории ВДНХ. Это решение стало частью крупномасштабного проекта реконструкции системы теплоснабжения главной выставки страны.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Meyer Burger divests its Solar Systems business to Patrick Hofer-Noser

(PresseBox) As part of the optimisation programme regarding the Thun manufacturing site and the company's product portfolio which was communicated on 2 November 2017, Meyer Burger Technology Ltd (SIX Swiss Exchange: MBTN) announced today that it will transfer its Solar Systems business ("Energy Systems") and the 32 impacted employees to 3S Solar Plus AG, a company which will be newly created and which has been sold to Dr Patrick Hofer-Noser. In the past few months Meyer Burger had evaluated various strategic options for the business which mainly addresses the Swiss market with its MegaSlate® products. The sale will result in a loss for Meyer Burger in the low single-digit million range including a goodwill recycling of around CHF 1 million. [...]

Upon publication, please provide us with a copy.

Your contacts

Ingrid Carstensen
Head of Corporate Communications
Tel: +41 (33) 43938-34
E-Mail: ingrid.carstensen@meyerburger.com

Dr Patrick Hofer-Noser
3S Solar Plus AG
Tel: +41 (79) 43740-41
E-Mail: patrick.hofer-noser@g-neration.com

About Meyer Burger Technology AG

Meyer Burger is a leading global technology company specialising on innovative systems and processes based on semiconductor technologies. The company's focus is on photovoltaics (solar industry) while its competencies and technologies also cover important areas of the semiconductor and the optoelectronic industries as well as other selected high-end markets based on semiconductor materials. Over the past ten years, Meyer Burger has risen to the forefront of the photovoltaic market and established itself as an international premium brand by offering superior precision products and innovative technologies.

Meyer Burger's offering in systems, production equipment and services along the photovoltaic value chain includes the manufacturing processes for wafers, solar cells, solar modules and solar systems. Meyer Burger provides substantial added value to its customers and clearly differentiates itself from its competitors by focusing on core technologies of the value chain.

The company's comprehensive product portfolio is complemented by a worldwide service network with spare parts, consumables, process know-how, customer support, after-sales services, training and other services. Meyer Burger is represented in Europe, Asia and North America in the respective key markets and has subsidiaries and own service centres in China, Germany, India, Japan, Korea, Malaysia, the Netherlands, Switzerland, Singapore, Taiwan and the USA. The company is also working intensively to develop new markets such as South America, Africa and the Arab region. The registered shares of Meyer Burger Technology Ltd are listed on the SIX Swiss Exchange (Ticker: MBTN).

Two markets become one – Sweden and Denmark reach agreement on harmonisation

The Swedish and Danish gas transmission network companies Swedegas and Energinet have decided to make the investments necessary to integrate the gas markets in Sweden and Denmark. This initiative will reinforce security of supply and lead to more participants entering the gas market. It is also in line with the EU's endeavour to harmonise markets within the Union.

Working closely with other gas market bodies – end-users, suppliers, system operators and regulatory authorities in both Sweden and Denmark – the conditions for joint balancing and trade have been analysed in detail during the past year.

Market integration offers several benefits:

- Improved security of supply by merging the transmission systems and as a result becoming more robust and less sensitive to variations
- More gas traders on the market means increased competition, benefitting end-users
- More effective administration.

"This development of the Swedish gas market is taking place with the end-user firmly in focus," said Johan Zettergren, Swedegas CEO. "Our ambition is to make it straightforward and attractive for industry, the transport sector and households to choose gas, including renewable alternatives."

The aim is for the joint balancing zone to be operational by April 2019. Discussions are taking place with market organisations to determine which adaptations and adjustments to IT systems and routines will be required as part of the preparatory process.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

"A joint balancing zone will make the Danish/Swedish gas market more interesting. We will now begin to develop the solution in collaboration with the market bodies concerned in order to optimise the value," said Jeppe Danø, Director, Gas System Operator, Energinet.

The project has its own website https://en.energinet.dk/Gas/Shippers/Swedegas-Joint-Balancing-Zone

For further information, please contact Saila Horttanainen, Vice President, Communications, Swedegas, +46 70 622 76 06, or Jeppe Danø, Director, Gas System Operator, Energinet, +45 23 33 88 05.

Fact file: Swedegas

Swedegas is an infrastructure company that invests in smart energy systems. The company owns the gas transmission network, transporting energy to distributors and directly connected customers. Extending from Dragør in Denmark to Stenungsund in Sweden, the network supplies 33 municipal areas with gas, as well as industrial enterprises, combined heat and power plants and filling stations. Swedegas is in the process of developing new infrastructure for biogas, hydrogen gas and liquefied natural gas (LNG).

Fact file: Energinet

Energinet is an independent public enterprise, owned by the Danish Ministry of Climate, Energy and Building. It owns, operates and develops the electricity and gas transmission networks in Denmark with the aim of integrating more renewable energy, maintaining security of supply, and ensuring market access to the networks on equal terms. The company is developing the gas transmission network to prepare it for the energy solutions of the future. It is also constructing new cross-border pipelines and working to make gas more eco-friendly.

ENGINEERING TOMORROW Danfoss

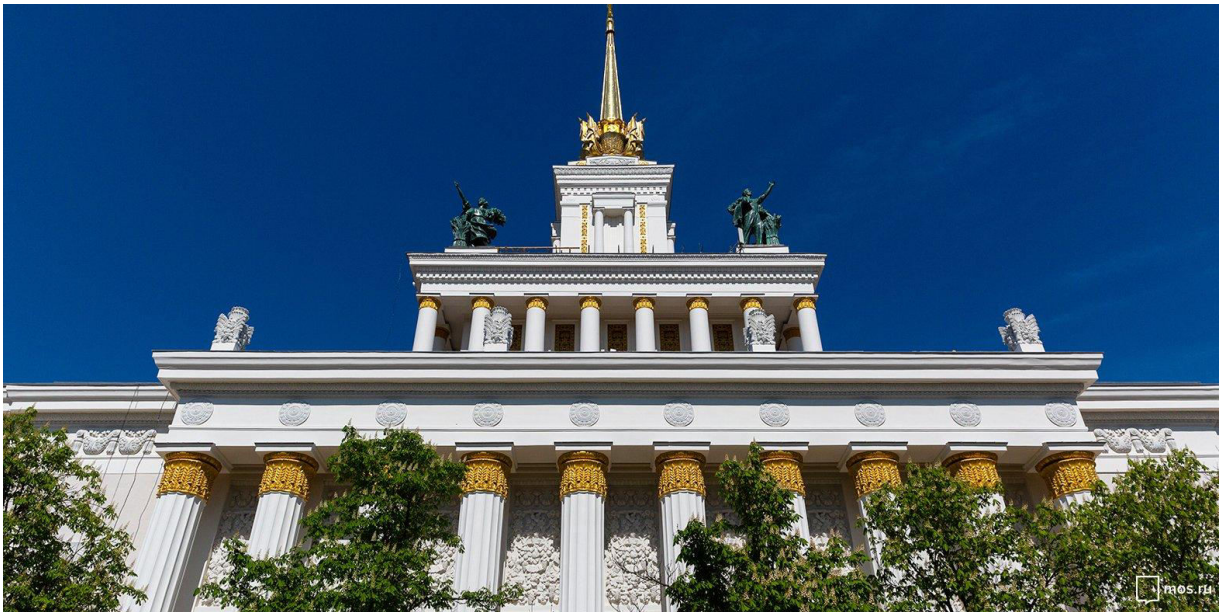
Пресс-релиз

ООО «Данфосс»

Дата: 17.05.2018

Тепловая автоматика на треть снизит расходы на отопление ВДНХ

При реконструкции сети теплоснабжения использовано оборудование «Данфосс».



В конце 2017 года были подведены итоги тестовой эксплуатации системы диспетчеризации индивидуальных тепловых пунктов АИИС Comfort Contour на территории ВДНХ. Это решение стало частью крупномасштабного проекта реконструкции системы теплоснабжения главной выставки страны.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

«Необходимость модернизации системы теплоснабжения, спроектированной еще в 1930–1950-х годах при строительстве выставки и давно исчерпавшей свой ресурс, была продиктована недостаточной эффективностью ее работы. В частности, были зафиксированы рост расхода сетевой воды и повсеместное нарушение проектных гидравлических режимов», – рассказал Константин Хохлов, заместитель генерального директора по направлению «Теплоавтоматика» инженерного центра компании «Русэлком».

Новая система теплоснабжения реализована с применением автоматизированных узлов управления (АУУ) Danfoss. Оборудование уже установлено в индивидуальных тепловых пунктах 48 зданий выставки, включая павильоны «Земледелие», «Здравоохранение», «Космос» и «Кролиководство», на очереди – «Центральный» и «Физика». Хотя многие павильоны сейчас реставрируются, после внедрения новой системы общий расход теплоносителя в котельной ВДНХ сократился с 2 100 т/ч до 1 400 т/ч.

Разработанные специалистами технические решения позволили смонтировать новые автоматизированные тепловые узлы даже в помещениях скромных размеров. Это оказалось особенно важно, поскольку на территории ВДНХ использовались устаревшие гидроэлеваторные системы, требующие минимум места. Например, в том же ограниченном пространстве был размещен узел смешения типа ААУ-К в павильоне № 137, где расположен детский сад «Детское посольство».

Как объясняет заместитель директора отдела тепловой автоматики Вячеслав Гун, задачу упростило наличие у «Данфосс» набора стандартных типовых решений для узлов смешения с разбивкой по тепловым мощностям. А применение системы диспетчеризации тепловых узлов позволит эксплуатирующему персоналу корректировать гидравлический режим сети и котельной ВДНХ. Учет тепловой энергии будет централизованным, затраты абонентов на отопление снизятся, а его оплата будет происходить по фактическому потреблению, а не по нормативам.

В зданиях ВДНХ установлены три модификации АУУ: напольные с трехходовым клапаном АУУ-С, с двухходовым клапаном DH-RR, а также настенные для щитового монтажа АУУ-К. В каждом решении использована схема погодной компенсации на базе контроллера ECL-310, отслеживающего колебания температуры наружного воздуха и теплоносителя. Установка АУУ обеспечила стабильную работу систем отопления павильонов, а наличие регуляторов перепада давлений типа AVP позволило минимизировать влияние общей гидравлики сети на режим теплоснабжения отдельных объектов.

Для дополнительной информации:
Марина Сатинская, пресс-служба ООО «Данфосс», тел.: +7 (495) 210 89 54, press@info-danfoss.ru

Мы в социальных сетях:
https://vk.com/danfossrussia
https://facebook.com/danfossinrussia

Компания «Данфосс» – ведущий мировой производитель энергосберегающего оборудования. Занимает лидирующие позиции на рынке тепловой автоматики, холодильного оборудования, приводной техники. На российском рынке тепловой автоматики доля «Данфосс» составляет 35 %. В настоящее время у компании 23 представительства на территории России и Белоруссии. Российское представительство компании «Данфосс» было образовано в 1993 г. Доля локализации предприятия в 2017 г. составляет более 40 %. На текущий момент компания производит свою продукцию в России на нескольких площадках – в Московской, Нижегородской и Тульской областях.

Глобальная Энергия
Международная Энергетическая Премия

ПРЕСС-РЕЛИЗ

Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия»

«26» июля 2018 г.

Мега-премия из России: «Глобальная энергия» – в списке выдающихся наград

***«Глобальная энергия» включена в официальный список Международного конгресса выдающихся наград** ICDA **(The International Congress of Distinguished Awards). В его рейтинге престижа премия** «Гло-*

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

«Необходимость модернизации системы теплоснабжения, спроектированной еще в 1930–1950-х годах при строительстве выставки и давно исчерпавшей свой ресурс, была продиктована недостаточной эффективностью ее работы. В частности, были зафиксированы рост расхода сетевой воды и повсеместное нарушение проектных гидравлических режимов», – рассказал Константин Хохлов, заместитель генерального директора по направлению «Теплоавтоматика» инженерного центра компании «Русэлком».

Новая система теплоснабжения реализована с применением автоматизированных узлов управления (АУУ) Danfoss. Оборудование уже установлено в индивидуальных тепловых пунктах 48 зданий выставки, включая павильоны «Земледелие», «Здравоохранение», «Космос» и «Кролиководство», на очереди – «Центральный» и «Физика». Хотя многие павильоны сейчас реставрируются, после внедрения новой системы общий расход теплоносителя в котельной ВДНХ сократился с 2 100 т/ч до 1 400 т/ч.

Разработанные специалистами технические решения позволили смонтировать новые автоматизированные тепловые узлы даже в помещениях скромных размеров. Это оказалось особенно важно, поскольку на территории ВДНХ использовались устаревшие гидроэлеваторные системы, требующие минимум места. Например, в том же ограниченном пространстве был размещен узел смешения типа ААУ-К в павильоне № 137, где расположен детский сад «Детское посольство».

Как объясняет заместитель директора отдела тепловой автоматики Вячеслав Гун, задачу упростило наличие у «Данфосс» набора стандартных типовых решений для узлов смешения с разбивкой по тепловым мощностям. А применение системы диспетчеризации тепловых узлов позволит эксплуатирующему персоналу корректировать гидравлический режим сети и котельной ВДНХ. Учет тепловой энергии будет централизованным, затраты абонентов на отопление снизятся, а его оплата будет происходить по фактическому потреблению, а не по нормативам.

В зданиях ВДНХ установлены три модификации АУУ: напольные с трехходовым клапаном АУУ-С, с двухходовым клапаном DH-RR, а также настенные для щитового монтажа АУУ-К. В каждом решении использована схема погодной компенсации на базе контроллера ECL-310, отслеживающего колебания температуры наружного воздуха и теплоносителя. Установка АУУ обеспечила стабильную работу систем отопления павильонов, а наличие регуляторов перепада давлений типа AVP позволило минимизировать влияние общей гидравлики сети на режим теплоснабжения отдельных объектов.

Для дополнительной информации:
Марина Сатинская, пресс-служба ООО «Данфосс», тел.: +7 (495) 210 89 54, press@info-danfoss.ru

Мы в социальных сетях:
https://vk.com/danfossrussia
https://facebook.com/danfossinrussia

Компания «Данфосс» – ведущий мировой производитель энергосберегающего оборудования. Занимает лидирующие позиции на рынке тепловой автоматики, холодильного оборудования, приводной техники. На российском рынке тепловой автоматики доля «Данфосс» составляет 35 %. В настоящее время у компании 23 представительства на территории России и Белоруссии. Российское представительство компании «Данфосс» было образовано в 1993 г. Доля локализации предприятия в 2017 г. составляет более 40 %. На текущий момент компания производит свою продукцию в России на нескольких площадках – в Московской, Нижегородской и Тульской областях.

Глобальная Энергия
Международная Энергетическая Премия

ПРЕСС-РЕЛИЗ

Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия»

«26» июля 2018 г.

Мега-премия из России: «Глобальная энергия» – в списке выдающихся наград

***«Глобальная энергия» включена в официальный список Международного конгресса выдающихся наград** ICDA **(The International Congress of Distinguished Awards). В его рейтинге престижа премия** «Гло-*

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

бальная энергия» ***находится в категории «мега наград» за ее благородные цели, образцовую практику и общий призовой фонд.***

Наряду с «Глобальной энергией» в число «мега наград» также включены премии из разных стран мира: Великобритании, Израиля, Норвегии, США, Швеции, Японии, – которые присуждаются за достижения в сферах науки, культуры, медицины и гуманизма. Примечательно, что «Глобальная энергия» стала единственной премией из России, попавшей в эту категорию.

В списке Международного конгресса выдающихся наград ICDA находятся те премии, которые присуждаются за достижения национального или мирового значения и способствуют популяризации знаний во благо человечества. Также важным критерием является образцовая деятельность по организации премиального конкурса: прозрачный процесс номинирования, выбора и присуждения награды, независимая экспертиза и беспристрастное жюри. Кроме того, премия должна обладать минимальным призовым фондом в размере 100 000 долларов США или быть признанной как исключительная награда в своей сфере.

«ICDA на протяжении долгих лет занимается анализом деятельности мировых премий. Для нас как для организаторов признание «мега премией» имеет большое значение: с одной стороны – это подтверждение международного авторитета «Глобальной энергии», с другой – свидетельство максимальной открытости и прозрачности процесса по выбору лауреатов. Мы будем продолжать работу по продвижению премии на международном уровне до признания ее самой авторитетной наградой в области энергетики», – отметил и.о. президента ассоциации «Глобальная энергия» Александр Игнатов. – *«Энергетика будущего создается знаниями, и наши эксперты – лучшее тому подтверждение».*

Напомним, что лауреатами премии «Глобальная энергия» на данный момент являются 37 ученых из 12 стран – за их выдающиеся исследования и научно-технические разработки в области энергетики. В 2018 году премию получат российский академик Сергей Алексеенко – за разработки в области теплоэнергетики, которые позволяют создавать современное энергосберегающее оборудование, и профессор из Австралии Мартин Грин – за технологии в фотовольтаике, повышающие экономичность и эффективность солнечных элементов. Церемония их награждения состоится в рамках **Российской энергетической недели** в начале октября.

Международный конгресс выдающихся наград (The International Congress of Distinguished Awards) – независимая некоммерческая организация, которая составляет и актуализирует реестр самых выдающихся наград мира. Был учрежден в 1994 году в США. ICDA анализирует международные награды и определяет, какие из них достойны звания выдающихся согласно собственно разработанным оценочным критериям. Организация поддерживает базу данных в области наград, проводит исследования и публикует отчеты о мировых премиях, а также трендах их развития и новостях отрасли.

Дополнительная информация:
Наталья Наумова, naumova@ge-prize.org , +7 495 739 54 35

О международной энергетической премии «Глобальная энергия»

Премия «Глобальная энергия» – это международная награда за выдающиеся исследования и научно-технические разработки в области энергетики, которые способствуют эффективному использованию энергетических ресурсов и экологической безопасности на Земле в интересах всего человечества.

Она учреждена в России ассоциацией «Глобальная энергия» при поддержке ведущих российских энергетических компаний: ПАО «Газпром», ПАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «ФСК ЕЭС». С 2003 года лауреатами премии стали 37 ученых из 12 стран: Австралии, Великобритании, Германии, Исландии, Канады, России, США, Украины, Франции, Швеции, Швейцарии и Японии. Самовыдвижение на премию невозможно. Правом номинировать на премию обладают эксперты, входящие в состав номинационного пула. Всего в процессе номинирования приняли участие граждане 90 государств. Решение по выбору лауреатов премии принимает Международный комитет по присуждению премии «Глобальная энергия», в состав которого входят 20 авторитетных ученых из 13 стран. Премиальный фонд в 2018 году составил 39 миллионов рублей.

Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия»
107031 Москва, ул. Кузнецкий мост, 3/2, офис 1, Тел.: +7 495 739-54-35, Факс: +7 495 692-19-83
www.globalenergyprize.org; info@ge-prize.org

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Р.А. АМЕРХАНОВ, А.С. КИРИЧЕНКО

ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИЕ И ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

**Под редакцией доктора технических наук
профессора Р.А. Амерханова**

Рекомендовано Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования
по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки
35.00.00 Сельское, лесное и рыбное хозяйство

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИННОВАЦИОННОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ

Москва, 2018

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

УДК 697.3.001.63:621.311:621.565(035)
ББК
А

Рецензенты:

Д.С. Стребков – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ЮНЕСКО «Возобновляемая энергетика и сельская электрификация», научный руководитель ФГБНУ «Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства».

Е.Е. Новгородский – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

В.И. Чеботарев – доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

А **Амерханов Р.А., Кириченко А.С.** Теплогенерирующие и холодильные установки: Учебник для студентов вузов по направлению «Агроинженерия» / Под ред. –М.: ООО Издательство «Инновационное машиностроение», 2018. – 716 с. Ил.

ISBN 978-5-99909601-4-5

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Рассмотрены основные направления рационального энергообеспечения и потребления энергии в сельском хозяйстве за счет использования теплогенерирующих и холодильных систем, а также нетрадиционных систем энергообеспечения агропромышленного комплекса с использованием систем солнечного, геотермального теплоснабжения, ветроэнергетических и биогазовых установок, аккумуляторов теплоты, теплонасосных установок, малых ГЭС и других возобновляемых видов энергии, способствующих охране окружающей среды от возможных вредных выбросов.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений и содержит сведенья, необходимые для формирования профессиональных компетенций при подготовке бакалавров и магистров по специальности 35.03.06, 35.03.06 «Агроинженерия», а так же аспирантов по направлению 35.06.04 «Технологии и средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве».

Гриф «Рекомендовано» присвоен Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 35.00.00 «Сельское, лесное и рыбное хозяйство» Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (письмо 11-08а/33 от 29.12.16 г.)

УДК 697.3.001.63:621.311:621.565(035)
ББК

ISBN 978-5-99909601-4-5

©Р.А. Амерханов,
А.С. Кириченко

© ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»

НОВОСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

NEWS

Ученые изобрели самый крепкий материал

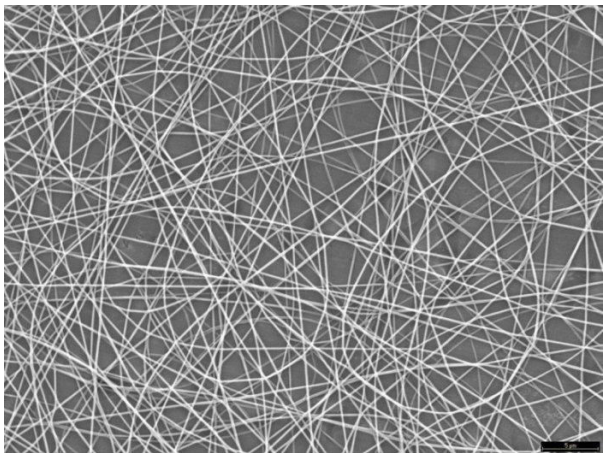


Фото: econet.ru

Как сообщил eurekalert.org, новые исследования показали, что особым образом структурированные нановолокна целлюлозы являются самым прочным материалом.

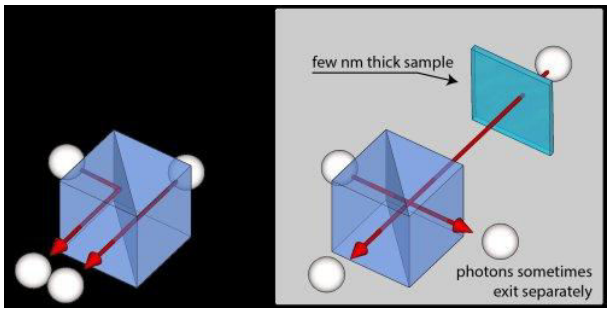
Ранее считалось, что самым сильным материалом является паучий шелк, а лучшими строительными материалами – сталь, керамика и стекло.

Несмотря на то что технологии быстро развиваются, исследователям трудно угнаться за природой. С недавних пор ученые пытаются повторить архитектуру натуральных материалов на наноуровне, чтобы создать более прочный материал. Например, после изучения сильного жесткого слоя клеточной стенки древесины, состоящего из целлюлозных нанофибрилл, исследователи пытались создать сильные макроскопические материалы. Однако слабая адгезия и несочетаемость компонентов не позволили ученым реализовать задумку. Исследователи из Американского химического общества постарались преодолеть эти ограничения.

Команда использовала струйные технологии для идеальной организации макромасштабных волокон. Даже самое слабое волокно, которое они изготовили с помощью этого метода, было сильнее, чем другие целлюлозные нановолокна, известные ранее. И самое главное – макромасштабные волокна были сильнее металла, сплавов и стекловолокна и в восемь раз жестче, чем драглайн паучьего шелка, который является золотым стандартом прочности легких биополимеров.

scientificrussia.ru

Двухфотонный метод позволил увеличить точность наноразмерных измерений в сто раз

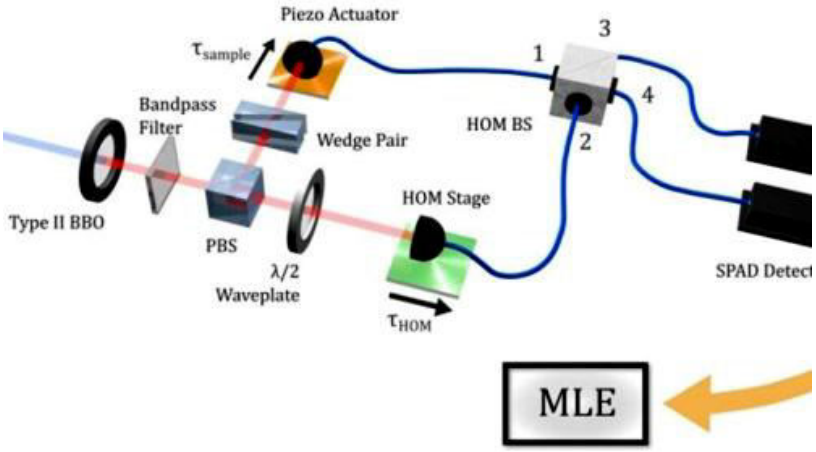


Точность измерения размеров наноструктур была увеличена минимум в сотню раз, благодаря работе исследователей из Уорикского университета, центра QuantIC и университета Глазго. Новый метод, использующий пары фотонов, фундаментальных частичек света, позволяет измерять толщину объектов, в 100 тыс. раз меньших, чем диаметр человеческого волоса, с точностью, в 100 раз превышающей точность любых других методов.

В новом методе измерений используется источник, излучающий пары фотонов, практически идентичные по всем параметрам. Эти фотоны разделяются при помощи компонента, называемого светорасщепителем, для проведения одного цикла измерений используется порядка 30 тыс. пар фотонов, а для проведения всего измерения в целом – порядка 500 млрд фотонов.

Один из фотонов, фотон А, остается внутри светорасщепителя, а второй фотон, фотон Б, проходит сквозь объект, из-за чего его скорость несколько замедляется. После этого фотон Б снова возвращается в светорасщепитель и покидает его пределы вместе с фотоном А. Измерение задержки между выходом из расщепителя фотонов А и Б дает значение толщины объекта, сквозь который прошел фотон Б. И точность таких измерений как минимум в 100 раз превышает точность подобных измерений, проведенных при помощи только одного фотона.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Отметим, что при помощи данного метода можно измерить объекты, изготовленные из прозрачного материала. Но и этого вполне достаточно для проведения исследований структуры и свойств клеточных мембран, молекул ДНК. Помимо этого, новый метод измерения можно применять для контроля качества при производстве графена и других условно двухмерных материалов.

«Наиболее интересным в данном достижении является то, что измерения проводятся не при помощи каких-то нестабильных квантовых технологий, а при помощи датчиков, основанных на проверенных временем обычных физических принципах, – рассказал доктор Джордж Ни (Dr George Knee), разработавший теоретическую базу эксперимента. – А более высокая точность измерений была получена нами за счет особой настройки интерферометра и его постоянной перекалибровки, что позволило устранить медленный временной и температурный дрейф».

dailytechinfo.org

Гель и краситель помогут определить содержание вредных ионов в еде

Щавель, в котором содержится большое количество оксалатов
Ann Marie Michaels/Flickr

Российские ученые на основе кремний-титанового геля и красителя создали новый материал, который способен достаточно быстро и в полевых условиях определить содержание опасных оксалат-ионов в еде. Уникальность нового материала заключается в том, что для анализа с его помощью не нужно ничего дополнительно делать с объектом исследования – достаточно лишь прикоснуться материалом к образцу. Результаты работы ученых МГУ имени М.В. Ломоносова опубликованы в журнале Sensors.

Оксалаты – это соли щавелевой кислоты. Многие из них плохо растворяются в воде и выделяются из растворов в виде кристаллов. Если вы едите пищу с большим содержанием оксалатов, то рискуете заполучить почечнокаменную болезнь. Ученые из МГУ разработали высокочувствительный материал, который определяет количество опасных ионов, даже если их концентрация в четыре раза меньше максимально допустимой.

Новый сенсорный материал – это модифицированный кремний-титановый гель, из которого удалена вся жидкая фаза. Он представляет собой фиолетовый порошок из частиц размером около 100 микрометров. В структуру этого геля включен индикатор эриохромцианин, который теряет свою окраску после контакта с веществом, содержащим оксалат-ионы. Происходит это вследствие того, что титан, содержащийся в матрице сенсорного материала, может образовывать устойчивые неокрашенные комплексы с оксалат-ионами, что приводит к разрушению окрашенных комплексов с эриохромцианином и обесцвечиванию материала. Интенсивность окраски сенсорного материала, которая является показателем концентрации исследуемых ионов, ученые измеряли с помощью спектрофотометра Lambda 35.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Получить такой сенсорный материал исследователи смогли с помощью золь-гель технологии. Она предполагает получение сначала раствора с нерастворимыми в нем твердыми частицами размером от 1 нм до 100 нм, а затем удаление из него всей жидкой фазы. После удаления жидкости молекулы твердых частиц начинают образовывать связи друг с другом, в результате чего создается трехмерная молекулярная матрица. После завершения процесса синтеза в образовавшуюся матрицу исследователи ввели индикатор эриохромцианин.

«Важной задачей является определение оксалат-ионов в биологических жидкостях, прежде всего, в моче. Для этой цели требуется создать сенсорный материал с большей чувствительностью определения, что и будет дальнейшим развитием нашего исследования», – сказала Елена Моросанова, автор исследования, профессор кафедры аналитической химии химического факультета МГУ.

В качестве объектов анализа ученые выбрали пять образцов пищевых продуктов: листья щавеля, листья шпината, петрушку, молотый черный перец, корень имбиря. Содержание оксалат-ионов в этих образцах исследователи определили двумя методами: с помощью сенсорного материала и высокоэффективной жидкостной хроматографии. Эти два метода показали высокую сходимость результатов: разница между ними составила менее 10 %.

«Использование созданного нами сенсорного материала позволяет определять оксалат-ионы в пищевых продуктах просто, быстро и во внелабораторных условиях», – сказала Елена Моросанова.

indicator.ru

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

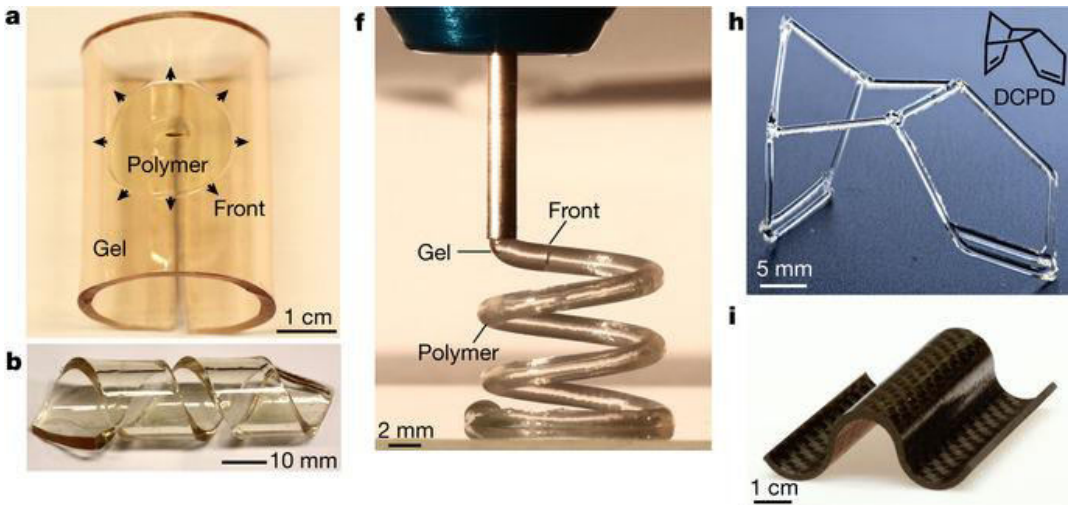
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Энергоэффективное получение полимеров и композитов с помощью фронтальной полимеризации

Исследователи из Университета штата Иллинойс, Урбана-Шампейн (University of Illinois, Urbana-Champaign), разработали новый экономически эффективный метод получения термореактивных полимеров и армированных полимерных композитных изделий, перспективных для промышленного применения.

Данный метод можно применять для получения таких материалов, как композитные панели для фюзеляжей самолета, затрачивая в 10 раз меньше энергии, чем с помощью современных технологий промышленного производства. При этом новые полимеры и композиты обладают сравнимыми свойствами – прочностью, термической стабильностью, сопротивлением изгибу и химической стойкостью.

Современные методы получения высококачественных термореактивных полимеров требуют применения автоклава, который необходим для отверждения мономера.

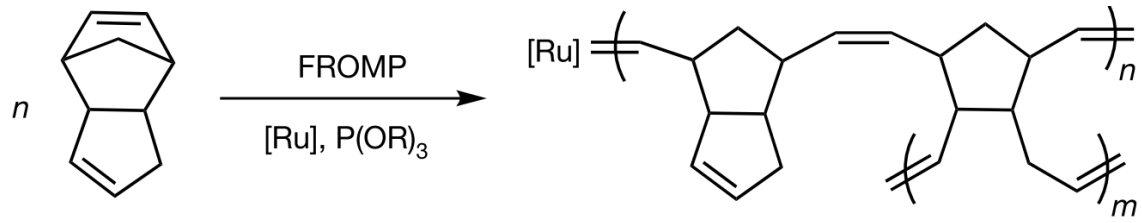


Однако применение автоклава достаточно энергозатратно (около 180 ºС в течение нескольких часов и пониженное давление), кроме того, оно ограничивает размер продукта габаритами автоклава и требует определенных финансовых вложений. По оценкам исследователей, традиционное получение небольшого участка композитного фюзеляжа Boeing 787, армированного волокном, требует 96 000 кВт·ч электрической энергии (~ годовое потребление 9-и жилых домов).

Для упрощения процесса исследователи обратились к набирающей популярность реакции фронтальной полимеризации. При фронтальной полимеризации раствор мономера и инициатора локально нагревают до активации инициатора, который приведет к полимеризации мономера. Тепло, выделившееся от реакции полимеризации, запустит следую-

щий цикл активации инициатора – полимеризацию мономера вплоть до исчерпания реагентов. Название процесс получил из-за быстрого продвижения линии (фронта) реакции через толщу мономера.

Находкой исследователей было использование рутений-катализируемой метатезисной полимеризации (FROMP) растворов дициклопентадиена (DCPD).



Мономер DCPD способен полимеризоваться в термореактивный продукт за 30 минут при нагревании. Дальнейшая оптимизация условий позволила найти алкилфосфитные ингибиторы и расширила диапазон полимеризации от 30 мин до 30 часов. Фронтальная полимеризация DCPD приводит к высокоэффективным сшитым термореактивным полидициклопентадиеновым (pDCPD) полимерам или полимерным композитам.

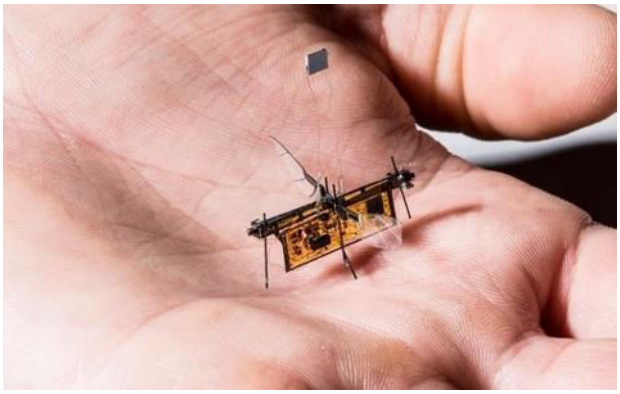
Исследователи находятся в процессе получения патента и поиска способов коммерциализации разработки.

habr.com

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Летающего робота научили получать энергию из лазерного луча



University of Washington

Американские инженеры создали миниатюрного летающего робота, который получает энергию для полета из солнечной панели, освещаемой лазерным лучом. Как сообщила IEEE Spectrum, благодаря этому он может летать без собственного источника энергии.

Обычно в качестве небольших летательных аппаратов рассматривают дроны, но, если стоящая перед аппаратом задача не заключается в перевозке грузов, даже типичный дрон может быть избыточно большим, тяжелым и дорогим. В качестве альтернативы дронам некоторые инженеры разрабатывают миниатюрных роботов массой менее грамма. Большого прогресса в этой области достигли инженеры из Гарвардского университета, разрабатывающие таких летающих роботов на протяжении нескольких лет. Они создали несколько вариантов робопчел, способных летать, прилипать к листьям, нырять и плавать под водой, а также выныривать из воды с помощью управляемого взрыва. Но у всех этих разработок есть недостаток, препятствующий их использованию – они получают питание по проводу, а создать для них достаточно мощный, емкий, а главное легкий источник питания пока сложно.

Инженеры под руководством Сойера Фуллера (Sawyer Fuller) из Вашингтонского университета создали похожего миниатюрного летающего робота, который не нуждается в проводах или аккумуляторе. На корпусе робота установлено два крыла, приводимых в движение пьезоэлектрическим актуатором. Для того чтобы робот мог летать автономно, инженеры установили над ним небольшую солнечную панель мощностью 250 милливатт. Поскольку она выдает ток с напряжением 7 В, а актуатору нужно напряжение 240 В, разработчикам пришлось создать миниатюрный повышающий преобразователь, который вместе с микроконтроллером для управления актуатором расположены на микросхеме в центре робота. Несмотря на то что робот состоит из множества компонентов, создателям удалось сделать его крайне легким – 190 миллиграммов.

Поскольку пока инженеры не разработали систему нацеливания луча на солнечную панель, вскоре после взлета робот перестает получать питание и падает. Кроме того, пока что ограничено и расстояние передачи энергии. Во время испытаний разработчикам удалось поднять робота в воздух с помощью лазерного излучателя, расположенного в 1,2 м от робота. В будущем они планируют увеличить это расстояние до десятков метров и разработать систему нацеливания луча на солнечную панель.

Системы беспроводной передачи энергии разрабатываются и для более крупных летательных аппаратов.

Например, инженеры из NASA провели несколько испытаний беспилотных летательных аппаратов, получающих энергию для двигателей с помощью мощного наземного лазера. А «Роскосмос» работает над созданием системы лазерной передачи энергии в космосе. Предполагается, что она позволит большим аппаратам-заправщикам передавать энергию другим спутникам. В 2016 г. ранний прототип системы прошел наземные испытания, во время которых излучатель передал энергию на расстояние полутора километров.

nplus1.ru

Уран поможет хранить радиоактивные отходы

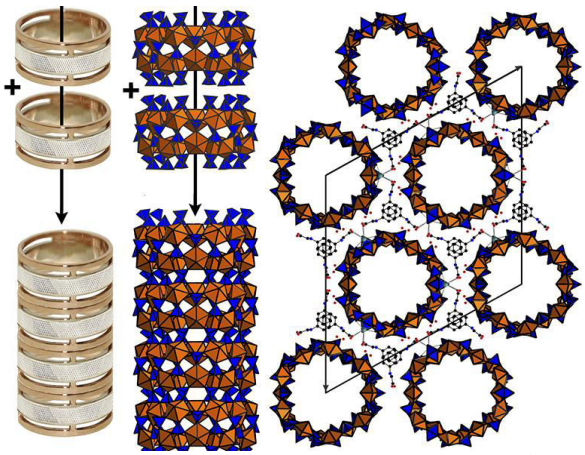
János Korom/Wikimedia Commons

Международный коллектив ученых с участием российских исследователей получил новый тип нанотрубок из атомов урана и серы, которые можно использовать в качестве уникальных форм для захоронения радиоактивных отходов. Результаты исследования, поддержанного Российским научным фондом, опубликованы в журнале Nanomaterials.

Нанотрубки – одна из форм строения вещества, которая благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам в последние десятилетия привлекает большое внимание исследователей по всему миру. Особенно известны углеродные нанотрубки, которые применяют в различных областях современной высокотехнологичной промышленности, таких как электроника и катализ.

До этого получить урановые нанотрубки ученым удалось лишь однажды: 15 лет назад профессор СПбГУ, член-корреспондент РАН Сергей Кривовичев создал схожий материал с атомами селена вместо серы, однако он оказался недостаточно устойчивым, что связано с особенностями поведения селена при воздействии воды и высоких температур. Несмотря на многочисленные попытки научных групп по всему миру получить нанотрубки с ураном в других химических системах, все подобные разработки оказались безуспешными: обычно подобные соединения урана образуют слоистые структуры.

Однако ученые смогли создать более устойчивые урановые материалы с добавлением серы. «Нанотрубки с ураном и серой показывают значительную устойчивость при увеличении температуры, что является очень важным свойством с точки зрения их перспективного применения для атомной промышленности, – отметил ведущий автор статьи, доктор геолого-минералогических наук, профессор СПбГУ Олег Сийдра. – Их можно использовать для разделения радиоактивных элементов, а также они могут стать одной из уникальных форм захоронения радиоактивных отходов».



Строение нанотрубок, открытых учеными-кристаллографами
Oleg I. Siidra et al/Nanomaterials

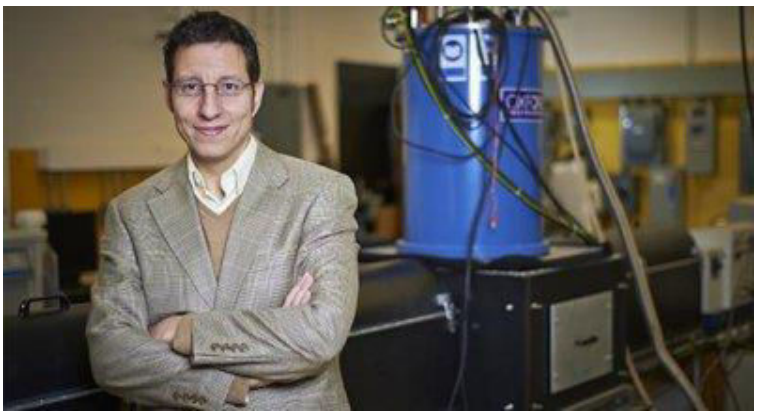
Разработанный метод синтеза путем испарения из раствора при комнатной температуре позволяет получить большой выход полезного компонента. Нанотрубки образуются путем сворачивания слоев, сложенных ураном и серой, а их диаметр составляет примерно полтора нанометра.

indicator.ru

Найден способ намагничивать полупроводники светом

В недавно вышедшей в журнале Nature Nanotechnology статье химики канадского Университета Ватерлоо рассказали о найденном ими быстром и эффективном способе записывать и обрабатывать информацию.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



«Если не вдаваться в подробности, мы намагничивали отдельные полупроводниковые нанокристаллы (крошечные частицы почти в 10 000 раз меньше ширины человеческого волоса) светом при комнатной температуре, – рассказал профессор Павле Радованович (Pavle Radovanovic). – Впервые кто-то смог использовать коллективное движение электронов, известное как плазмон, чтобы индуцировать стабильную намагниченность в таком немагнитном полупроводниковом материале».

Манипулируя плазмонами в дегенеративно легированных однофазных нанокристаллах оксида индия (In_2O_3), группа Радовановича доказала, что магнитные и полупроводниковые свойства действительно можно связать без охлаждения до криогенных температур.

Профессор предполагает, что сделанное открытие прежде всего найдёт применение в высокочувствительных магнитооптических сенсорах для тепловизоров и детекторов химических веществ. В будущем учёный рассчитывает распространить этот подход на квантовые сенсоры, на хранение данных и квантовую обработку информации.

nanonewsnet.ru по материалам ko.com.ua

МКС может получить лазер для отстрела космического мусора

Международная группа ученых ведет разработку лазерной установки для МКС. Как сообщает «РИА Новости», при помощи этой системы станция сможет избежать угрозы столкновения с крупным и мелким мусором. О самой установке рассказал на заседании Совета РАН по космосу председатель экспертной группы Совета по космическим угрозам, член-корреспондент РАН Борис Шустов.

В настоящее время для того чтобы избежать столкновения с космическим мусором, операторы МКС выполняют маневры уклонения. Они осуществляются при помощи двигателей как самой станции, так и пристыкованных к ней грузовых кораблей. Уклоняться от космического мусора приходится несколько раз в год.

От наиболее крупных и опасных фрагментов мусора МКС защитили, в частности, в 2014 г. Тогда орбиту станции подняли на километр – это было необходимо для того, чтобы избежать пересечения орбиты станции с расчетной траекторией фрагмента ступени европейской ракеты Ariane 5.

«На праздновании 60-летия первого спутника в Институте космических исследований прошло заседание рабочей группы, на котором ученые из Италии, Франции, Японии и России договорились, что будет образована международная кооперация. Все они будут думать над применением орбитальных лазеров, размещенных на МКС, чтобы избежать столкновений с малыми, в несколько сантиметров, но самыми многочисленными и поэтому самыми опасными обломками космического мусора», – рассказал Шустов.

Действительно, если крупные обломки каталогизированы, траектория их движения известна, то мелкие осколки с Земли не видны. Соответственно,

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

столкнуться с МКС какие-то кусочки космического мусора могут в любой момент.

Повреждение иллюминатора в модуле «Купол». Диаметр повреждённой области около 7 мм

Такое уже случалось. Например, в 2016 г. с иллюминатором модуля «Купол» столкнулся отслоившийся фрагмент краски или же маленький металлический фрагмент размером не более нескольких тысячных миллиметра. Тогда иллюминатор был немного поврежден. Но если бы осколок был крупнее, то иллюминатор пострадал бы гораздо сильнее, и кто знает, чем это происшествие обернулось бы для обитателей МКС и самой станции.

Станция движется по орбите со скоростью 7,66 км/с (27 600 км/ч), так что любой обломок, летящий по другой орбите, может вызвать повреждение. Иллюминаторы станции диаметром 80 см и толщиной 10 см изготовлены из многослойного кварцевого и боросиликатного стекла, так что столкновения с микроскопически маленькими фрагментами не несут никакой угрозы. Но вот осколки покрупнее уже могут вызвать критические повреждения. Если же размер фрагмента будет превышать 10 см, то повреждения МКС будут очень тяжелыми. НАСА отслеживает в настоящее время около 500 000 различных фрагментов космического мусора.

В связи с этим дополнительная защита МКС не помешает. «Сейчас в Японии и Европе серьезно обсуждаются проекты создания таких установок. Параметры лазеров, которые сейчас есть, как по средней мощности, так и по пиковой мощности достаточные для решения задачи по изменению орбиты небольших элементов космического мусора размером по 10 сантиметров и меньше», – сказал президент РАН Александр Сергеев.

По мнению специалистов, российские ученые могут способствовать уменьшению габаритов и технологической сложности орбитального лазера. Изначально идея создания такой системы принадлежала японским специалистам, которые предложили конструкцию, предусматривавшую концентрацию энергии с 10 000 оптоволоконных каналов. Российские ученые уверены, что конструкцию лазера можно упростить. «Мы предложили коллегам уменьшить число каналов с 10 тысяч до 100 путем использования вместо оптоволокна так называемых тонких стержней, которые разрабатываются в нашем институте», – отметил Палашов.

Пока ученые ведут работу в направлении создания самого лазера и платформы для размещения его на космическом аппарате. А вот интерфейс управления лазером – вопрос, который пока не затрагивается.

Отдельный аспект проблемы – мощность лазера и снабжение его нужным объемом электроэнергии. Для того чтобы лазер работал, потребуется вся электроэнергия, вырабатываемая МКС. Специалисты, понимая, что станцию обесточить нельзя, ведь это лишает идею установки лазера всякого смысла, предлагают решения по снижению нагрузки на энергосистему. В частности, длительность выстрела можно ограничить десятью секундами. 200 секунд потребуется лазерной установке на перезарядку. Дальность стрельбы составит около 10 километров.

Масса лазера составит примерно 500 килограммов, а объем – один-два кубических метра. Мощность лазера позволит просто испарять космический мусор, который превратится в металлическое облако, состоящее из частиц такого размера, что они не будут представлять угрозу для МКС и других космических аппаратов.

habr.com

Робот-пловец научился добывать энергию из перепадов температуры

Швейцарские и американские инженеры создали самодвижущегося плавающего робота, работающего без собственного аккумулятора. В нем установлены элементы из материала с памятью формы, которые меняют форму в ответ на изменение температуры окружающей среды и приводят в движение плавники. Кроме того, как сообщают инженеры в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences*, у робота есть захват, позволяющий ему перемещать и высвобождать небольшие предметы.

Как и во многих сферах электроники, разработчики роботов стремятся к их минимизации. Но обычно перед ними встает одна и та же проблема – миниатюрных роботов сложно снабжать энергией с помощью аккумуляторов. Некоторые инженеры решают эту проблему, передавая роботу энергию извне, как это недавно сделали создатели летающего робонасекомого, получающего энергию для полета из лазерного луча. Другие предлагают использовать куда более необычные источники энергии, например, влажность окружающей среды. Несмотря на то что

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

часто такие роботы неприменимы на практике, эти разработки важны, потому что применяемые в них принципы могут в будущем пригодиться при создании более совершенных устройств.

caltech / YouTube

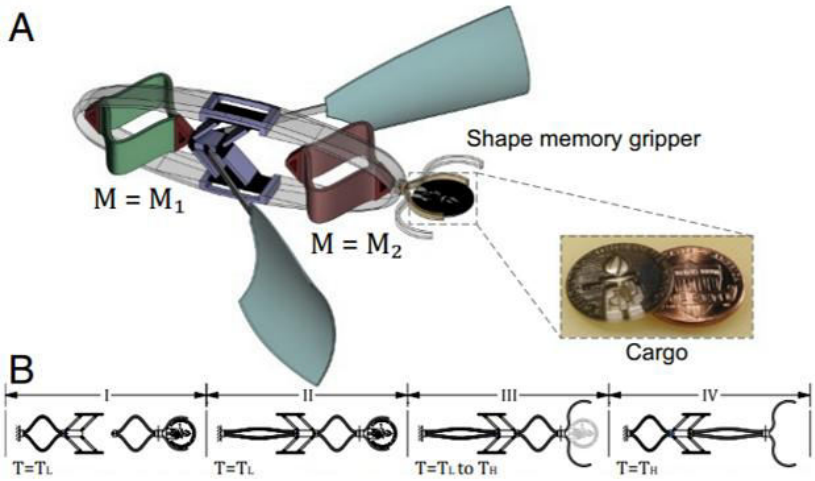


Схема плавающего робота-доставщика
Tian Chen et al. / PNAS, 2018

Группа инженеров из Швейцарской высшей технической школы Цюриха и Калифорнийского технологического института под руководством Кьяры Дарайо (Chiara Daraio) представила робота, который может автономно плавать в воде, используя вместо топлива перепады температуры окружающей среды. Разработчики создали несколько прототипов робота с немного различающимися возможностями, но в их основе лежит одна и та же конструкция – актуатор, выполненный из полимера с памятью формы. Он состоит из двух соединенных полосок полимера, которые изначально деформируются, и актуатор уменьшается в длину. Когда актуатор попадает в среду с температурой выше его температуры стеклования, полимерные полоски выпрямляются, а его длина значительно увеличивается.

Инженеры решили создать двигатель на основе этого актуатора, расположив рядом с ним бистабильный элемент, который может стабильно находиться в двух состояниях. Они присоединили к этому элементу плавники. После того как робот попадает в горячую воду, актуатор толкает элемент, который переходит в другое положение и заставляет плавники двигаться, толкая робота. Также инженеры создали прототип робота с двумя актуаторами разной толщины, которые активируются при одинаковой температуре, но не одновременно, а по очереди.

Самый совершенный прототип, созданный инженерами, имеет не только двигающиеся плавники, но и захват для доставки предметов. Изначально ему задают закрытую форму с зажатым предметом. После нагревания до первой критической температуры один из актуаторов активируется и двигает робота вперед. Затем вода нагревается еще сильнее, и при достижении второй критической температуры робот высвобождает предмет, а его второй актуатор двигает плавники и робота в обратном направлении и «перепрограммирует» форму первого актуатора.

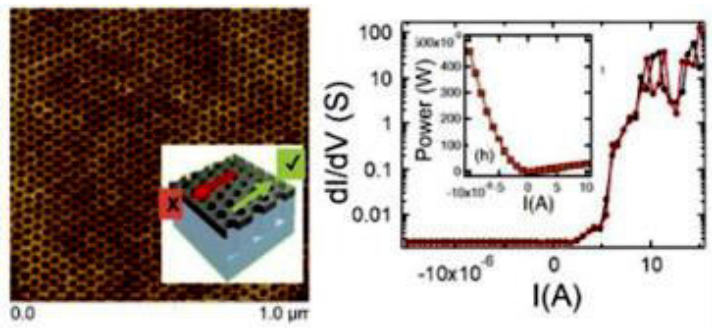
nplus1.ru

Лэптоп на магнитных диодах будет работать 20 суток без перезарядки

Группа физиков из Университета Миссури рассказала в журналах Advanced Electronic Materials и Advanced Science о новой разработке – материале, обещающем устранить две основные претензии к портативным источникам питания: малое время работы и сильный нагрев.

Этот 2D-материал получается путём нанесения магнитного сплава – пермаллоя – на гексагональную трафаретную решётку на поверхности кремния. Полученная двумерная структура проводит ток только в одном направлении. От полупроводникового диода, обычно изготавливаемого из кремния или германия, этот магнитный диод отличается тем, что рассеивает намного меньше энергии.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Таким образом, процесс коммутации тока, быстро истощающий батареи в сегодняшней портативной технике, может стать намного экономичнее с заменой обычных диодов на магнитные.

Магнитный диод открывает путь для новых магнитных транзисторов и усилителей, которые рассеивают очень мало мощности. Это означает, что дизайнеры смогут увеличить срок службы батарей более чем в сто раз. Снижение диссипации в компьютерных процессорах также уменьшит тепловыделение в ноутбуках или настольных ПК.

«Хотя предстоит ещё немало поработать, чтобы получить конечный продукт, уже ясно, что подобное устройство может растянуть нормальный 5-часовой ресурс аккумулятора более чем на 500 часов», – заявил Дипак Сингх (Deepak K. Singh), доцент физики и астрономии и руководитель этого проекта.

«Мы подали заявку на патент в США и начали процесс создания компании, которая займётся выводом таких устройств на рынок», – сообщил Сингх.

nanonewsnet по материалам ko.com.ua

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Для носимой электроники создали проводящее эластичное волокно

Швейцарские исследователи научились создавать высокоэластичные композитные волокна, способные обратимо растягиваться почти в шесть раз. Как сообщается в журнале *Advanced Materials*, учёные смогли создать таким способом оптическое волокно, а также проводящее волокно с электродами из жидкого сплава и углерода.

Разработчики носимой электроники создают прототипы устройств, сделанные из мягких, эластичных и проводящих материалов. Это делает устройства удобнее в ношении, а также защищает их от механического повреждения. Но технологии создания таких материалов пока недостаточно развиты и на практике они применяются редко, поэтому ученые и инженеры продолжают поиск новых материалов и методов их создания.

Исследователи из Федеральной политехнической школы Лозанны разработали метод создания композитного волокна, объединяющего в себе несколько материалов и способного растягиваться в несколько раз. Они задействовали метод термовытяжки из преформы, который применяют для создания оптоволокна. Для этого сначала создается большая относительно толщины волокна заготовка – в ней материалы расположены в том порядке, в котором они должны находиться в волокне. После этого заготовка нагревается и из нее вытягивается во много раз более тонкое волокно, причем во время этого процесса можно непрерывно создавать километры волокна, наматывая его на барабан.

Схема термовытяжки из преформы
Yunpeng Qu et al. / Advanced Materials, 2018

Ученые выбрали в качестве основы волокна сополимер, состоящий из двух фаз – твердой и мягкой. Посредством регулирования соотношений этих фаз можно управлять свойствами материала, в том числе, вязкоупругостью и температурой размягчения, которые важны для процесса термовытяжки. Подобрав

оптимальное соотношение для основы волокна, исследователи начали экспериментировать с различными дополнительными материалами и структурами их организации в волокне. Например, они создали оптоволокно, сердцевина которого состоит из жесткого поликарбоната, а оболочка – из мягкого сополимера. Кроме того, они создали несколько вариантов проводящих волокон, в которых за проводимость отвечает проводящий полимер с включениями технического углерода или жидкий при комнатной температуре сплав, такой как галинстан. После тестирования одного из таких волокон исследователи обнаружили, что оно может обратимо растягиваться почти в шесть раз.

Авторы предложили множество применений таким волокнам. В частности, их можно встраивать в одежду или в роботов и по увеличению сопротивления измерять растяжение волокна. Кроме того, учёные создали прототип клавиатуры на основе волокна с двумя электродами. Во время нажатия на клавишу, нарисованную на волокне, электроды соединяются, и напряжение в схеме меняется.

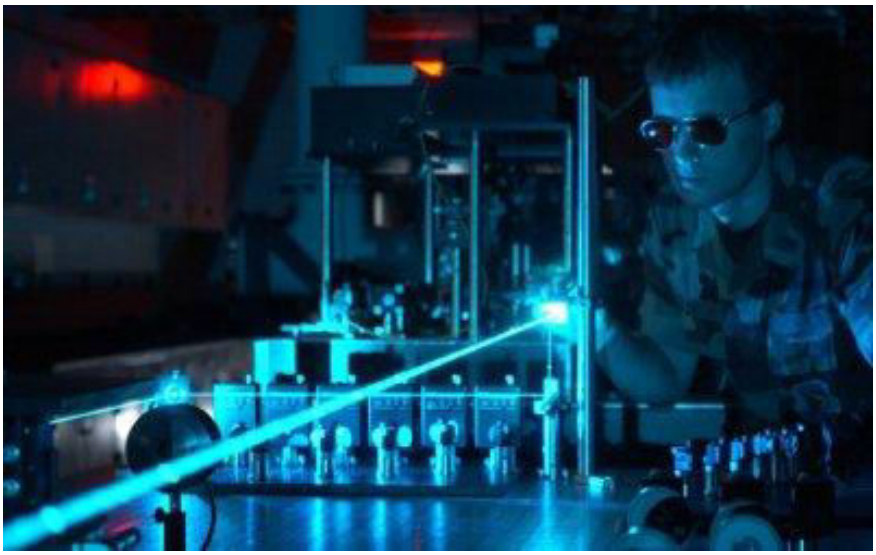
Недавно американские исследователи также использовали полимер и жидкий сплав для создания необычного эластичного материала, который не только проводит ток, но и самопроизвольно создает новые проводящие дорожки при повреждении, восстанавливающие проводимость.

nplus1.ru

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Висмут и германий помогут лазерам излучать в новом диапазоне



US Air Force/Wikimedia Commons

Российские физики разработали новый тип оптического волокна (стеклянного волокна, содержащего висмут) для лазеров, излучающих в области 1,6–1,8 микрометров, и изучили его уникальные характеристики. Работа проводится впервые в мире, ее результаты опубликованы в журнале IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (РНФ).

«Благодаря компактности, надежности, высокому качеству выходного излучения в настоящее время особую популярность получили волоконные лазеры, в которых в качестве активной среды используется оптоволокно с различными добавками химических элементов, преимущественно редкоземельных металлов. В таких лазерах излучение распространяется в области размером 2–10 микрометров, что позволяет получать высокую яркость. Совместно с Институтом химии высокочистых веществ РАН, мы создали новый тип волокна для лазеров, генерирующих в новых спектральных диапазонах, недоступных для волоконных лазеров с редкоземельными ионами», – рассказал Сергей Фирстов, кандидат физико-математических наук и старший научный сотрудник Научного центра волоконной оптики РАН.

Сергею Фирстову и его коллегам удалось этого добиться при помощи введения химического элемента висмута в оптоволокно с высоким содержанием оксида германия. Висмут при нормальных условиях – блестящий серебристый металл с розоватым отблеском. При добавке этого элемента оптоволокно наделяется уникальными способностями, которые позволяют усиливать и генерировать оптическое излучение на различных длинах волн, в данном случае от 1,6 до 1,8 микрометров (для сравнения: толщина человеческого волоса равна примерно 40 микрометрам). Это излучение относится к ближнему инфра-

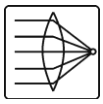
красному диапазону, которое не видно человеческим глазом.

Физики установили, что оптоволокно приобретает необходимые свойства при введении ионов висмута в оптоволокно с высоким количеством оксида германия. Только в этом случае ион висмута, встраиваясь вблизи дефекта сетки стекла, будет работать как активный центр. Авторы работы интенсивно занимаются экспериментальными исследованиями свойств таких волокон, обращая внимание на интересные особенности, – такая работа проводится впервые в мире. В частности, недавно был обнаружен новый оптический эффект – обесцвечивание волокна под воздействием лазерного излучения и его обратимость при нагреве.

Сейчас из данного типа волокна созданы лазеры в области 1,7 микрометров с мощностью более 2 Вт и КПД более 30 %. Разработка не имеет зарубежных аналогов. До сих пор остается неизвестным фундаментальное ограничение характеристик таких лазеров. Ученые считают, что эти характеристики, вполне вероятно, можно улучшить, совершенствуя технологию их изготовления.

«Волоконные лазеры генерируют в определенных областях длин волн, при этом область длин волн 1,6–1,8 микрометров оставалась почти неосвоенной, – подытожил Сергей Фирстов. – Добавление висмута в стеклянную матрицу с высоким содержанием оксида германия стало прорывом, позволившим реализовать новый тип световодов, который можно использовать в качестве активной среды для создания усилителей и лазеров, работающих в этом спектральном диапазоне».

indicator.ru



Томские ученые создали экономичный лазер, способный изменять длину волн

По данным Минобрнауки, лазер является экономичным.

Ученые Томского политехнического университета (ТПУ) в составе международного исследовательского коллектива создали экономичный лазер, способный плавно перестраивать длину волны своего излучения во всем видимом диапазоне. Об этом сообщило Минобрнауки со ссылкой на результаты исследования, опубликованные в научном журнале «Photonics Research».

По информации министерства, обычно лазеры излучают в узкой спектральной полосе, предельно ограниченной свойствами среды. Для получения красного или зеленого излучения приходится либо создавать новый лазер, либо использовать технологии изменения имеющегося излучения.

«Нас интересовало решение, исключающее минусы известных подходов, и при этом простое и дешевое. Мы собрали волоконный лазер, генерирующий на выходе световые импульсы с центральной длиной волны 1,04 микрометров, длительность которых меняется от пикосекунды до 50 фемтосекунд. Излучение лазера заводилось в кусочек специально профилированного фотон-кристаллического волокна (ФКВ)», – приводятся в сообщении слова доцента ТПУ Романа Егорова.

Поясняется, что ФКВ – это специальный класс оптических волокон, центральная область которых (где проходит свет) окружена упорядоченной структурой пустотелых или заполненных специальным материалом микроканальцев. Если центральный канал сделать сужающимся и правильно подобрать материал волокна, то спектр излучения на выходе будет очень сильно зависеть от длительности и интенсивности импульсов на входе. Меняя длительность и энергию импульсов на входе, ученые смогли управлять балансом нелинейных и дисперсионных процессов внутри волокон.

Плавная перестройка длины волны излучения сегодня востребована в лазерной микроскопии, например, для биоимиджинга, – метода, позволяющего наблюдать микроструктуру живой ткани, которая даёт возможность увидеть гораздо более мелкие детали исследуемого объекта. Область применения данных методов достаточно широка и включает такие актуальные направления, как эмбриология, нейробиология, онкология и многие другие.

tass.ru/nauka/5182005

Длину диффузии экситонов в полупроводящих полимерах увеличили в 20 раз

Британские химики разработали полупроводниковые полимерные нановолокна, в которых длина диффузии экситонов достигает 200 нанометров, что в 20 раз выше, чем в аналогичных материалах. Как пишут ученые в *Science*, в будущем такие материалы могут использоваться для повышения эффективности органических солнечных батарей.

Некоторые полимеры за счет наличия в своей структуре системы сопряженных двойных связей могут обладать проводящими или полупроводниковыми свойствами. Благодаря сопряженным связям

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

электронная плотность в полимерной молекуле равномерно распределяется по ее длине, и электроны могут перемещаться по ней, переходя с одного атома на другой. Существуют и другие механизмы проводимости в полимерах – например, недавно ученые получили проводящий полимерный материал, который работает за счет наличия в системе большого количества свободнорадикальных групп, однако такие варианты встречаются значительно реже. Проводящие и полупроводниковые органические молекулы уже сейчас применяются во многих электронных устройствах, однако из-за недостаточного контроля физических параметров они, как правило, уступают по эффективности неорганическим материалам.

Для повышения эффективности органических материалов в качестве светопоглощающих полупроводниковых элементов британские химики под руководством Иэна Мэннерса (Ian Manners) из Бристольского университета предложили увеличить в них длины диффузии экситонов – незаряженных квазичастиц, состоящих из возбужденного электрона, который двигается вокруг дырки, – которые образуются в результате облучения светом. Возможность переноса экситонов на достаточно большие расстояния от точки их образования дает возможность более эффективно использовать падающий на материал свет, повышая КПД его преобразования в электрическую энергию. Обычно в полимерных полупроводниках длина диффузии – расстояние, на которое может перемещаться квазичастица до момента своего исчезновения, – не превышает 10 нанометров. Однако ученым удалось сделать такой полимерный материал, в котором этот размер можно увеличить более чем на порядок – до 200 нанометров.

Добиться этого химикам удалось за счет совмещения в двумерном композитном материале трех различных типов полимеров. Основу материала составило кристаллическое ядро из полидигексилфлуорена – полупроводникового полимера, который поглощает свет в синей части спектра (мономер этого соединения входит в семейство флуоренов – ароматических соединений, включающих в себя два шестичленных цикла и один пятичленный). К этому ядру с помощью ковалентных связей присоединялись подвижные боковые цепочки двух различных составов: либо полиэтиленгликоль, либо политиофен. При этом кристаллическое ядро и политиофеновые фрагменты за счет наличия сопряженных двойных связей могут проводить электрический ток, а полиэтиленгликоль – обладает свойствами диэлектрика.

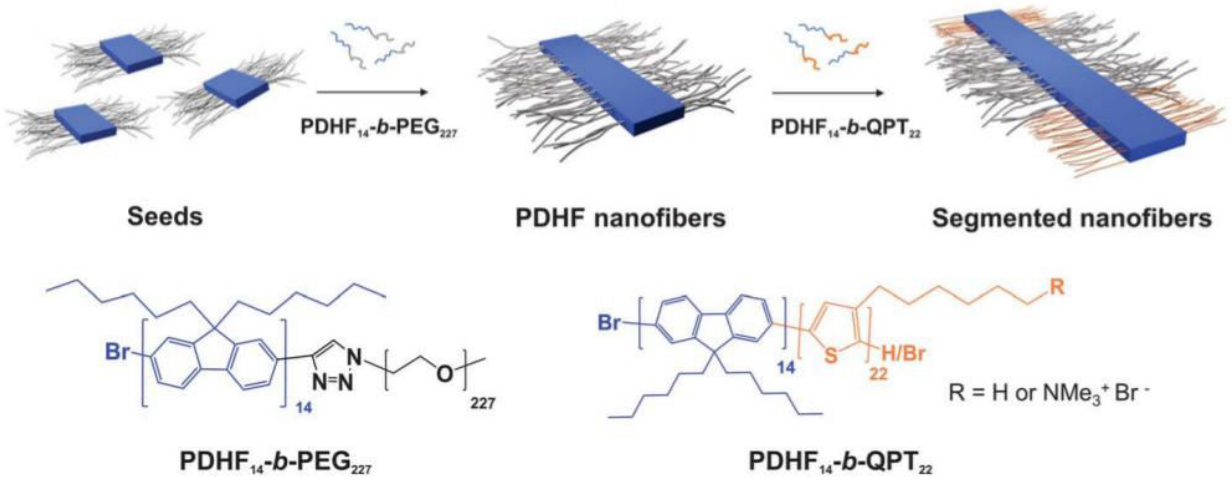


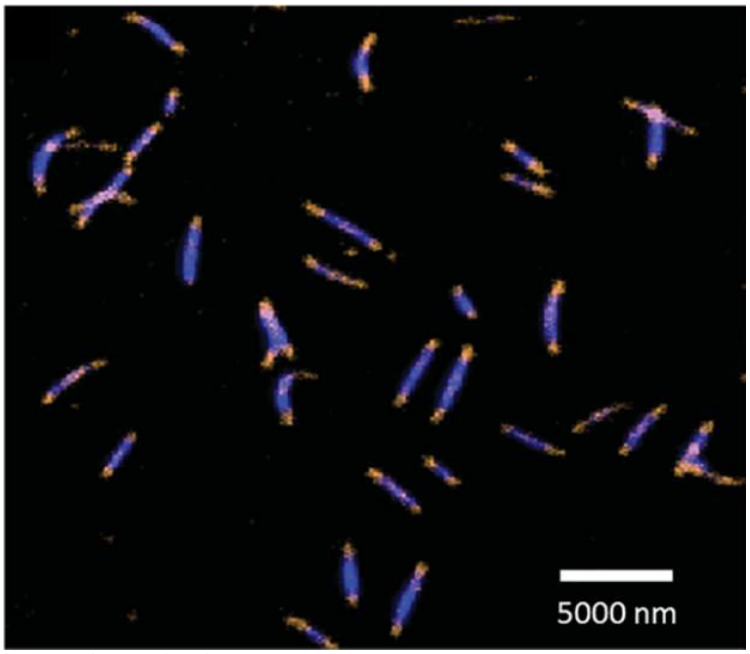
Схема сборки полимерных композитных нановолокон из отдельных элементов. PDHF – полидигексилфлуорен, PEG – полиэтиленгликоль, QPT – политиофен. *X.-H. Jin et al./ Science, 2018*

С помощью метода кристаллизации на затравках ученые получили из этих полимеров одномерные композитные элементы длиной от 180 до 1840 нанометров. При этом последовательность стадий синтеза подбиралась таким образом, чтобы в середине образовавшейся частицы находился фрагмент, содержащий полиэтиленгликоль, а по краям – фрагменты с политиофеном. За счет такой геометрии в полимерном композите удалось разделить донорные и акцепторные участки, в результате чего свет поглощался в центре частицы, и образовавшиеся экситоны двигались к ее краям до проводящих политиофеновых фрагментов. В результате длина диффузии экситонов по полидигексилфлуореновому кристаллическому полимеру в некоторых частицах достигала примерно 200 нанометров. При этом двигались эти экситоны по полимеру довольно быстро: коэффициент диффузии экситонов в полимерном материале составлял до 0,5 квадратных сантиметров в секунду.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

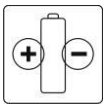
Ученые отмечают, что добиться таких значений для длины диффузии впервые удалось для монокристаллического полимерного материала с известной геометрией. По словам химиков, толщины материала в 200 нанометров достаточно для полного поглощения падающего света, поэтому возможность переноса экситонов на такое расстояние позволит не ограничиваться в оптоэлектронных органических устройствах совсем тонкими светопоглощающими слоями.

Увеличение длины диффузии носителей заряда в полимерных материалах – одна из важных задач в повышении эффективности современных органических оптоэлектронных устройств. Для этого ученые предлагают использовать довольно сложные структуры. Например, недавно было предложено вводить в полимерный проводник отдельные молекулы фуллеренов, благодаря чему удалось увеличить длину диффузии электронов с долей микрометров до 3,5 сантиметров.

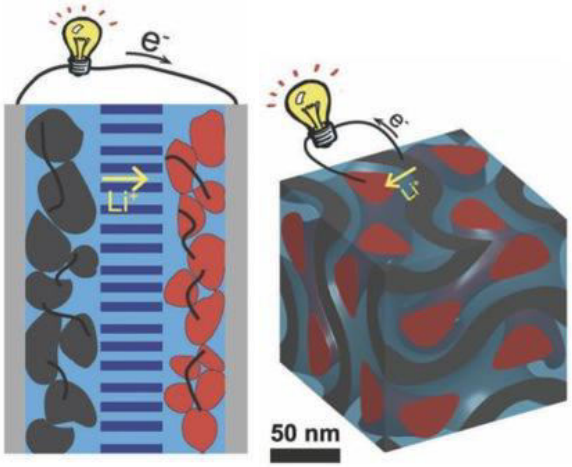


Микрофотография флуоресцирующих нановолокон, полученная с помощью конфокальной микроскопии. Синие участки соответствуют люминесценции кристаллического ядра, оранжевые – люминесценции политиофеновой «короны»
X.-H. Jin et al./ Science, 2018

nplus1.ru



Создана наногибридная литий-ионная аккумуляторная батарея, способная заряжаться за считанные секунды

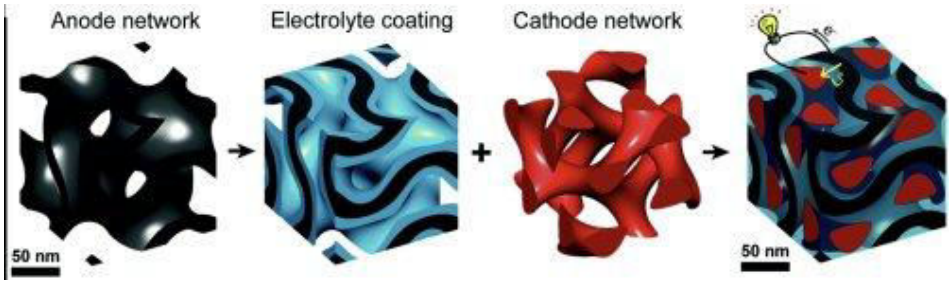


В обычных аккумуляторных батареях анод и катод (два электрода батареи) физически размещены в различных местах и соединены друг с другом слоем электролита. Такая конструкция имеет свои преимущества и недостатки, главным из последних является достаточно длинный путь, который ионы лития должны пройти от одного электрода к другому во время зарядки или разряда батареи. Ввиду этого аккумуляторные батареи заряжаются достаточно долго и не способны быстро отдавать накопленный в них заряд. Решением этой проблемы может стать новая наногибридная аккумуляторная батарея, разработанная исследователями из Корнуэльского университета. Уникальная трехмерная структура этой батареи позволит производить ее полную зарядку буквально за считанные секунды.

Вместо одного цельного катода и анода в новой батарее использованы тысячи наноразмерных катодов и анодов. Каждый из этих катодов или анодов представляет собой наночастицу, размерами около 20 нанометров. При помощи особого технологического процесса эти наночастицы смешиваются и соединяются друг с другом, образуя два изолированных «губчатых» электрода, буквально вросших друг в друга.

В отличие от конструкции традиционных батарей, в материале электродов новой батареи нет крошечных отверстий, пор, которые являются источником нескольких проблем. Электроды новой батареи не могут замкнуться, и вероятность их самопроизвольного возгорания стремится к нулю. Зато такая конструкция обеспечивает не только быструю зарядку и разряд – она позволяет кардинально увеличить эффективную площадь электродов, что равносильно увеличению показателя плотности хранения энергии и емкости аккумуляторной батареи.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



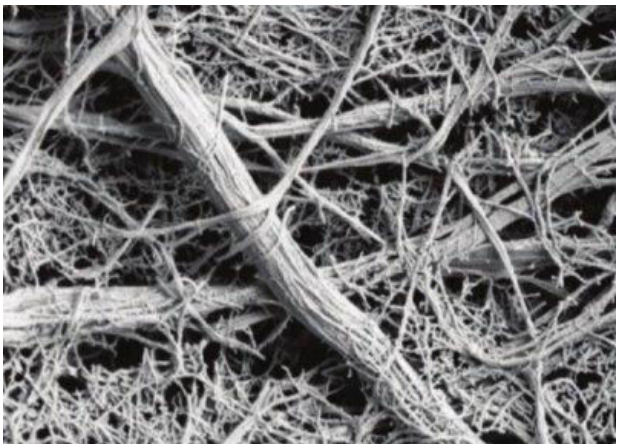
Исследователи из Корнуэла продолжают работать над совершенствованием данной технологии с целью доведения ее до уровня промышленного производства и практического применения. Параллельно с этим ведется оформление патентной заявки и патентной защиты опытных образцов новых батарей. В заключение отметим, что данные работы проводились по заказу и с финансированием американского Министерства энергетики и частично американского Национального научного фонда.

dailytechinfo.org

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

В ИНХС РАН создали фильтр, который улавливает мельчайшие наночастицы

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



В статье, опубликованной в журнале Cellulose, сообщается, что российские химики создали мембрану из молекул обычной целлюлозы, которая пропускает даже самые крупные молекулы жидкостей, но при этом удерживает мельчайшие наночастицы.

«Обычная перегонка хорошо подходит для разделения органических растворителей, но есть и более сложные задачи. К примеру, при регенерации гомогенных катализаторов перегонка не всегда подходит, так как при высоких температурах они разрушаются. Процесс фильтрации исключает это, поскольку он проходит при комнатной температуре», – рассказал Алексей Волков из Института нефтехимического синтеза РАН в Москве (РИА Новости со ссылкой на пресс-службу РНФ).

В последние годы физики и химики активно работают над созданием новых наноматериалов, которые могли бы стать основой для гаджетов, способных разделять тяжелые и легкие изотопы, извлекать воду из воздуха, сортировать разные элементы и исполнять многие другие задачи, которые кажутся сегодня немыслимыми.

Фильтры и мембраны из подобных материалов могли бы совершить настоящую революцию в промышленности и экономике, но их созданию часто мешает то, что они производятся из дорогостоящих материалов или просто редких компонентов, которые пока можно изготавливать лишь штучным образом.

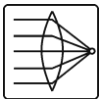
Волков и его коллеги нашли простой и недорогой способ изготовления мембран, способных «отлавливать» даже самые небольшие наночастицы, экспериментируя с молекулами целлюлозы – природного полимера, из которого состоят волокна древесины и другие растительные ткани.

Как обнаружили российские химики, целлюлозные цепочки можно заставить самостоятельно объединиться в очень тонкий фильтр, растворив их в другом органическом веществе, N-метилморфолин-N-оксиде, и затем добавив в эту смесь присадки, которые заставили нити целлюлозы осадиться на дне сосуда и сформировать своеобразную пористую «губку».

На роль этих присадок, по словам ученых, подходят очень простые и недорогие вещества – обычная вода и различные простейшие спирты. Меняя их концентрацию, состав и другие свойства, Волкову и его команде удалось получить очень плотный, но при этом проницаемый для жидкостей материал, диаметр пор в котором не превышал и двух нанометров.

Фильтры из такой пористой целлюлозы, как показали дальнейшие опыты химиков, могут вылавливать даже самые мельчайшие наночастицы из сложных растворов разных веществ, чей диаметр не превышает и 10 нанометров. Это, по словам создателей подобных мембран, снизит стоимость и упростит многие процессы в химической промышленности и при ведении лабораторных исследований.

scientificrussia.ru по материалам ria.ru



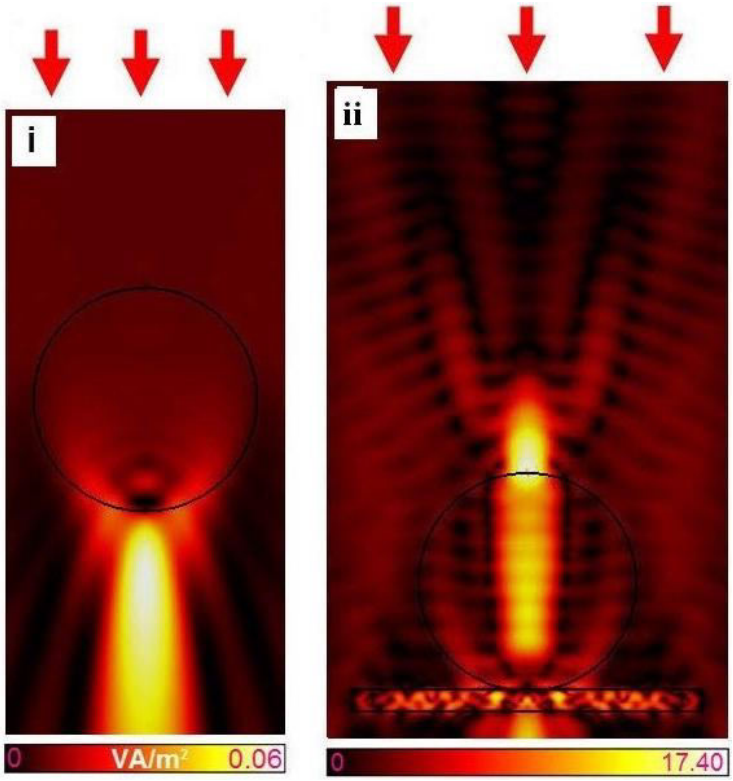
Сферы помогут изучать поверхности непрозрачных материалов

Ученые Томского политехнического университета вместе с коллегами из Бангорского университета (Великобритания) предложили способ улучшить разрешение оптических микроскопов, работающих с отраженным светом, то есть способных изучать непрозрачные материалы. В качестве суперлинзы для микроскопа они использовали сферические диэлектрические частицы с показателем преломления, близким к показателю преломления воздуха. Цель ученых – приблизить разрешение оптических микроскопов в этом режиме до показателей лучших оптических приборов. Последние результаты исследований опубликованы в одном из старейших научных журналов мира Annalen der Physik.

В последнее десятилетие активно развивается направление так называемых наноскопов – одних из самых «зорких» оптических микроскопов, которые обеспечивают разрешение в 50 нанометров в белом свете. В качестве линз в этих приборах применяются диэлектрические сферические наночастицы, которые работают в режиме «на пропускание». Это означает, что объект визуализируется за счет пропускания излучения сквозь линзу. Однако существует целый спектр материалов, которые непрозрачны для излучения, и для исследования их свойств необходимы методы субволновой фокусировки в режиме «на отражение». К таким материалам, например, относятся металлы. Ранее авторский коллектив ТПУ показал, что сфокусировать излучение в режиме «на отражение» можно с помощью прямоугольных или полусферических частиц.

«Сферические частицы более просты в получении и применении, поэтому в своей последней работе мы использовали именно их, – рассказал руководитель коллектива Игорь Минин из ТПУ. – Размер частиц составляет несколько длин волн. Свет отражается от металлической подложки, на которой располагаются частицы, и фокусируется со стороны падения, около поверхности частички. Если выполнить их в виде сферы, то она работает как линза, фокусирующая в обратном направлении. При этом у сферических частиц показатель преломления близок к единице, к показателю воздуха, в то время как в традиционных микроскопах он близок к 1,5. В результате, по сравнению с традиционными оптическими микроскопами, сферические частицы дали увеличение разрешения в режиме “на отражение” лучше дифракционного предела. В конечном итоге мы стремимся довести этот показатель до сравнимого с тем, что дают наноскопы в режиме “на пропускание”».

Проводимые исследования лягут в основу принципов построения наноскопа, который может работать в двух режимах с высоким разрешением. «Возможность одновременного использования микроскопа в двух режимах обеспечивает дополнительную информацию о распределении сигналов ближнего поля и открывает новый и уникальный способ характеризации материалов и наноструктур, – отметили авторы статьи. – Можно будет с большей детализацией визуализировать ряд перспективных материалов и объектов. Например, поверхностные плазмонные волны – это электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы между металлом и диэлектриком. Эти волны используют в плазмонных сенсорах для биохимических анализов, в микроэлектронике. Для их исследования необходимо очень высокое разрешение».

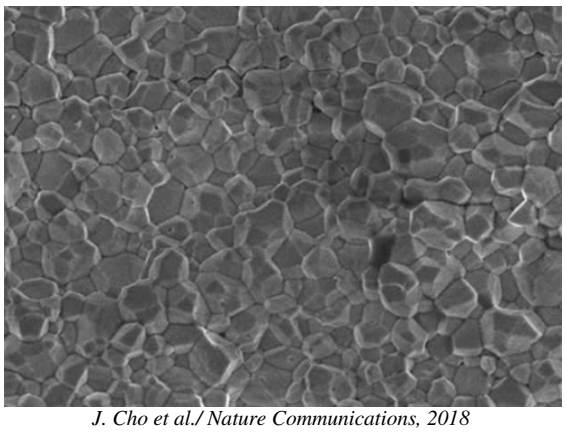


Пример фокусировки сферической частицы с показателем преломления, близким к 1 – аналог классической сферической линзы (слева); пример фокусировки в режиме «на отражение» (справа) / Пресс-служба ТПУ

indicator.ru

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Высокоскоростное спекание добавило керамике упругости и пластичности



J. Cho et al./ Nature Communications, 2018

Американские материаловеды обнаружили, что метод высокоскоростного спекания под действием электрического поля позволяет получать микрокерамические материалы с необычными механическими свойствами. Если при комнатной температуре такая керамика оказывается сверхупругой и может выдерживать деформации до восьми процентов, то теперь выяснилось, что после нагревания выше 400 градусов Цельсия она становится еще и пластичной и перестает разрушаться при первом появлении трещин (*Nature Communications*).

Как правило, керамика – неорганические (в первую очередь оксидные) материалы, прошедшие термическую обработку, – твердая и хрупкая: при внешних нагрузках быстро образуются трещины, в результате она легко раскалывается и крошится. У некоторых керамических материалов можно наблюдать небольшие пластические деформации, но связаны они в первую очередь с очень медленным вязким течением в аморфных структурах, и этим эффектом при относительно высоких скоростях деформации можно пренебречь. Определяются механические свойства керамических материалов в первую очередь их структурой – очень небольшим количеством в структуре материала дислокаций (протяженных дефектов, движение которых и связано с пластической деформацией).

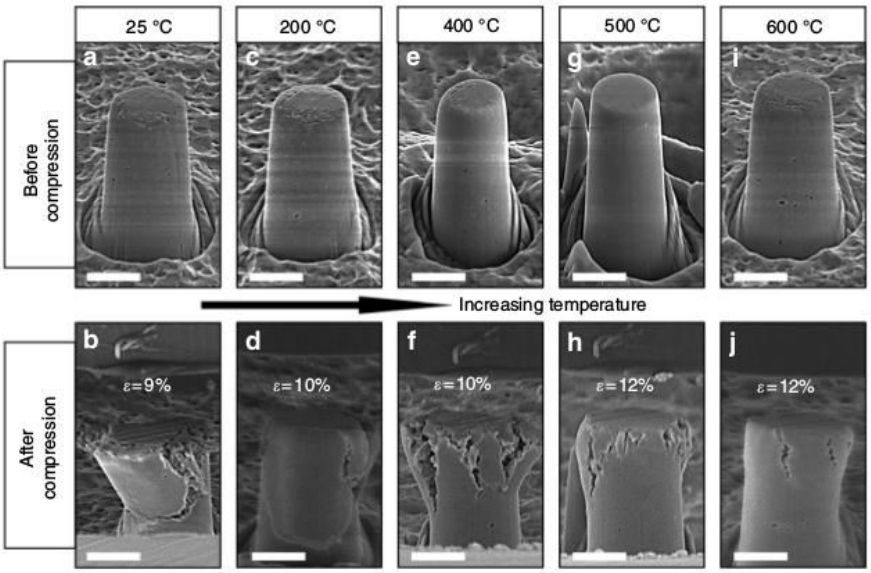
Недавно было обнаружено, что довольно необычными механическими свойствами, которые отличаются от свойств других керамических материалов, обладает микрокерамика, полученная методом высокоскоростного спекания (flash sintering). Этот метод, который был предложен для уплотнения керамических материалов в качестве замены традиционному «долгому» спеканию, основан на нагревании материала под действием электрического поля напряженностью несколько вольт на сантиметр. Материал при этом подвергается постепенному нагреванию, и при преодолении критической температуры происходит резкий (в течение нескольких секунд) переход в плотное состояние с повышенной проводимостью. К настоящему моменту уже было показано, что для керамики, полученной таким образом, характерны необычные механические свойства при комнатной температуре (например, сверхупругость и эффект памяти формы), однако то, что происходит с этими материалами при более высоких температурах, практически не изучалось (даже несмотря на то, что большинство возможных способов применения этих материалов предполагает работу при высоких температурах – часто более тысячи градусов Цельсия).

Американские материаловеды под руководством Синхана Чжана (Xinghang Zhang) из Университета Пердью обнаружили, что полученный с помощью высокоскоростного спекания керамический материал при 400 градусах Цельсия в дополнение к аномальной упругости приобретает еще и пластические свойства и во многом ведет себя подобно металлу. Этот эффект был обнаружен при изучении микроколонн, полученных из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Механические свойства цилиндрической микроколонны диаметром около трех микрометров и высотой около шести микрометров авторы работы изучали с помощью эксперимента по одноосному микросжатию, в котором она помещалась между двумя сдвигающимися поверхностями. Характеристики материала оценивались при различных температурах по данным электронной микроскопии (по ним можно было, например, определить, где и в какой момент образуются трещины) и непосредственно из измерений кривых «напряжения – деформации».

Оказалось, что при температурах ниже 400 градусов Цельсия микроколоннам из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, удается переносить аномально высокие напряжения (до 3,5 гигапаскаля). Их деформация при этом достигает восьми процентов, что не характерно для объемных керамических материалов того же состава, полученных традиционными методами. Но как только в материале появляются первые трещины, при комнатной температуре это очень быстро приводит к его разрушению. Однако при нагревании выше 400 градусов Цельсия поведение материала меняется: он переходит в пластичное состояние, которое позволяет необратимо деформировать материал за счет активации движения дислокаций и межзеренных границ. В этом случае пластические деформации препятствуют образованию трещин и замедляют их развитие. При этом авторы работы отмечают, что подобный эффект наблюдается и в объемной керамике, но при значительно более высокой температуре – выше 800 градусов Цельсия.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Ученые отмечают, что, вероятнее всего, основной причиной такого необычного поведения керамического материала при сжатии стало образование большого количества дислокаций. При традиционных методах спекания керамических материалов образование сильных ковалентных или ионных связей препятствует образованию дислокаций, однако метод высокоскоростного спекания с помощью электрического поля позволяет им образоваться в достаточном для пластической деформации количестве, что подтверждается и данными просвечивающей электронной микроскопии.



Фотографии керамических микроколонн до и после сжатия при различных температурах
J. Cho et al./ Nature Communications, 2018

Для изучения точных механизмов пластической деформации не всегда достаточно только экспериментальных методов. Однако мощности современных вычислительных систем уже хватает, чтобы исследовать подобные процессы и с помощью компьютерного моделирования. Например, посредством метода молекулярной динамики ученым удалось промоделировать высокоскоростное сжатие тантала и на атомарном уровне изучить процессы, происходящие с металлом при его пластической деформации. Другая группа ученых смоделировала деформацию неупорядоченных систем и обнаружила, что для всех твердых систем с аморфной структурой многие механические параметры, связанные с пластической деформацией, являются универсальными.

nplus1.ru

Сибирские ученые создали установку для производства биоразлагаемых полимеров

За один раз она будет производить до 1,5 кг полимера, затем технологию планируется внедрять в промышленное производство.

Как сообщил ТАСС старший научный сотрудник института Александр Потапов, ученые Института катализа Сибирского отделения РАН создали установку для опытного производства полимеров, которые полностью разлагаются бактериями.

«Мы сделали установку объемом 3 литра – за один раз она будет производить до 1,5 килограмма полимера. Будем проводить эксперименты и воспроизводить лабораторные свойства – это масштабирование технологии», – рассказал Потапов.

Установка необходима для отработки технологии, которую затем планируется внедрять в промышленное производство. По словам ученого, разработкой заинтересовались частные предприниматели из регионов России, а также компания из США.

Ранее ученые Института катализа Сибирского отделения РАН запатентовали простую технологию получения прочных полимеров из янтарной кислоты и спиртов, которые могут заменить материалы для изготовления пакетов, посуды и упаковки – полиэтилен и полипропилен. Материалы полностью разлагаются с помощью бактерий без вреда для окружающей среды с выделением воды и небольшого количества углекислого газа. Срок разложения составляет от нескольких месяцев до 2 лет.

По данным экологов, ежегодно в океаны попадает от 4,8 до 12,7 миллиона тонн пластика, в том числе упаковки и пакетов. По данным «Гринпис», в России ежегодно используется 180 пакетов на душу населения, то есть 30 миллиардов пакетов в год, или 5 % от общемирового объема потребления. Эксперты называют одним из путей решения проблемы пластикового загрязнения биоразлагаемые полимеры.

tass.ru

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"