

Название статьи	Страницы	Цит.
I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1-3-0-0 СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.		
 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЗОНЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) <i>Иванова И.Ю., Ноговицын Д.Д., Тугузова Т.Ф., Шеина З.М., Сергеева Л.П.</i>	12-22	0
II. НЕВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 9. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 9-1-0-0 АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.		
 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС ВВР-КН В РЕАКТОРЕ ВВР-К <i>Шаймерденов А.А., Шаманин И.В., Прибатурин Н.А., Гизатулин Ш.Х., Колточник С.Н., Чекушина Л.В.</i>	23-33	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА.		
 ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА КАК НОСИТЕЛЯ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ <i>Бокрис Д.О.М., Везироглу Т.Н.</i>	34-42	0
 INFORMATION ABOUT THE CONFERENCE: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT POLLUTION AND PREVENTION (ICERP 2018)	42	0
IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-7-0-0 ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.		
 ХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОТОННЫХ ПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ $BA_4CA_2NB_2O_{11}$ И $LA_6WO_{12}KCO_2$ <i>Корона Д.В., Партин Г.С., Анимица И.Е., Шарафутдинов А.Р.</i>	43-59	0
V. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. 13. НАНОСТРУКТУРЫ. 13-1-0-0 НАНОСИСТЕМЫ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ.		
 РЕЛАКСАЦИОННЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЛИТОЛА-24 С МЕЗОГЕННЫМИ ПРИСАДКАМИ <i>Ельникова Л.В., Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г.</i>	60-69	0
 ИНФОРМАЦИЯ О ВЫСТАВКЕ: III МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ МАСЛА И СОЖ В МЕТАЛЛУРГИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ И МАШИНОСТРОЕНИИ - 2018"	69	0
XII. ТРАНСПОРТНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА. 32. ЛИТИЙ-ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА И СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ.		
 ЛИТИЙ: РЕСУРСЫ, ДОБЫЧА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО РЫНКА <i>Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П.</i>	70-81	0
XVII. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА. 38. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА.		
 СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ <i>Котов С.А., Лябин Н.А., Казарян М.А., Сачков В.И.</i>	82-104	0
 ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ КОМПОНЕНТОВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ <i>Крайский А.В., Постников В.А., Миронова Т.В., Крайский А.А., Шевченко М.А., Казарян М.А.</i>	105-124	0
 ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ: 14-ОЕ СОВЕЩАНИЕ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ "ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИОНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА"	124	0
XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-5-0-0 МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ.		
 МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ"	125	0
XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-6-0-0 РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ.		
 ПРЕМИЯ "ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ"	126-128	0
 "ДАНФОСС" ПЕРЕНОСИТ СБОРКУ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РОССИЮ	129	0

	В МОСКВЕ ПРОШЛА КОНФЕРЕНЦИЯ ЭКОЭКСПЕРТОВ SCHNEIDER ELECTRIC	130	0
	SCHNEIDER ELECTRIC - ИННОВАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР КОНФЕРЕНЦИИ "НЕФТЕХИМИЯ РОССИИ И СНГ"	131	0
	ТАСС: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ "МЕРИДИАН НАДЕЖДЫ" 2018	132	0
	ISOVER: 10 ИЗ 55 ПРОЕКТОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЖК ВЫШЛИ В НАЦИОНАЛЬНЫЙ ФИНАЛ КОНКУРСА "ПРОЕКТИРОВАНИЕ МУЛЬТИКОМФОРТНОГО ДОМА - 2018"	132-134	0
	BASF: В НОВОСИБИРСКЕ ОТКРЫЛСЯ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ОФИС КОНЦЕРНА BASF КУРС НА РАСШИРЕНИЕ ПРИСУТСТВИЯ В РЕГИОНАХ	134-135	0
	IRENA: GLOBAL RENEWABLE GENERATION CONTINUES ITS STRONG GROWTH, NEW IRENA CAPACITY DATA SHOWS	135-136	0
	ГРИНПИС РОССИИ ПРЕДСТАВИЛ В ООН ДОКЛАД О ТОМ, КАК ДОБЫЧА И ТРАНСПОРТИРОВКА ИСКОПАЕМОГО ТОПЛИВА УГРОЖАЮТ РОССИЙСКОЙ ПРИРОДЕ И КОРЕННЫМ ЖИТЕЛЯМ	136-137	0
	КРАСНОЯРСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФОРУМ "БАЛТИКА"	138-140	0
	FORTUM WINS CONTRACT TO SUPPLY THE BIGGEST SOLAR ELECTRICITY SYSTEM IN NORDIC HISTORY	140	0
	<u>ПРОЕКТЫ ПО РАЗВИТИЮ ЭКОТУРИЗМА В РОССИИ СТАНОВЯТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНЫМИ ДЛЯ ИНВЕСТОРОВ</u>	141	0
	ISOVER ПОЛУЧИЛ НАИВЫСШУЮ ОЦЕНКУ ЗА ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОДУКЦИИ И ПРОИЗВОДСТВА - ECOMATERIAL ABSOLUT PLUS	142-143	0
	BASF ПРЕДСТАВИЛ НОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ВСЕМИРНОМ КОНГРЕССЕ В ДУБАЕ	143-144	0
	КОМПАНИЯ SCHNEIDER ELECTRIC СТАЛА УЧАСТНИКОМ НАЦИОНАЛЬНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО ФОРУМА 2018	144-145	0
	CROWN PRINCE ALEXANDER EASTER MESSAGE TO THE BELIEVERS WHO CELEBRATE 1 APRIL 2018	145	0
	XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-15-0-0 НОВОСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ.		
	НОВОСТИ	146-156	0



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

SOLAR POWER PLANTS

Статья поступила в редакцию 13.10.17. Ред. рег. № 1116-2234-1-RV The article has entered in publishing office 13.10.17. Ed. reg. No. 1116-2234-1-RV

УДК 620.91:658.26(571.56)

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЗОНЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)*

*И.Ю. Иванова¹, Д.Д. Ноговицын², Т.Ф. Тугузова¹,
З.М. Шеина², Л.П. Сергеева²*

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

д. 130, ул. Лермонтова, Иркутск, 664033, Россия

тел.: +7(3952)50-06-46 (доп. 345, 357); факс: (3952)42-67-96; e-mail: nord@isem.irk.ru , tuguzova@isem.irk.ru

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

д. 1, ул. Октябрьская, Якутск, 677891, Россия

тел.: +7(411-2)39-06-00; факс: +7(411-2) 33-66-65; e-mail: dmitry-nogovitzyn@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.012-022

Заключение совета рецензентов: 15.12.17 Заключение совета экспертов: 09.02.18 Принято к публикации: 01.03.18

В статье описаны особенности энергоснабжения децентрализованных потребителей северных районов Республики Саха (Якутия). Проведено зонирование территории по показателям суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность и годовой продолжительности солнечного сияния. Представлена ретроспектива строительства солнечных электростанций в децентрализованной зоне республики, которая, несмотря на северное расположение, является пионером в области солнечной энергетики. Описаны конструктивные отличия некоторых электростанций, позволяющие специалистам местного предприятия на основе экспериментальных данных обосновывать приоритетные решения для климатических условий республики. Приведен перечень населенных пунктов с указанием суммарной мощности солнечных электростанций по районам республики. Дана динамика суммарных показателей выработки электроэнергии, экономии дизельного топлива и денежных средств на его приобретение за период 2011–2016 гг. На основе анализа функционирования солнечной электростанции в п. Джаргалах, расположенном за Полярным кругом, сделан вывод о преимуществах использования в арктических условиях монокристаллических модулей по сравнению с тонкопленочными и поликристаллическими. Фактические данные выработки электроэнергии по месяцам года свидетельствуют о характерном ярко выраженном летнем максимуме и практически отсутствии выработки в зимний период. Проиллюстрирована динамика выработки электроэнергии за пятилетний период каждой из семи построенных до 2015 г. солнечных электростанций и экономии денежных средств за счет вытеснения топлива на дизельных электростанциях. Установлено, что существенные изменения выработки электроэнергии связаны только с вводом дополнительного оборудования, а снижение затрат обусловлено повышением цен на дизельное топливо. По фактическим данным стоимости проектов строительства и экономии средств определены сроки окупаемости семи солнечных электростанций, расположенных в разных районах республики. Выявлено отсутствие влияния широтного размещения на сроки окупаемости проектов – наиболее существенным фактором выступает цена дизельного топлива. В связи с этим, даже в арктических районах республики с полярной ночью в зимний период, срок окупаемости проектов сооружения солнечных электростанций сопоставим с расположенными значительно южнее и не превышает 10 лет.

* Иванова И.Ю., Ноговицын Д.Д., Тугузова Т.Ф., Шеина З.М., Сергеева Л.П. Анализ функционирования солнечных электростанций в децентрализованной зоне Республики Саха (Якутия) // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):12-22.

Ключевые слова: децентрализованное электроснабжение; гелиоэнергетический потенциал; солнечные электростанции; цена дизельного топлива; выработка электроэнергии; экономия средств; срок окупаемости.

AN ANALYSIS OF SOLAR POWER PLANTS OPERATION IN THE OFF-GRID AREA OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

I.Y. Ivanova¹, D.D. Nogovitsyn², T.F. Tuguzova¹, Z.M. Sheina², L.P. Sergeyeva²

¹Melentiev Energy Systems Institute, SB RAS

130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia

tel.: +7 (3952) 50 06 46 (ext. 345, 357); fax: (3952) 42 67 96, e-mail: nord@isem.irk.ru, tuguzova@isem.irk.ru

²Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS

1 Oktyabr'skaya St., Yakutsk, 677891, Russia

tel.: +7 (411-2) 39 06 00; fax: +7 (411-2) 33 66 65, e-mail: dmitry-nogovitsyn@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.012-022

Referred 15 December 2017 Received in revised form 9 February 2018 Accepted 1 March 2018

The paper describes the specific features of power supply to the off-grid consumers in the northern territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Territorial zoning is made by the indices of total solar radiation received on horizontal surface and annual sunshine duration. Retrospective data on the solar power plants construction are presented for the off-grid area of the Republic which despite its northern location is a pioneer in this field of energy. The design differences of some power plants are described. This allows the experts of the local company to substantiate the priority solutions for the climatic conditions of the Republic based on the experimental data. A list of the populated settlements is presented with indication of the total capacity of solar power plants by area of the Republic. The paper demonstrates the dynamics of the total indices of electricity generation, the saving of diesel fuel and cost for its purchase in 2011–2016. Based on the analysis of solar power plant operation in the settlement of Dzhargalakh located beyond the Polar circle, we make a conclusion on the advantages of monocrystalline modules for the arctic conditions compared to the thin-film and polycrystalline ones. Actual data on electricity generation by month of the year are indicative of its typical pronounced summer maximum and virtual absence in winter. The paper shows the dynamics of electricity generation for a five-year period for each of the seven solar power plants constructed before 2015, and cost saving by fuel substitution at diesel power plants. Considerable changes in electricity generation are connected only with additional equipment to be placed into service. Increase in the cost saving is caused by growth of diesel fuel price. Actual data on the cost of the construction projects and cost saving are used to determine payback periods for seven solar power plants located in different areas of the Republic. Research has revealed that the latitudinal location does not affect payback periods of the projects while the diesel fuel price is the most decisive factor. In this context, even in the arctic areas of the Republic with winter polar night period, the payback period of the projects for construction of solar power plants is comparable with the power plants located in much more southerly areas and does not exceed 10 years.

Keywords: off-grid power supply; solar power potential; solar power plants; diesel fuel price; electricity generation; cost cutting; payback period.



Ирина Юрьевна
Иванова
Irina Ivanova

Сведения об авторе: канд. экон. наук, зав. лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей, Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН.

Награды: Лауреат областного конкурса в сфере науки и техники.

Образование: Иркутский политехнический институт, кибернетический факультет по специальности «Автоматизированные системы управления» и «Большие системы энергетики» (1981 г.).

Область научных интересов: малая энергетика; формирование политики энергоснабжения потребителей северных и удаленных территорий; моделирование финансово-экономической деятельности автономных энергоисточников.

Публикации: более 120, в том числе глав и разделов в 20 коллективных монографиях.

h-index 10; SPIN 6445-7531

Information about the author: Ph.D. in Economics, Head of the Laboratory of Energy Supply to off-grid Consumers, Melentiev Energy Systems Institute (ESI) SB RAS.

Awards: the winner of the regional competition in the field of science and technology.

Education: Cybernetic Faculty of the Irkutsk Polytechnic Institute with two specialisations: Computer-aided Management and Large Energy Systems, 1981.

Research interests: small-scale energy; the policy of energy supply to consumers in the northern and remote areas; modeling of financial and economic activities of autonomous energy sources.

Publications: more than 120 including chapters and sections in 20 collective monographs.



Дмитрий Дмитриевич
Ноговицын
Dmitry Nogovitsyn

Сведения об авторе: канд. географ. наук, профессор РАЕ, ведущий научный сотрудник отдела проблем энергетике, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова (ИФТПС) СО РАН; член научно-технического Совета Министерства охраны природы РС(Я), научно-технического Совета Ленского бассейнового управления РФ по РС(Я), федеральных экспертов в научно-технической сфере.

Образование: Новосибирский институт инженеров водного транспорта по специальности «Строительство водных путей и портов» (1959 г.).

Область научных интересов: основы и механизмы реализации экологических аспектов устойчивого развития энергетики Крайнего Севера России; оценка воздействия энергетических объектов на состояние окружающей среды.

Публикации: более 200.
h-index 5; SPIN 5662-3883

Information about the author: Ph.D. in Geography, Professor RAE, Senior Researcher at the Department of Energy, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS; Member of the Scientific and Technical Council of the Ministry of Nature Protection of the Sakha Republic and the Federal Experts in scientific and technical sphere.

Education: Novosibirsk Institute of Water Transport Engineers with a degree in Construction of Waterways and Ports, 1959.

Research interests: the framework and mechanisms for the implementation of environmental aspects of sustainable energy development of the Russian Far North; the assessment of the impact of energy facilities on the environment.

Publications: more than 200.



Татьяна Федоровна
Тугузова
Tatiana Tuguzova

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей, Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН.

Образование: Иркутский политехнический институт по специальности «Промышленная теплоэнергетика» (1975 г.).

Область научных интересов: обоснование применения возобновляемых источников энергии для энергоснабжения децентрализованных потребителей, моделирование их совместного функционирования с энергоисточниками на органическом топливе.

Публикации: более 120, в том числе глав и разделов в 18 коллективных монографиях.
h-index 11; SPIN 6235-4882

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher of the Laboratory of Energy Supply to off-grid Consumers, Melentiev Energy Systems Institute (ESI) SB RAS.

Education: Irkutsk Polytechnic Institute with a degree in Industrial Heat Power Engineering, 1975.

Research interests: feasibility study on the application of renewable energy sources to supply energy to off-grid consumers, modeling of their joint operation with fossil energy sources.

Publications: more than 120 including chapters and sections in 18 collective monographs.



Зинаида Макаровна
Шейна
Zinaida Sheina

Сведения об авторе: научный сотрудник отдела проблем энергетике, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова (ИФТПС) СО РАН.

Образование: Якутский государственный университет по специальности «География» (1987 г.).

Область научных интересов: охрана окружающей среды; гидрология; водные ресурсы; ветроэнергетические установки; региональная экология.

Публикации: более 80.
h-index 3; SPIN 5662-3883

Information about the author: Researcher at the Department of Energy V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS.

Education: Yakutsk State University with a degree in Geography, 1987.

Research interests: environmental protection; hydrology; water resources; wind power plant; regional environment.

Publications: more than 80.



Людмила
Прокопьевна Сергеева
Lyudmila Sergeeva

Сведения об авторе: младший научный сотрудник отдела проблем энергетике, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова (ИФТПС) СО РАН.

Образование: Якутский государственный университет по специальности «География» (1987 г.).

Область научных интересов: охрана окружающей среды; гидрология; водные ресурсы; ветроэнергетические установки; региональная экология.

Публикации: более 50.
h-index 3; SPIN 5662-3883

Information about the author: Junior Researcher at the Department of Energy V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS.

Education: Yakutsk State University with a degree in Geography, 1987.

Research interests: environmental protection; hydrology; water resources; wind power plant; regional environment.

Publications: more than 50.



1. Введение

Республика Саха (Якутия) является самым крупным субъектом Российской Федерации: общая площадь континентальной и островной части составляет 3,1 млн км², и почти вся эта территория расположена в зоне вечной мерзлоты с суровым резкоконтинентальным климатом. При этом значительная часть территории Республики Саха находится вне зоны централизованного электроснабжения: в основном это северные улусы, где электроэнергией потребители обеспечиваются от многочисленных (137 шт.) дизельных электростанций (ДЭС) АО «Сахаэнерго» суммарной установленной мощностью 190 МВт [1]. Значительная часть генерирующего оборудования ДЭС находится в неудовлетворительном состоянии: на 2016 г. более 40 % от общего количества физически и морально устарело [1].

В связи с удаленностью и труднодоступностью децентрализованных потребителей и слабым развитием транспортной инфраструктуры особо остро стоят проблемы снабжения энергоисточников топливом, которые приводят к высокой стоимости топлива и, значит, себестоимости производства электроэнергии. У наиболее удаленных электростанций транспортная составляющая стоимости топлива достигает 70 ÷ 80 %, а средние показатели себестоимости производства электроэнергии составляют 30 ÷ 50 руб./кВт·ч. Ввиду необходимости ограничения роста тарифов для населения не выше установленных нормативов, за счет перекрестного субсидирования выделяются значительные дотации на выравнивание тарифов и содержание энергоисточников. Так, в 2016 г. объем перекрестного субсидирования дизельной энергетики в республике оценивался в 6,8 млрд руб. [2]. Применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечных электростанций (СЭС), позволяет значительно снизить объем потребления дизельного топлива и, соответственно, дотации на выравнивание тарифов для потребителей.

Следует отметить, что динамика тенденций роста установленной мощности солнечной фотоэлектрики в мире свидетельствует о высоких темпах развития: с 2010 г. по 2015 г. суммарная мощность СЭС возросла с 40 ГВт до 227 ГВт [3, 4]. В то же время за этот

период наблюдалась противоположная динамика стоимости фотоэлектрических преобразователей – снижение практически в три раза, что обусловлено значительным падением цены на кремний (с 2008 г. по 2012 г. более чем в 10 раз) [4].

Основным направлением развития фотоэлектрики в мире, наряду с увеличением КПД, является наращивание мощности станции, например, установленная мощность крупнейших солнечных электростанций в Калифорнии превышает 500 МВт. В России до последнего времени эта отрасль энергетики практически не развивалась. По состоянию на 2016 г. суммарная мощность российских СЭС составляла 536 МВт, из них СЭС суммарной мощностью 407 МВт (Форма Росстата «Электробаланс» за 2016 г.) функционировали на территории Республики Крым, где использованию гелиопотенциала для энергоснабжения давно уделяется большое внимание [5]. Оставшиеся 129 МВт введены за последние три года, в основном в Поволжье и Республике Алтай. Преобладающая часть мощности СЭС и в мире, и в России сосредоточена в зоне централизованного электроснабжения.

Мировые тенденции свидетельствуют об обширном использовании солнечной энергии и для энергоснабжения удаленных и изолированных от энергосистем потребителей. Это направление фотоэлектрики особенно развито в Индии [6], Африке [7], Австралии [8], арабских странах [9], хотя подобные электростанции довольно эффективно эксплуатируются и в более высоких широтах: в Европе, Канаде, на Аляске [10–12].

Вопросы целесообразности эксплуатации солнечных электростанций для энергоснабжения удаленных потребителей северных территорий России широко освещены в работах многих исследователей [13–17]. Первые экспериментальные проекты сооружения СЭС в дополнение к ДЭС на территории России были реализованы на территории Республики Саха (Якутия) еще в 2011 г.

Целью данного исследования являлась оценка окупаемости проектов солнечных электростанций на территории республики исходя из анализа фактических данных стоимости их строительства и выработки электроэнергии.

Список обозначений

Аббревиатуры

ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ДЭС	Дизельная электростанция
КПД	Коэффициент полезного действия
пгт	Посёлок городского типа
СЭС	Солнечная электростанция

2. Теоретический анализ гелиоэнергетического потенциала

Несмотря на то, что 52 % территории республики относится к арктическим и северным районам с климатом, отличающимся продолжительным зимним и

коротким летним периодами, по количеству солнечных дней в году она занимает лидирующее место среди северных регионов страны. Практически на всей территории республики продолжительность солнечного сияния составляет более 2 тыс. часов в год, а в локальных районах превышает 2,1 ÷ 2,3 тыс. часов.

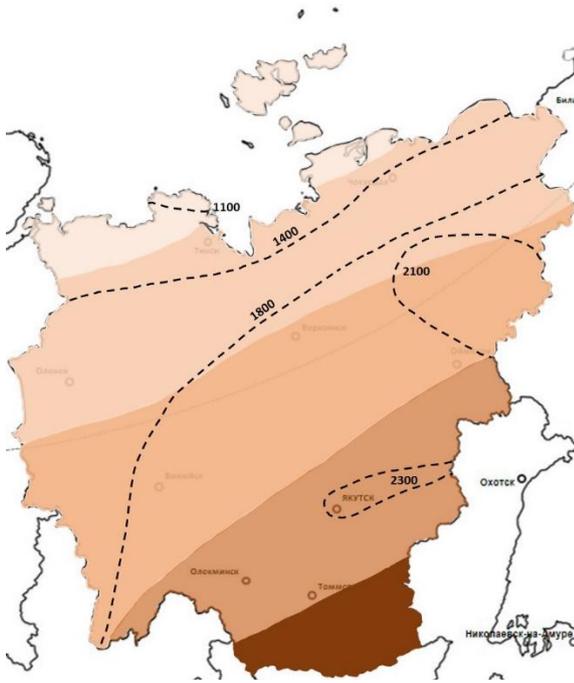


Рис. 1 – Зонирование территории Республики Саха (Якутия) по показателям гелиопотенциала: среднегодовой приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м²:

< 800, 800–900, 900–1 000, 1000–1100, > 1100;

----- годовая продолжительность солнечного сияния, ч/год

Fig. 1 – Zoning of the territory of Republic of Sakha (Yakutia) by solar potential indices: annual average incoming solar radiation on horizontal surface, kWh/m²:

< 800, 800–900, 900–1100, 1000–1100, > 1100;

----- annual sunshine duration, h/year

Валовой гелиопотенциал составляет 357 млрд т у.т., что немногим меньше половины этого показателя всего Дальневосточного федерального округа, технический потенциал оценивается в 736 млн т у.т., или 0,2 % от валового [18–20]. Годовой приход сумм-

марной солнечной радиации на горизонтальную поверхность даже для арктических территорий, расположенных за Северным полярным кругом (66°33'), – более 800 кВт·ч/м², и только на самом побережье Северного Ледовитого океана, севернее 72 параллели, его значения невелики (рис. 1) [21–24].

Кроме того, республика является одним из немногих субъектов РФ, где имеется законодательная база возобновляемой энергетики – Закон «О возобновляемых источниках энергии Республики Саха (Якутия)» от 27.11.2014. [25], основная цель которого заключается в создании правовых, экономических и организационных основ и механизмов стимулирования использования возобновляемых источников энергии, формировании и введении в действие финансово-экономических механизмов в этой сфере, а также в привлечении инвестиций в проекты возобновляемых источников энергии.

Все эти факторы создают условия для развития в регионе возобновляемой и, в первую очередь, солнечной энергетики. Результаты работы авторов по оценке экономической эффективности использования гелиопотенциала для энергоснабжения потребителей арктических районов республики с описанием опыта эксплуатации первой республиканской СЭС в п. Батамай приведены в [26].

3. Ретроспектива строительства солнечных электростанций

Республику Саха (Якутию) по праву можно считать пионером в развитии автономной солнечной энергетики в России (в этом заслуга АО «РАО ЭС Востока» ПАО «РусГидро» и эксплуатирующей организации АО «Сахаэнерго»). В настоящее время в разных районах республики функционирует 20 возобновляемых энергоисточников суммарной установленной мощностью 1 651 кВт, из них: 19 СЭС (1 611 кВт) и 1 ветроэлектростанция (40 кВт). Данные по установленной мощности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Установленная мощность солнечных электростанций по районам республики (состояние 2017 г.) [27, 28]

Table 1

Installed capacity of the solar power plants by area of the Republic (as of 2017) [27, 28]

Улус	Населенный пункт	Суммарная установленная мощность, кВт
Алданский	Верхняя Амга, Улуу	56
Абыйский	Кубергана	20
Верхоянский	Дулгалах, Батагай, Бетенкес, Юнкюр, Столбы	1 110
Жиганский	Кыстатыам	40
Кобяйский	Батамай, Себян-Кюель	110
Оймяконский	Ючюгей, Орго-Балаган	80
Олекминский	Куду-Кюель, Иннях, Дельгей	120
Оленекский	Эйик	40
Хангаласский	Тойон-Ары	20
Эвено-Бытантайский	Джаргалах	15
Всего		1 611

В 2015 г. СЭС в с. Ючюгей, построенная в 2012 г., была расширена с 20 кВт до 30 кВт. Ранее установленные фотоэлектрические панели были смонтированы на неподвижных платформах. Дополнительные панели установлены на двух экспериментальных поворотных конструкциях – трекарах, позволяющих осуществлять слежение за солнцем [27–29].

В том же году в пгт Батагай была построена первая в мире крупная СЭС (1 МВт) за полярным кругом, которая впоследствии была внесена в Книгу рекордов Гиннеса. Одновременно строились еще три солнечных электростанции, расположенные относительно близко от Батагайской – в с. Бетенкес и с. Юнкюр по 40 кВт и в с. Столбы (10 кВт). Благодаря одновременной поставке оборудования для всех

станций транспортные расходы были существенно снижены.

Наиболее интенсивный ввод солнечных электростанций суммарной мощностью 1,3 МВт осуществлялся в период 2015–2016 гг. Выработка электроэнергии СЭС за весь период их функционирования составила 1,3 млн кВт·ч, что позволило за счет вытеснения дизельного топлива сэкономить более 20 млн руб. (табл. 2).

В 2017 г. АО «Сахаэнерго» ввело в эксплуатацию еще 3 СЭС: две мощностью по 50 кВт в поселках Себян-Кюель Кобяйского улуса и Орто-Балаган Оймяконского улуса, панели которых имеют механизм корректировки угла наклона, и 40 кВт в п. Кыстатыам Жиганского улуса [27].

Динамика показателей функционирования солнечных электростанций республики [27, 28]

Таблица 2

Table 2

Dynamics of solar power plant performance indices [28, 28]

Показатель	Год						Итого за период
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Выработка СЭС, тыс. кВт·ч	2,7	26,8	77,4	96,7	179,6	950,8	1 334
Экономия дизельного топлива, т	0,9	8,6	25,1	31,3	55,4	270,9	392,2
Экономия средств, тыс. руб.	26,7	310	1 070	1 337	2 653	14 814	20 211

4. Результаты анализа функционирования солнечных электростанций и их обсуждение

По имеющимся фактическим показателям эксплуатации 7 солнечных электростанций, построенных до 2015 г., был проведен анализ эффективности их функционирования и рассмотрены факторы,

влияющие на эти показатели. На рис. 2 представлено изменение показателей выработки электроэнергии и снижение денежных затрат за счет вытеснения топлива за период с 2012 г. по 2016 г. Следует отметить, что показатели солнечных электростанций рассматривались начиная с полного года их функционирования.

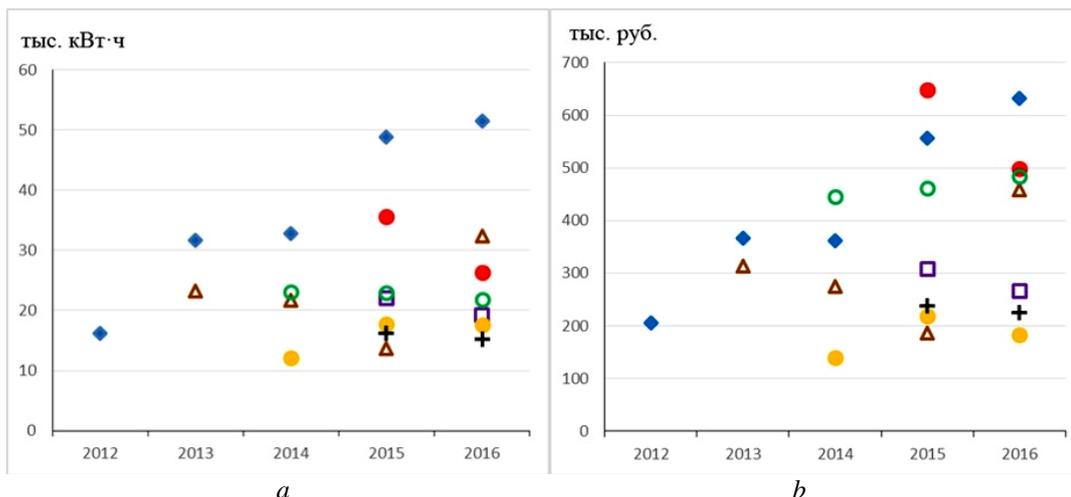


Рис. 2 – Изменение показателей функционирования солнечных электростанций в населенных пунктах [27, 28]:

a – выработка электроэнергии; b – экономия средств; ◆ Батамай (60 кВт); ▲ Ючюгей (30 кВт), ● Куду-Кюель (20 кВт); ● Дулгалах (20 кВт); ● Эйик (40 кВт); ■ Кубергания (20 кВт); + Джаргалах (15 кВт)

Fig. 2 – Variation in the performance indices of solar power plants in populated areas [26, 27]:

a – electricity generation; b – cost saving; ◆ Batamay (60 kW); ▲ Yuchyugey (30 kW); ● Kudu Kyuel (20 kW); ● Dulgalakh (20 kW); ● Aieek (40 kW); ■ Kuberganya (20 kW); + Dzhargalakh (15 kW)

Анализ данных об экономии денежных средств показывает, что они в большей степени повторяют тенденцию выработки электроэнергии – изменение цены топлива за рассматриваемый период не оказывает существенного влияния. Значительный рост выработки СЭС в пгт Батамай связан с последовательным увеличением установленной мощности (10 кВт + 20 кВт + 30 кВт), а в с. Ючюгей, кроме увеличения мощности (на 10 кВт), – с установкой трекеров. Особенно наглядно преимущество трекеров проявилось в 2016 г., когда выработка электроэнергии СЭС по сравнению с 2015 г. во всех рассмотренных пунктах снизилась, а в п. Ючюгей за счет слежения за солнцем части фотоэлектрических преобразователей – существенно возросла даже в сравнении с СЭС в с. Батамай, где мощность увеличилась на 30 кВт.

Следует отметить, что выработка электроэнергии солнечными электростанциями республики в течение года имеет ярко выраженный весенний максимум с практически нулевыми значениями в зимний период независимо от широты местности (рис. 3).

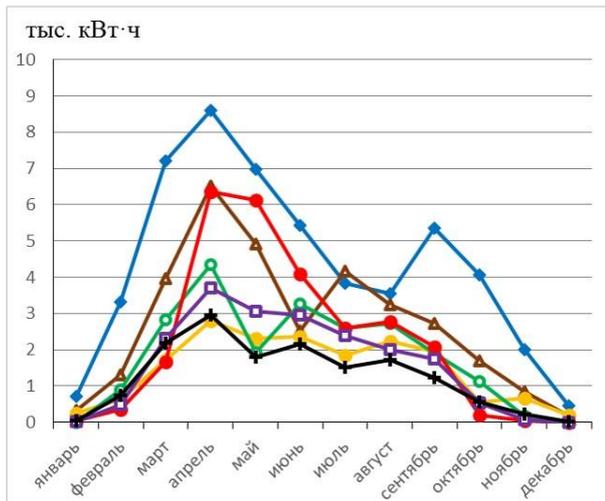


Рис. 3 – Выработка электроэнергии в 2016 г. солнечными электростанциями в населенных пунктах:

- ◆ Батамай (60 кВт); ▲ Ючюгей (30 кВт);
 - Куду-Кюель (20 кВт); ● Дулгалах (20 кВт);
 - Эйик (40 кВт); ■ Куберганя (20 кВт); + Джаргалах (15 кВт)
- Fig. 3** – Electricity generation in 2016 by solar power plants in populated areas: ◆ Batamay (60 kW); ▲ Yuchyugey (30 kW); ● Kudu Kyuel (20 kW); ● Dulgalakh (20 kW); ● Aieek (40 kW); ■ Kuberganya (20 kW); + Dzhangalakh (15 kW)

Кроме установленной мощности модулей, на выработку оказывает влияние тип этих модулей. На рис. 4 показан годовой график выработки электроэнергии разными типами модулей одинаковой мощности по 5 кВт, установленными на солнечной электростанции в п. Джаргалах. Выработка электроэнергии в 2015 г. составила 5,0 тыс. кВт·ч, 5,3 тыс. кВт·ч и 5,7 тыс. кВт·ч для тонкопленочных, поликристаллических и монокристаллических модулей соответ-

ственно. Анализ данных свидетельствует о большей производительности монокристаллических модулей, причем значительные различия наблюдаются в весенне-летний период.

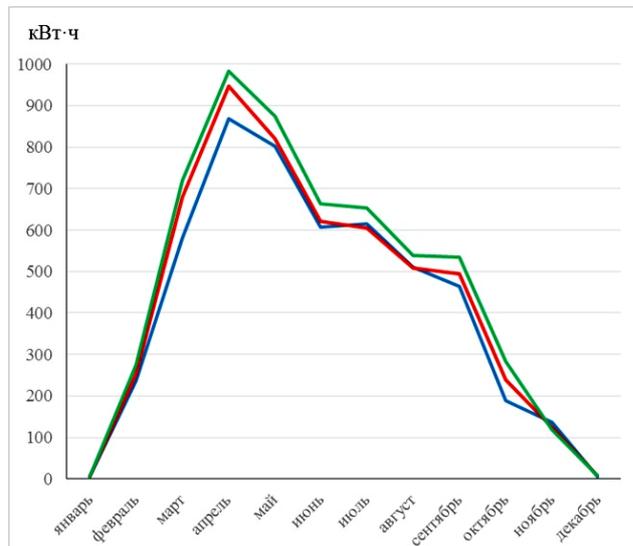


Рис. 4 – Выработка электроэнергии в п. Джаргалах солнечными модулями различного типа:

- тонкопленочные
 - поликристаллические;
 - монокристаллические
- Fig. 4** – Electricity generation in the settlement of Dzhangalakh by solar modules of different types: — thin film (amorphous); — polycrystalline; — monocrystalline

Расчетные сроки окупаемости СЭС определялись по показателям выработки электроэнергии и цене дизельного топлива за год эксплуатации (2016 г.).

Практически для всех СЭС срок окупаемости составил около 10 лет, причём даже для тех, которые расположены за Полярным кругом: Дулгалах, Джаргалах, Куберганя. Высокие сроки окупаемости для СЭС в поселках Батамай и Ючюгей связаны с последовательным расширением станций и установкой дополнительного оборудования (накопители, трекеры) (рис. 5).

Проведенный анализ показал, что широтное расположение СЭС не оказывает влияния на сроки окупаемости их сооружения и эксплуатации. Вместе с тем прослеживается зависимость этого показателя от цены дизельного топлива. Так, в с. Куду-Кюель сумма удельных капиталовложений является одной из самых низких для рассматриваемых СЭС, и поскольку станция расположена южнее прочих, а значения солнечной радиации одни из лучших, срок окупаемости строительства должен быть небольшим. Но в связи с тем, что цена дизельного топлива в этом пункте также является самой низкой, срок окупаемости СЭС сопоставим с арктическими станциями.

На окупаемость проектов значительно влияет состав оборудования: с одной стороны, удорожание за счет установки трекеров увеличивает срок окупаемости, с другой – повышение выработки электроэнер-



гии и, следовательно, объема вытесненного топлива приводит к его снижению. Поскольку время эксплуатации СЭС, на которых установлено дополнительное оборудование, незначительно, оценить его преимущество на данном этапе достаточно сложно.

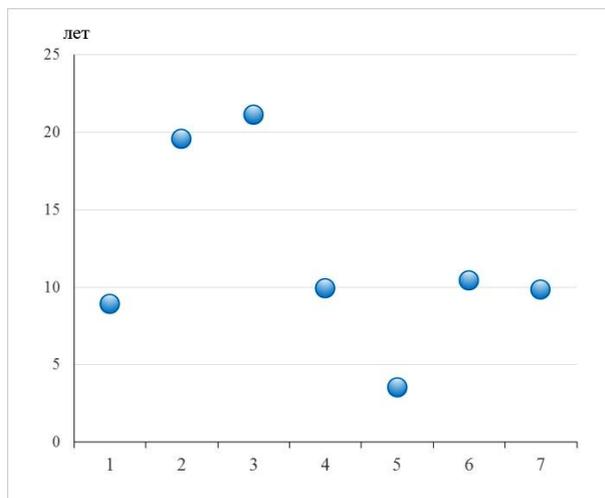


Рис. 5 – Расчетные сроки окупаемости солнечных электростанций, построенных до 2015 г., в населенных пунктах: 1 – Куду-Кюель (59°26' с.ш.); 2 – Ючюгей (63°18' с.ш.); 3 – Батамай (63°31' с.ш.); 4 – Эйик (66°20' с.ш.); 5 – Дулгалах (67°12' с.ш.); 6 – Джаргалах (67°16' с.ш.); 7 – Куберганя (67°46' с.ш.)

Fig. 5 – Calculated payback periods of solar power plants, constructed before 2015, in populated areas: 1 – Kudu-Kyuel (59°26' N); 2 – Yuchyugey (63°18' N); 3 – Batamay (63°31' N); 4 – Aieek (66°20' N); 5 – Dulgalakh (67°12' N); 6 – Dzhangalakh (67°16' N); 7 – Kuberganya (67°46' N)

В перспективе планируется дальнейшее активное развитие возобновляемой энергетики республики [29–31]. По данным утвержденной «Программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности АО «Сахаэнерго» на 2017–2021 годы», за этот период намечается ввести в эксплуатацию более 800 кВт солнечных электростанций и около 2 МВт ветроэлектростанций, в том числе 900 кВт в п. Тикси.

5. Заключение

Значительная часть территории Республики Саха (Якутии) находится в зоне децентрализованного электроснабжения, где основные проблемы связаны с дальностью, труднодоступностью и сезонностью транспорта дорогостоящего топлива для многочисленных дизельных электростанций. Особенно остро эти проблемы проявляются в северных и арктических районах.

Вместе с тем эта территория обладает большим гелиопотенциалом для энергетики. В республике имеется законодательная база, которая способствует развитию возобновляемой энергетики, пока в основном солнечной.

В настоящее время в республике функционирует 19 автономных солнечных электростанций суммарной мощностью 1 611 кВт, в том числе, самая крупная в мире из расположенных за Полярным кругом СЭС мощностью 1 МВт в п. Батагай.

Анализ функционирования солнечных электростанций в республике показал, что сроки окупаемости не зависят от широтного расположения станций и составляют в среднем около 10 лет. При этом установка дополнительного оборудования, позволяющего повысить выработку электроэнергии, существенно увеличивает капиталоемкость проекта, что сказывается на сроках окупаемости. Однако небольшой период наблюдений не дает возможности однозначно утверждать, насколько удорожание компенсируется увеличением выработки электроэнергии в последующие годы.

Приведенные фактические показатели и их анализ позволяют сделать вывод о положительном опыте эксплуатации солнечных электростанций для децентрализованных потребителей в республике, даже в самых высоких широтах, и наличии предпосылок к дальнейшему расширению использования гелиопотенциала в энергетике.

Благодарности

Авторы выражают признательность специалистам АО «Сахаэнерго» за предоставление фактических данных для исследования и научному сотруднику ИСЭМ СО РАН Н.А. Халгаевой за составление карты зонирования.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the specialists of JSC “Sakhaenergo” for providing evidence for the study and a researcher at ESI SB RAS N.A. Khalgaeva for compiling a zoning map.

Список литературы

- [1] Годовые отчеты АО «Сахаэнерго» за 2011–2016 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sakhaenergo.ru/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=0&Itemid=33. – (Дата обращения: 29.09.2017).
- [2] Башмаков, И.А. Анализ финансовой нагрузки на регионы с дорогостоящим децентрализованным энергоснабжением [Текст] / И.А. Башмаков, М.Г. Дзедзичек // Энергосовет. – 2017. – № 47. – С. 7–16.
- [3] Состояние возобновляемой энергетики глобальной 2016. Глобальный отчет. [Текст] – Париж: Секретариат REN 21, 2016. – 31 с.
- [4] Елистратов, В.В. Современное состояние и тренды развития ВИЭ в мире [Текст] / В.В. Елистратов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 1–3. – С. 84–100.
- [5] Горбунова, Т.Ю. Изученность солнечного энергетического потенциала Крымского полуострова [Текст] / Т.Ю. Горбунова, Р.В. Горбунов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 1–3. – С. 84–100.

ка и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 7–9. – С. 12–20. DOI:10.15518/isjaee.2017.07-09.012-020.

[6] Sujit Kumar Jha. Cost optimization of a solar PV system for a remote village in India [Text] / Sujit Kumar Jha // International Journal of Renewable Energy Resources. – 2016. – No. 6. – P. 1–8.

[7] PV Injection in Isolated diesel Grids. Feasibility Considerations / International Energy Agency. – 2007. – 12 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=368&eID> – (Дата обращения: 29.04.2018).

[8] Chem Nayar. Solar power plants for residential, commercial, utility and off-grid applications [Text] / Chem Nayar // Proceeding International Conference 2014 Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy, Bangalore 13–15 March. – 2014. – P. 342–358.

[9] Diesel to Solar Transformation [Text] // Accelerating Achievement of SDG 7 on Sustainable Energy Assessing Untapped Solar Potential in Existing Off-grid Systems in the Arab Region. – Egypt: Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency. – 2016. – 48 p.

[10] Pavlović, T. Determining of energy efficiency of PV solar power plant at the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš [Text] / T. Pavlović [et al.] // Renewable Energy Sources. – 2013. – Vol. IV–2. – P. 112–116.

[11] Сайт Canadian Solar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.canadiansolar.com/making-the-difference/remote-communities-gain-access-to-real-power.html>. (Дата обращения: 29.04.2018).

[12] Cherniak, D. [et al]. Report on the State of Alternative Energy in the Arctic [Электронный ресурс]. – Canada: Ottawa, Carleton University. – 2015. – 208 p. – Режим доступа: https://curve.carleton.ca/system/files/faculty_staff_research_publication/08515c6b-3b39-4c41-ad7b-2c6306cf0379/fac_staff_res_pub_pdf/d9833b6ff19ff098e44032a87026605f/cherniak-et-al-alternativeenergyarctic.pdf – (Дата обращения: 11.05.2018 г.).

[13] Бодрова, Е.С. Сравнительный анализ эксплуатации солнечных модулей в арктическом климате России и Канады [Текст] / Е.С. Бодрова [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 28–30. – С. 12–24. DOI:10.15518/isjaee.2017.28-30.012-024

[14] Шуткин, О.И. Оценка конкурентоспособности солнечной генерации в электроэнергетике России [Текст] / О.И. Шуткин // Энергетическая политика. – 2014. – Вып. 1. – С. 67–76.

[15] Коновалова, О.Е. Малая возобновляемая энергетика на северо-западе Арктики [Текст] / О.Е.

Коновалова, Г.В. Никифорова // Труды Кольского научного центра. – 2016. – № 1–2 (35). – С. 117–131.

[16] Сурков, М.А. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации [Текст] / М.А. Сурков [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8. – № 4. – С. 1–13.

[17] Применение альтернативной энергетики в Арктике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pro-arctic.ru/04/07/2017/resources/27131>. (Дата обращения: 11.05.2018).

[18] Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 160 с.

[19] Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива. / Показатели по территориям. – М.: «ИИАЦ Энергия», 2007. – 272 с.

[20] Моргунова, М.О. Энергоснабжение Российской Арктики: углеводороды или ВИЭ [Текст] / М.О. Моргунова, Д. А. Соловьев // Энергетическая политика. – 2016. – Вып. 5. – С. 44–51.

[21] Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель и др. – М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2010. – 81 с.

[22] Справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – 96 с.

[23] Попель, О.С. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в арктической зоне Российской Федерации [Текст] / О.С. Попель [и др.] // Арктика, экология и экономика. – 2015. – № 1 (17). – С. 64–69.

[24] Габдрахманова, Т.С. Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в арктической зоне РФ [Текст] / Т.С. Габдрахманова [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № (19–20). – С. 41–53.

[25] Закон «О возобновляемых источниках энергии Республики Саха (Якутия)» от 27.11.2014 г. № 313-V (с изменениями на 28.02.2017) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/445029370> – (Дата обращения: 25.09.2017).

[26] Иванова, И.Ю. Обоснование целесообразности использования гелиоустановок в Верхоянском районе республики Саха (Якутия) [Текст] / И.Ю.



Иванова [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 6. – С. 34–39.

[27] Корякин, А.К. Опыт эксплуатации систем солнечной генерации в условиях Крайнего Севера // Материалы V международной конференции «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России. – Якутск. – 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eastrenewable.ru/upload/iblock/d5a/4_%D0%9A%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf. – (Дата обращения: 27.09.2017).

[28] Материалы Международной конференции «Развитие возобновляемой энергетики на Дальнем Востоке». – Якутск. – 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eastrenewable.ru>. – (Дата обращения: 27.09.2017).

[29] Бердин, В.Х. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики [Текст] / В.Х. Бердин [и др.]. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 80 с. ISBN 978-5-906599-35-3.

[30] Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года [Текст] / Правительство Республики Саха (Якутия). – Якутск, Иркутск: Медиа-холдинг «Якутия», и др.: 2010. – 328 с.

[31] Соловьев, Д.А. Адаптация энергетической инфраструктуры в Арктике к климатическим изменениям с использованием возобновляемых источников энергии [Текст] / Д.А. Соловьев, М.О. Моргунова, Т.С. Габдерахманова // Энергетическая политика. – 2017. – Вып. 4. – С. 72–80.

References

[1] Annual reports of JSC “Sakhaenergo” for 2011–2016. (Godovye otchety AO “Sahaenergo” za 2011–2016 gg.). Available on:

http://sakhaenergo.ru/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=0&Itemid=33. [29.09.2017] (in Russ.).

[2] Bashmakov I.A., Dzedzich M.G. Analysis of financial burden on regions with expensive decentralized energy supply (Analiz finansovoj nagruzki na regiony s dorogostoyashchim decentralizovannym ehnergosnabzheniem). *Energosovet*, 2017;47:7–16 (in Russ.).

[3] The Renewables 2016 Global Status Report. (Sostoyanie vozobnovlyaej ehnergetiki global'noj 2016. Global'nyj otchet). Paris: Secretariat REN, 2016;21:31 (in Russ.).

[4] Elistratov V.V. Current state and trends of renewable energy development in the world (Sovremennoe sostoyanie i trendy razvitiya VIEH v mire). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;1–3:84–100 (in Russ.).

[5] Gorbunova T.Yu., Gorbunov R.V. The study of the solar energy potential of the Crimean peninsula, (Izuchennost' solnechnogo ehnergeticheskogo potenciala Krymskogo poluostrova). *International Scientific Jour-*

nal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE), 2017;7–9:12–20 (in Russ.).

[6] Sujit Kumar Jha Cost optimization of a solar PV system for a remote village in India. *International Journal of Renewable Energy Resources*, 2016;6:1–8.

[7] PV Injection in Isolated diesel Grids. Feasibility Considerations. *International Energy Agency*, 2007:12. Available on: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=368&eID> [29.04.2018].

[8] Chem Nayar Solar power plants for residential, commercial, utility and off-grid applications. *Proceeding International Conference 2014 Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy, Bangalore 13-15 March*. 2014, pp. 342–358.

[9] Diesel to Solar Transformation. *Accelerating Achievement of SDG 7 on Sustainable Energy Assessing Untapped Solar Potential in Existing Off-grid Systems in the Arab Region. – Egypt: Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency*, 2016, p. 48.

[10] Pavlović T., et al. Determining of energy efficiency of PV solar power plant at the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš. *Renewable Energy Sources*, 2013;IV–2:112–116.

[11] Canadian Solar. Available on: <https://www.canadiansolar.com/making-the-difference/remote-communities-gain-access-to-real-power.html> [accessed 29.04.2018].

[12] Report on the State of Alternative Energy in the Arctic. Canada: Ottawa, Carleton University, 2015, p. 208. Available on:

https://curve.carleton.ca/system/files/faculty_staff_research_publication/08515c6b-3b39-4c41-ad7b-2c6306cf0379/fac_staff_res_pub_pdf/d9833b6ff19ff098e44032a87026605f/cherniak-et-al-alternativeenergyarctic.pdf / [11.05.2018].

[13] Bodrova E.S., Dolgosheev V.V., Kirpichnikova I.M., Korobatov D.V., Martyanov A.S., Sirotkin E.A., Solomin E.E. Comparative analysis of solar modules operation in the Arctic climate of Russia and Canada (Sravnitel'nyj analiz ehkspluatatsii solnechnyh modulej v arkticheskom klimate Rossii i Kanady). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;28–30:12–24 (in Russ.).

[14] Shutkin O.I. Evaluation of the competitiveness of solar generation in the Russian electric power industry (Ocenka konkurentosposobnosti solnechnoj generatsii v ehlektroehnergetike Rossii). *Energy Policy*, 2014;1:67–76 (in Russ.).

[15] Konovalova O.E., Nikiforova G.V. Small-scale renewable energy in the northwest of the Arctic (Malaya vozobnovlyaej ehnergetika na severo-zapade Arktiki). *Proceedings of the Kola Science Center*, 2016;1–2(35):117–131 (in Russ.).



[16] Surkov M.A., et al. Evaluation of economic viability of photovoltaic installations for power supply to remote consumers in the climatic conditions of the North of the Russian Federation (Ocenka celesoobraznosti primeneniya fotoelektricheskikh ustanovok dlya ehlektrosnabzheniya udalennykh potrebitelej v klimaticheskikh usloviyah Severa Rossijskoj Federacii). *Internet-journal "Naukovedenie"*, 2016;8.4:1–13 (in Russ.).

[17] Application of alternative energy in the Arctic (Primenenie al'ternativnoj ehnergetiki v Arktike). Available on: <http://pro-arctic.ru/04/07/2017/resources/27131> [11.05.2018] (in Russ.).

[18] Atlas of Renewable Energy Resources in Russia: Sci. edition (Atlas resursov vozobnovlyaemoy ehnergii na territorii Rossii: nauch. Izdanie). *Moscow Mendeleev RCTU*, 2015, p. 160 (in Russ.).

[19] Handbook on renewable energy resources of Russia and local fuel types. Indicators by territory (Spravochnik po resursam vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii Rossii i mestnym vidam topliva. Pokazateli po territoriyam). Moscow: "IAC Energia" Publ., 2007, p. 272 (in Russ.).

[20] Morgunova M.O., Soloviev, D.A. Energy supply of the Russian Arctic: hydrocarbons or renewables (Energosnabzhenie Rossijskoj Arktiki: uglevodorody ili VIEH). *Energy Policy*, 2016;5:44–51 (in Russ.).

[21] Popel O.S., et al. Atlas of solar energy resources in Russia (Atlas resursov solnechnoj ehnergii na territorii Rossii). Moscow: Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 2010, p. 81 (in Russ.).

[22] Reference book on the climate of the USSR. Issue. 24. The Yakut ASSR. Part 1. Solar radiation, radiation balance and sunshine (Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 24. YAkutskaya ASSR. CH. 1. Solnechnaya radiaciya, radiacionnyj balans i solnechnoe siyanie). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967, p. 96 (in Russ.).

[23] Popel O.S., et al. The use of renewable energy sources for energy supply to consumers in the Arctic zone of the Russian Federation (Ispol'zovanie vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii dlya ehnergosnabzheniya potrebitelej v arkticheskoy zone Rossijskoj federacii). *The Arctic: Ecology and Economics*, 2015;1(17):64–69 (in Russ.).

[24] Gabderakhmanova T.S., et al. Some aspects of the development of renewable energy in the Arctic zone of the Russian Federation (Nekotorye aspekty razvitiya vozobnovlyaemoy ehnergetiki v arkticheskoy zone RF).

International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE), 2016;19–20:41–53 (in Russ.).

[25] Law "On renewable energy sources of the Republic of Sakha (Yakutia)" dated 27.11.2014 No. 313-V (as amended on: 28.02.2017) (Zakon "O vozobnovlyaemykh istochnikah ehnergii Respubliki Saha (Yakutiya)" ot 27.11.2014 g. № 313-V (s izmeneniyami na 28.02.2017). Available on: <http://docs.cntd.ru/document/445029370> [25.09.2017] (in Russ.).

[26] Ivanova I.Yu., et al. Substantiation of the use of solar plants in the Verkhoyansk area of the Sakha Republic (Yakutia) (Obosnovanie celesoobraznosti ispol'zovaniya geliostanovok v Verkhoyanskom rajone respubliki Saha (Yakutiya). *Life Safety*, 2014;6:34–39 (in Russ.).

[27] Koryakin A.K. Experience of exploitation of solar generation systems in the Far North conditions (Opyt ehkspluatacii sistem solnechnoj generacii v usloviyah Krajnego Severa). *Proceedings of the V international conference "Renewable energy in isolated systems of the Russian Far East. Yakutsk*, 2017. Available on: http://www.eastrenewable.ru/upload/iblock/d5a/4_%D0%9A%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf [27.09.2017] (in Russ.).

[28] Materials of the International Conference "Development of Renewable Energy in the Far East" (Materialy Mezhdunarodnoj konferencii "Razvitie vozobnovlyaemoy ehnergetiki na Dal'nem Vostoke"), Available on: <http://www.eastrenewable.ru> [27.09.2017] (in Russ.).

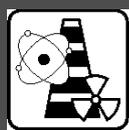
[29] Berdin V.Kh., et al. Renewable energy sources in isolated settlements of the Russian Arctic (Vozobnovlyaemye istochniki ehnergii v izolirovannykh naseleennykh punktah Rossijskoj Arktiki). Moscow: World Wildlife Fund (WWF), 2017, p. 80 (in Russ.).

[30] Energy Strategy of the Republic of Sakha (Yakutia) for the period to 2030 (Energeticheskaya strategiya Respubliki Saha (Yakutiya) na period do 2030 goda). Yakutsk, Irkutsk: Media Holding "Yakutia", 2010, p. 328 (in Russ.).

[31] Soloviev D.A., Morgunova M.O., Gabderakhmanova T.S. Adaptation of the energy infrastructure in the Arctic to climate changes by using renewable energy sources (Adaptaciya ehnergeticheskoy infrastruktury v Arktike k klimaticheskim izmeneniyam s ispol'zovaniem vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii). *Energy Policy*, 2017;4:72–80 (in Russ.).

Транслитерация по BSI





ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВС ВВР-КН В РЕАКТОРЕ ВВР-К*

*А.А. Шаймерденов^{1,2}, И.В. Шаманин², Н.А. Прибатурин^{3,4},
Ш.Х. Гизатулин¹, С.Н. Колточник¹, Л.В. Чекушина¹*

¹РГП «Институт ядерной физики», Министерство энергетики РК
д. 1, ул. Ибрагимова, Алматы, 050032, Казахстан
тел.: +7(727)386-68-00; e-mail: info@inp.kz

²ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет
д. 30, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия
тел.: +7(3822)60-63-33; e-mail: aashaimerdenov@gmail.com

³Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН
д. 1, пр. Академика Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Россия

⁴Институт безопасного развития атомной энергетики РАН
д. 52, ул. Большая Тульская, Москва, 115191, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.023-033

Заключение совета рецензентов: 15. 01.18 Заключение совета экспертов: 01.02.18 Принято к публикации: 12.02.18

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию безопасного проведения ресурсных испытаний опытной партии тепловыделяющих сборок (ТВС) с низкообогащенным топливом.

По результатам расчетных исследований, проведенных в Институте ядерной физики Республики Казахстан, для перевода исследовательского водо-водяного реактора «Казахстанец» (ВВР-К) на топливо пониженного обогащения (19,7 % по изотопу урана-235) была выбрана восьмитрубная ТВС с тонкостенными твэлами (толщина 1,6 мм), впоследствии названная «Тепловыделяющая сборка водо-водяного реактора «Казахстанец» низкообогащенный» (ТВС ВВР-КН). Новая ТВС имеет развитую поверхность теплообмена, что позволяет создавать на ее основе компактную активную зону без увеличения расхода теплоносителя и тем самым улучшать экспериментальные возможности реактора.

Представлены результаты реакторных испытаний опытной партии ТВС (три опытные ТВС ВВР-КН были изготовлены на Новосибирском заводе химконцентратов, Россия) на подтверждение проектных характеристик и проверки работоспособности новой конструкции ТВС с низкообогащенным урановым топливом. Расчетным путем доказано, что достижение проектных параметров ТВС возможно в активной зоне реактора ВВР-К. Отмечена основная проблема данного исследования – создание необходимых режимов испытаний в активной зоне реактора ВВР-К, так как мощность опытной ТВС более чем в два раза превышает мощность штатной ТВС реактора с высокообогащенным урановым топливом. Установлено, что проведение ресурсных испытаний трех опытных ТВС в активной зоне реактора ВВР-К потребовало изменения конфигурации и состава активной зоны и, следовательно, проведения анализа безопасности испытаний. Результаты расчетов

*Шаймерденов А.А., Шаманин И.В., Прибатурин Н.А., Гизатулин Ш.Х., Колточник С.Н., Чекушина Л.В. Теплофизическое обоснование проведения ресурсных испытаний экспериментальных ТВС ВВР-КН в реакторе ВВР-К // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):23-33.

показали, что во время проведения ресурсных испытания трех опытных ТВС обеспечивается теплотехническая надежность активной зоны реактора ВВР-К.

Ключевые слова: ресурсные испытания; экспериментальная ТВС; реактор ВВР-К; низкообогащенное топливо.

THERMOPHYSICAL JUSTIFICATION TO CARRY OUT OF THE LTA LIFE TEST IN THE WWR-K REACTOR CORE

A.A. Shaimerdenov^{1,2}, I.V. Shamanin², N.A. Pribaturin^{3,4}
Sh.Kh. Gizatulin¹, S.N. Koltochnik¹, L.V. Chekushina¹

¹The Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan

1 Ibragimov St., Almaty, 050032, Kazakhstan

тел.: +7(727)386-68-00; e-mail: info@inp.kz

²National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

tel.: +7(3822)60-63-33, e-mail: aashaimerdenov@gmail.com

³The Institute of Thermophysics named S.S. Kutateladze SB RAS

1 Academic Lavrenteva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

⁴The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

52 Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.023-033

Referred 15 January 2018 Received in revised form 1 February 2018 Accepted 12 February 2018

The paper deals with the results of computational and experimental research to justify the safety of life tests of the lead test assemblies with low-enriched fuel.

As a result of calculation studies conducted in the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan, the eight-tube and five-tube fuel assemblies with thin-walled fuel elements (thickness 1.6 mm), later named FA VVR-KN, have been chosen for conversion of the WWR-K research reactor to LEU fuel (19.7% for uranium-235). The new fuel assembly has a developed surface of heat removal which makes it possible to create on its basis a compact core without increasing in flow rate of coolant and to improve the experimental reactor capabilities.

The paper presents the results of in-pile LTA test (three experimental LTA VVR-KN were manufactured at the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant, Russia) to confirm the design characteristics and to verify the performance of new design of the fuel assemblies with low enriched uranium fuel. We have proven using calculations that the design characteristics of fuel assemblies can achieve in the core of the WWR-K reactor. The paper notes that the main difficulty of this research is the creation of the necessary test modes in the core of the WWR-K reactor because the power of the LTA is over two times higher than that of the regular fuel assembly of a reactor with highly enriched uranium fuel. We have determined that the life test of three LTA in the WWR-K reactor core requires a change in the configuration and composition of the core, and, consequently, the analysis of the test safety.

The calculation results have shown that the thermo-technical safety of the WWR-K reactor core is provided during the performance of the three LTA life test.

Keywords: life test; LTA; WWR-K reactor; low-enriched fuel.



Асет Абдуллаевич
Шаймерденов
Asset Shaimerdenov

Сведения об авторе: заведующий лабораторией, Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики Республики Казахстан».

Образование: Казахский национальный университет имени аль-Фараби (2008 г.).

Область научных интересов: внутриреакторные испытания; безопасность ядерных реакторов; нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты активных зон.

Публикации: 30.

ORCID 0000-0002-4407-324X

Information about the author: Head of Laboratory, Republican State Enterprise the Institute of Nuclear Physics.

Education: Al-Farabi Kazakh National University, 2008.

Research interests: in-pile test; safety of research reactor; neutron-physical and thermal-hydraulic calculations.

Publications: 30.



Игорь Владимирович
Шаманин
Igor Shamanin

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Физико-технический институт, кафедра «Техническая физика».

Образование: Томский политехнический университет (1985 г.).

Область научных интересов: ядерная физика и технологии.

Publications: 200.

h-index 5; Scopus 5; РИНЦ 8, WoS 5

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Education: Tomsk Polytechnic University, 1985.

Research interests: nuclear physics and technology.

Publications: 200.



Николай Алексеевич
Прибатурин
Nikolay Pribaturin

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт теплофизики им С.С. Кутаделадзе СО РАН / Институт безопасного развития атомной энергетики РАН.

Образование: Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (1975 г.).

Область научных интересов: теплофизика.

Publications: 250.

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, The Institute of Thermophysics named S.S. Kutateladze SB RAS / The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences.

Education: Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovoyov, 1975.

Research interests: thermal physics.

Publications: 250.



Шамиль Хайрулович
Гизатулин
Shamil Gizatulin

Сведения об авторе: старший научный сотрудник, Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики Республики Казахстан».

Образование: Казахский государственный университет имени С.М. Кирова (1969 г.).

Область научных интересов: внутриреакторные испытания; безопасность ядерных реакторов; нейтронно-физические расчеты активных зон.

Публикации: 100.

Information about the author: Senior Researcher, Republican State Enterprise the Institute of Nuclear Physics.

Education: Kirov Kazakh State University, 1972.

Research interests: in-pile test; safety of research reactor; neutron-physical calculations.

Publications: 110.



Светлана Нухимовна
Колточник
Svetlana Koltochnik

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики Республики Казахстан».

Образование: Казахский государственный университет имени С.М. Кирова (1969 г.).

Область научных интересов: расчеты по обоснованию безопасности ядерных реакторов; нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты активных зон.

Публикации: 100.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Republican State Enterprise the Institute of Nuclear Physics.

Education: Kirov Kazakh State University, 1969.

Research interests: calculations for nuclear reactor safety substantiation; neutron-physical and thermal-hydraulic calculations.

Publications: 110.



Людмила Васильевна
Чекушина
Lyudmila Chekushina

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики Республики Казахстан».

Образование: Казахский государственный университет имени С.М. Кирова (1969 г.).

Область научных интересов: расчеты по обоснованию безопасности ядерных реакторов; нейтронно-физические расчеты активных зон.

Публикации: 100.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Republican State Enterprise the Institute of nuclear physics

Education: Kirov Kazakh State University, 1969.

Research interests: calculations for nuclear reactor safety substantiation; neutron-physical calculations.

Publications: 110.



1. Введение

Водо-водяной реактор – это самый распространенный и один из самых безопасных типов реакторов, а использование «легкой» воды в качестве теплоносителя и замедлителя делает реактор относительно недорогим в эксплуатации. Поскольку топливо размещается в тепловыделяющих сборках (ТВС), которые бывают разной конструкции и изготавливаются из разных материалов, оболочка ТВС выступает первым и основным барьером перед выходом продуктов деления урана в активную зону реактора и далее в окружающую среду. Поэтому вопросы, связанные с обеспечением теплосъема, соблюдением теплового режима ТВС и условий безопасной эксплуатации ТВС и всей активной зоны в целом, являются актуальными и с точки зрения экологии.

В результате расчетных исследований специально для конверсии исследовательского реактора ВВР-К была разработана восьмитрубная ТВС с тонкостенными твэлами, впоследствии названная ТВС ВВР-КН [1–4]. Следующим и наиболее важным этапом перед постановкой ТВС новой конструкции на производство, в соответствии с действующими в Республике Казахстан нормативно-техническими документами, является проведение реакторных испытаний опытной партии ТВС на подтверждение их проектных характеристик. Целью реакторных испытаний была проверка работоспособности ТВС [5, 6].

Следует отметить, что проект конверсии реактора ВВР-К является международным проектом, в котором принимают участие специалисты научных организаций не только Казахстана, но России и США. При этом реакторные испытания разработанной специально для конверсии реактора ВВР-К новой конструкции ТВС были проведены впервые в мире.

Как правило, испытания такого типа проводятся в петлевых реакторах, где можно воссоздать режимы работы ТВС, близкие к натурным. Однако загруженность этих реакторов и количественные ограничения (испытания только одной ТВС) привели к поиску альтернативных вариантов. С помощью расчетов была показана возможность проведения таких испытаний в реакторах бакового типа, каким является реактор ВВР-К.

Основная трудность заключалась в создании необходимых режимов испытаний в активной зоне реактора ВВР-К в связи с тем, что мощность экспериментальной ТВС более чем в два раза превышает мощность штатной ТВС реактора. Для достижения проектных характеристик ТВС при испытаниях было предложено изменить конфигурацию и состав активной зоны реактора ВВР-К [7].

Другой важной задачей стало обеспечение безопасности проведения ресурсных испытаний опытной партии ТВС в активной зоне реактора ВВР-К.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
Δ	Размер шероховатости, мм
λ	Коэффициент гидравлического трения
ξ	Коэффициент местного сопротивления
Δp	Перепад давления, мм вод.ст.
ν	Кинематическая вязкость, м ² /с
ω	Скорость теплоносителя, м/с
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
D	Гидравлический диаметр зазора, мм
g	Ускорение свободного падения, м/с ²
L	Длина зазора, мм
Re	Число Рейнольдса
S	Сечение, мм ²
<i>Индексы нижние</i>	
n	Узкое
w	Широкое
<i>Аббревиатуры</i>	
ВВР-К	Водо-водяной реактор «Казахстанец»
ВВР-КН	Водо-водяной реактор «Казахстанец» низкообогащенный
ВВР-Ц	Водо-водяной реактор центральный
ГЦН	Главный циркуляционный насос
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
НИКИЭТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала
РГП	Республиканское государственное предприятие
ТВС	Тепловыделяющая сборка
ЭТВС	Экспериментальная тепловыделяющая сборка

2. Теоретический анализ

Согласно стандартам безопасности МАГАТЭ, для любой ядерной установки во время ее эксплуатации, проектной аварии и, насколько это практически возможно, при запроектных авариях необходимо придерживаться трех фундаментальных принципов безопасности: 1) контроль реактивности; 2) теплоотвод от активной зоны; 3) удержание радиоактивных материалов и контроль эксплуатационных выбросов, а также ограничение аварийных выбросов [8–10].

Данная статья посвящена второму фундаментальному принципу безопасности, а именно, достаточности обеспечения надежного теплоотвода во время проведения ресурсных испытаний опытной партии ТВС.

Эффективным инструментом для обоснования безопасности являются компьютерные коды, в которых с помощью математического моделирования штатных и переходных процессов решаются системы дифференциальных уравнений.

Наибольшую опасность для легководных реакторов представляет режим пузырькового кипения на поверхности твэла, который приводит к расплавлению оболочки твэла и, соответственно, к выходу высокоактивных газообразных продуктов деления в теплоноситель первого контура реактора [11–13].

В рамках обоснования теплофизической безопасности проведения ресурсных испытаний экспериментальной ТВС в активной зоне реактора ВВР-К применялся компьютерный код PLTEMP [14, 15], разработанный Аргонской национальной лабораторией (США) и предназначенный для теплогидравлического анализа стационарного состояния активной зоны реактора. В расчетах использовался консервативный подход. Температура на входе в ТВС принималась равной 45 °С – это максимально возможная температура. Режим работы реактора считался допустимым, если коэффициент запаса до начала поверхностного кипения в наиболее энергонапряженной ТВС составлял не менее 1,45 по корреляции Форстера и Грейфа и не менее 1,3 по корреляции Бергелса и Розенау.

При проведении гидравлического расчета ТВС была условно разбита на три части по высоте [16–23]. Верхняя и нижняя части (головка и гребенка) имели сложную конструкцию – здесь происходило сужение или расширение потока теплоносителя, тогда как в активной части ТВС только силы трения в межтвэльных зазорах тормозили движение жидкости.

- Коэффициент местного сопротивления ξ для сжатия струи при переходе от широкого (S_w) сечения к узкому (S_n) определялся как $\xi = 0,5 (1 - S_n / S_w)$.

- Коэффициент местного сопротивления ξ для расширения струи при переходе от узкого сечения к широкому вычислялся по формуле: $\xi = (1 - S_n / S_w)^2$.

- Коэффициент местного сопротивления ξ для трения в межтвэльных зазорах определялся как $\lambda \cdot L/D$, где L и D – длина и гидравлический диаметр зазора соответственно; λ – коэффициент гидравлического трения.

- Коэффициент гидравлического трения вычислялся по формуле Альтшуля, которая рекомендуется для труб некруглого сечения при турбулентном потоке жидкости: $\lambda = 0,11 (\Delta/D + 68/Re)^{0,25}$, где Δ – размер шероховатости (равный 0,005 мм); Re – число Рейнольдса (6 000÷25 000), которое вычислялось по формуле $Re = \omega w D/\nu$, где ω – скорость теплоносителя; ν – кинематическая вязкость.

- Перепад давления определялся по формуле Дарси-Вейсбаха (м вод.ст.): $\Delta p = \xi \cdot \omega^2 / 2g$.

3. Описание экспериментальной установки

Исследовательский реактор ВВР-К – это водородный реактор бакового типа с тепловым спектром нейтронов номинальной мощностью 6 МВт и обогащением по урану-235 36 %. В качестве теплоносителя и замедлителя выступает обессоленная вода, отражателя – обессоленная вода или бериллий [24].

По согласованию с разработчиком экспериментальных ТВС (НИКИЭТ, г. Москва) было принято решение о том, что испытания необходимо проводить на режимах работы ТВС ВВР-КН в составе активной зоны с низкообогащенным топливом.

Специально для этого было разработано облучательное устройство (рис. 1) из бериллия с внутренней полостью диаметром 141 мм [7].



Рис. 1 – Облучательное устройство
Fig. 1 – Irradiation device

Внутри облучательного устройства – решетка, в которую с шагом 68,3 мм устанавливаются три ЭТВС. Шаг решетки обеспечивает гарантированный зазор между ТВС в 2 мм, предназначенный для протока теплоносителя и, соответственно, теплосъема. Облучательное устройство имеет три канала для установки датчиков контроля температуры и плотности потока нейтронов во время облучения.

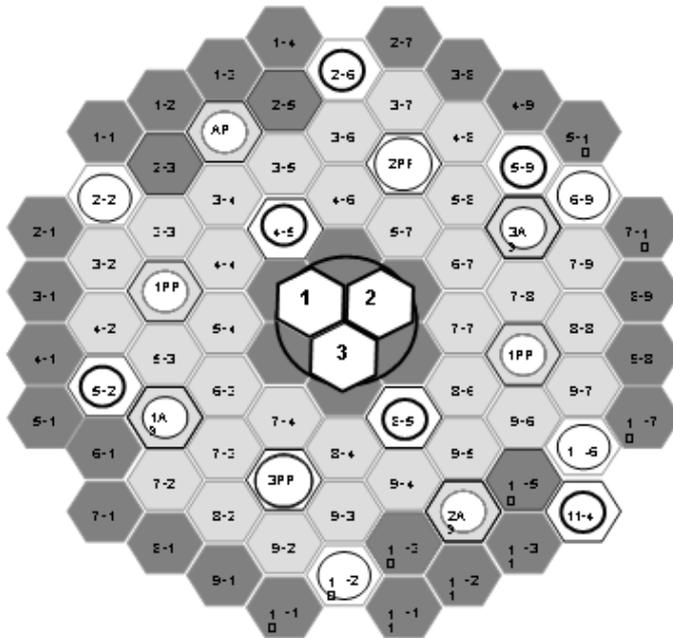
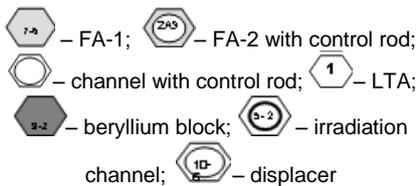
С целью повышения удельного энерговыделения в активной зоне, с периферии были удалены 23 ТВС,

а в центре активной зоны вместо шести ТВС и одного облучательного канала было установлено облучательное устройство из бериллия. Для компенсации потери реактивности в периферийные ячейки установлены бериллиевые блоки. Все это позволило повысить энерговыделение в экспериментальных ТВС. Картограмма активной зоны реактора ВВР-К при ресурсных испытаниях экспериментальных ТВС приведена на рис. 2.

Рис. 2 – Картограмма загрузки активной зоны реактора ВВР-К при ресурсных испытаниях экспериментальных ТВС:



Fig. 2 – WWR-K reactor core map during LTA life test:



Для того чтобы подтвердить адекватность данной схемы расчета гидравлических параметров испытаний экспериментальных ТВС, был разработан и изготовлен испытательный стенд [25]. На стенде были выполнены измерения перепада давления на облучательном устройстве с тремя ТВС. В экспериментах исследована зависимость перепада давления воды от расхода воды через облучательное устройство. Расчет перепада давления выполнен для восьми значений расхода теплоносителя, при которых проводился эксперимент.

4. Результаты и их обсуждение

Поскольку загрузка центрального облучательного устройства и блоков из бериллия в активную зону значительно изменила картину энергораспределения в активной зоне, были проведены детальные нейтронно-физические расчеты при помощи компьютерных кодов MCNP и MCU-REA, в которых для моделирования траектории движения нейтронов применялся метод Монте-Карло [26, 27].

В результате энерговыделение в наиболее энергонапряженной штатной ТВС равнялось 192 кВт. Средние значения энерговыделения в трёх экспериментальных ТВС составили: ТВС1 – 343,8 кВт; ТВС2 – 340,3 кВт; ТВС3 – 369,8 кВт. Коэффициент нерав-

номерности энергораспределения по высоте ТВС равен 1,33.

Расчетная зависимость перепада давления как функция расхода воды через облучательное устройство и экспериментальные данные, полученные на испытательном стенде, представлены на рис. 3.

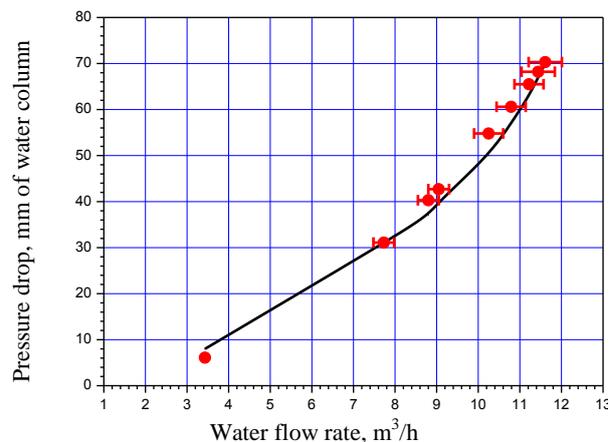


Рис. 3 – Зависимость перепада давления от расхода воды: линия – расчетные данные; точки – экспериментальные данные

Fig. 3 – Pressure drop versus flow rate: line – calculated data; points – experimental data



В связи тем, что на момент проведения экспериментов на испытательном стенде экспериментальные ТВС не были изготовлены, все измерения были выполнены с помощью сборки из полномасштабного макета облучательного устройства и трех макетов ТВС типа ВВР-Ц. Использование макетов ТВС ВВР-Ц не повлияло на результаты исследований, так как в

соответствующих расчетах учтены различия между ТВС ВВР-Ц и экспериментальными ТВС.

Результаты теплогидравлического расчета по определению теплового режима наиболее энергонапряженной экспериментальной ТВС приведены в табл. 1 [28–30]. В данном случае рассматривался сектор ТВС, обращенный к бериллию и облучательному каналу.

Результаты теплового расчёта наиболее энергонапряжённой ЭТВС
Results of thermal calculation of the hottest LTA

Таблица 1

Table 1

Параметр	Значение
Мощность реактора, МВт	6,0
Перепад давления на активной зоне, Па	17 000
Расход теплоносителя через активную зону, м ³ /ч	1 000
Давление теплоносителя на входе в активную зону, Па	1,35·10 ⁵
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	45,0
Температура теплоносителя на выходе из ТВС, °С	68
Максимальное объемное энерговыделение в твэлах, МВт/м ³	1 503
Максимальная температура оболочки твэла, °С	87,7
Температура начала поверхностного кипения по Берглесу – Розенау, °С	113,8
Коэффициент запаса до начала поверхностного кипения	1,61

Распределение температуры оболочки и теплоносителя в самой энергонапряженной экспериментальной ТВС показано на рис. 4.

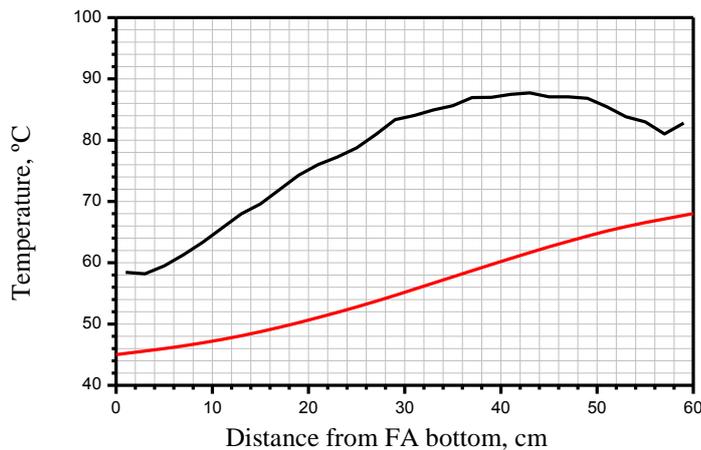


Рис. 4 – Аксиальное распределение максимальных температур оболочки и теплоносителя в ЭТВС при работе трех ГЦН (1 000 м³/ч): черная линия – температура оболочки; красная линия – температура теплоносителя
Fig. 4 – Axial distribution of the maximal clad and coolant temperatures in LTA under operation of the three main circulation pumps (1,000 m³/h): black line – clad temperature; red line – coolant temperature

Результаты теплофизического расчета наиболее энергонапряженной штатной ТВС приведены в табл. 2.

Результаты теплового расчёта наиболее энергонапряжённой штатной ТВС
Results of thermal calculation of the hottest regular FA

Таблица 2

Table 1

Параметр	Значение
Мощность реактора, МВт	6,0
Перепад давления на активной зоне, МПа	0,017
Расход теплоносителя через активную зону, м ³ /ч	1 000
Давление теплоносителя на входе в активную зону, МПа	0,135
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	45
Температура теплоносителя на выходе из ТВС, °С	55,8
Максимальное объемное энерговыделение в твэлах, МВт/м ³	1328
Максимальная температура оболочки твэла, °С	74,3
Температура начала поверхностного кипения по Форстеру-Грейфу, °С	121,2
Коэффициент запаса до начала поверхностного кипения	2,60

Распределение температуры оболочки и теплоносителя в штатной ТВС показано на рис. 5.

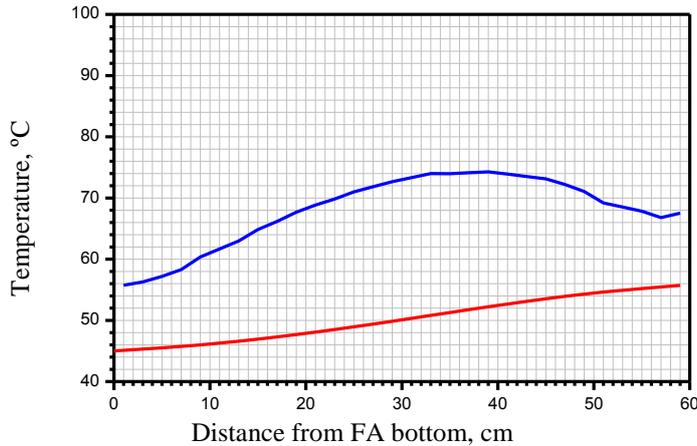


Рис. 5 – Аксиальное распределение максимальных температур оболочки и теплоносителя в штатной ТВС при работе трех ГЦН (1 000 м³/ч): синяя линия – температура оболочки; красная линия – температура теплоносителя
Fig. 5 – Axial distribution of the maximal clad and coolant temperatures in regular FA under operation of the three main circulation pumps (1,000 m³/h): blue line – clad temperature; red line – coolant temperature

На основе данных таблиц 1 и 2 можно сделать вывод о том, что, несмотря на изменение конфигурации и состава активной зоны, превышения допустимых режимов работы ТВС не происходит.

Тепловой расчет показал, что максимальное значение температуры оболочки экспериментальной ТВС приходится на внешнюю стенку второго твэла и составляет 87,7 °С, а максимальная температура теплоносителя приходится на верхнюю часть зазора между первым и вторым твэлами экспериментальной ТВС и составляет 68 °С. При этом

коэффициент запаса до начала пузырькового кипения равен 1,61, тогда как минимально допустимое значение – 1,3.

Расчетным путем было определено нижнее значение расхода теплоносителя через активную зону (785 м³/ч), начиная с которого температуры стенок твэлов (97,7 °С) и теплоносителя (75 °С) в межтвэльных зазорах, а также значения коэффициента запаса до начала пузырькового кипения (1,31) становятся безопасными. Графическое изображение результатов расчета показано на рис. 6.

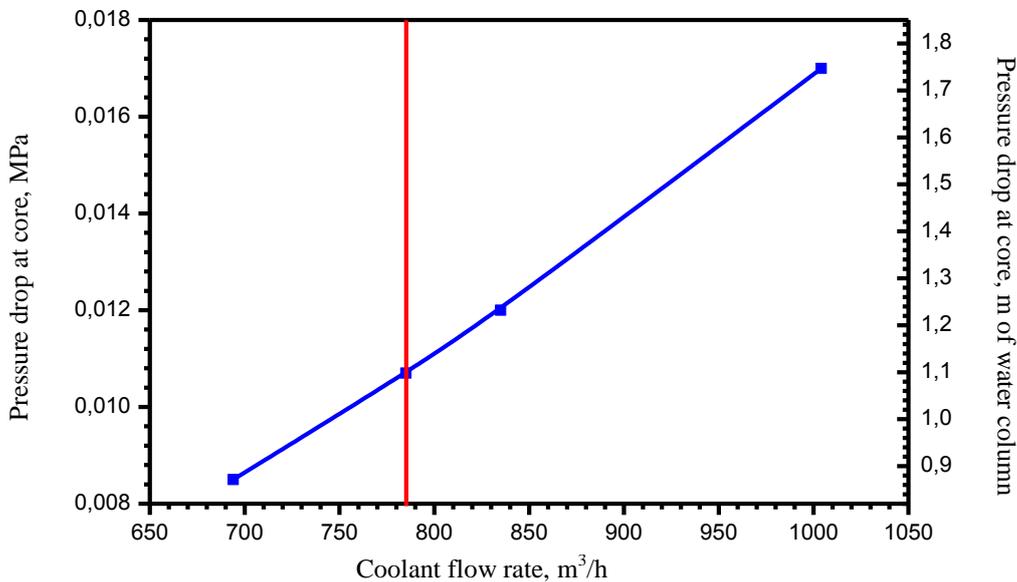


Рис. 6 – Перепад давления по активной зоне как функция расхода теплоносителя в активной зоне: справа от красной линии коэффициент до начала пузырькового кипения выше 1,3
Fig. 6 – Core pressure drop versus coolant flow rate: on the right of red line the onset nuclear boiling is higher than 1.3

На рис. 6, справа от вертикальной красной линии находится область, где коэффициент запаса до начала поверхностного кипения выше 1,3. При расходе теплоносителя через активную зону выше 785 м³/ч

обеспечивается необходимый теплоотвод от ТВС и не нарушаются пределы безопасной эксплуатации реактора ВВР-К.



5. Заключение

Расчетно-экспериментальные исследования по обоснованию безопасности проведения ресурсных испытаний опытной партии ТВС в активной зоне реактора ВВР-К показали, что даже при консервативном подходе превышения допустимых режимов работы как штатной, так и экспериментальной ТВС не происходит. При работе трех главных циркуляционных насосов, которые обеспечивают расход теплоносителя через активную зону на уровне 1 000 м³/ч, кризисов теплообмена в самых энергонапряженных ТВС (штатной и экспериментальной) не возникает, а именно, температуры стенок твэлов и теплоносителя остаются ниже допустимых пределов (температура плавления алюминиевого сплава ~ 660 °С и температура кипения воды при атмосферном давлении ~ 97 °С).

Впоследствии были получены реальные экспериментальные значения во время ресурсных испытаний трех экспериментальных ТВС в активной зоне реактора ВВР-К, которые хорошо согласуются с результатами расчетных исследований [31].

Благодарности

Авторы статьи выражают огромную благодарность сотрудникам лаборатории проблем безопасности атомной энергии РГП «Институт ядерной физики» за помощь в проведении нейтронно-физических и теплофизических расчетов, а также в разработке испытательного стенда и проведении экспериментов на этом стенде.

Acknowledgments

The authors express their great gratitude to the employees of the Laboratory of Atomic Energy Safety Issues of the RSE "Institute of Nuclear Physics" for their support in carrying out neutron-physical and thermophysical calculations, as well as in the development of a test bench and conducting experiments on it.

Список литературы

- [1] Аринкин, Ф.М. Feasibility Study of the WWR-K Reactor Conversion to Low-Enriched Fuel / Ф.М. Аринкин [и др.] // Снижение обогащения исследовательских и материаловедческих реакторов: труды международной конференции. – Вена, 2004. – С. 5.
- [2] Аринкин, Ф.М. Feasibility Analysis for Conversion of the WWR-K Reactor Using an Eight-Tube Uranium Dioxide Fuel Assembly / Ф.М. Аринкин [и др.] // Снижение обогащения исследовательских и материаловедческих реакторов: труды международной конференции. – Бостон, 2005. – С. 117.
- [3] Аринкин, Ф.М. Characteristics of the WWR-R reactor core with low-enriched uranium dioxide fuel / Ф.М. Аринкин [и др.] // Снижение обогащения исследовательских и материаловедческих реакторов: труды международной конференции. – Кейптаун, 2006. – С. 47.
- [4] Аринкин, Ф.М. Feasibility study of WWR-K reactor conversion to low-enriched fuel / Ф.М. Аринкин

[и др.] // Менеджмент топлива исследовательских реакторов: труды международной конференции. – София, 2006. – С. 56.

[5] Аринкин, Ф.М. Plan of WWR-K Conversion to LEU Fuel / Ф.М. Аринкин [и др.] // Снижение обогащения исследовательских и материаловедческих реакторов: труды международной конференции. – Пекин, 2009. – С. 30.

[6] Аринкин, Ф.М. План конверсии активной зоны реактора ВВР-К с использованием низкообогащенного топлива / Ф.М. Аринкин [и др.] // Ядерная и радиационная физика: труды международной конференции. – Алматы, 2009. – С.189–190.

[7] Аринкин, Ф.М. Изменение конфигурации активной зоны исследовательского реактора ВВР-К с целью повышения энергонапряженности экспериментальных топливных сборок при их ресурсных испытаниях / Ф.М. Аринкин [и др.] // Известия ВУЗов. Серия Физика. – 2015. – Т. 58. – № 2/2. – С. 184–190.

[8] IAEA Safety Standards Series, Safety of Nuclear Power Plants: Design. – V.: IAEA, 2000. – 91 p.

[9] IAEA Safety Standards, Safety of Nuclear Power Plants: Design, SSR-2/1. – V.: IAEA, 2016. – 99 p.

[10] IAEA Safety Standards Series, Safety of Research Reactors, SSR-3. – V.: IAEA, 2016. – 152 p.

[11] Шараевский, Г.И. Методология определения режима начала кипения в тепловыделяющих сборках твэлов путем анализа акустического шума // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – № 3(71). – С. 48–55.

[12] Шараевский, И. Г. Актуальные проблемы теплофизики проектных и тяжелых аварий ядерных энергоблоков / И. Г. Шараевский [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – № 2(70). – С. 32–36.

[13] Коньшин, В.И. Верификация данных по кризису теплоотдачи в ТВС реакторов типа ВВЭР, полученных расчетным путем / В.И. Коньшин, В.А. Савоник // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2013. – № 1. – С. 96–103.

[14] Arne P. Olson A Users Guide to the PLTEMP/ANL V3.5 Code / Arne P. Olson, M. Kalimullah. – A.: Argonne National Laboratory, 2008. – 184 p.

[15] Kalimullah, M. Verification and Validation of the PLTEMP/ANL Code for Thermal-Hydraulic Analysis of Experimental and Test Reactors / M. Kalimullah [et al.]. – A.: 2015. – 1 408 p.

[16] Примеры расчетов по гидравлике / под ред. А.Д. Альтшуля. – М.: Стройиздат, 1977. – 248 с.

[17] Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

[18] Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.

[19] Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 485 с.



[20] Коротких, А.Г. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах: учебное пособие / А.Г. Коротких, И.В. Шаманин. – Т.: ТГУ, 2007. – 117 с.

[21] Кутателадзе, С.С. Справочник о теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский – М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 418 с.

[22] Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

[23] Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.

[24] Возобновление эксплуатации реактора ВВР-К / под ред. Ж.Р. Жотабаева. – А.: А.о.ИАЭ НЯЦ РК, 1998. – 248 с.

[25] Бейсебаев А.О. Стенд для исследования гидравлических характеристик макетов тепловыделяющих сборок / А.О. Бейсебаев [и др.] // Мир научных исследований. – 2011. – № 8–9. – С. 32–36.

[26] Абагян Л.П. Программа MCU-REA с библиотекой ядерных констант DLC/MCUDAT - 2.1 / Л.П. Абагян [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика атомных реакторов». – 2001. – № 3. – С. 55–62.

[27] Briesmeister, J.F. MCNP/4B General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A / LA: 1994. – Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M. – 741 p.

[28] Arinkin, F. Start of low-enriched fuel lead test assemblies in the WWR-K reactor core / F. Arinkin [et al.] // Снижение обогащения исследовательских и материаловедческих реакторов: труды международной конференции. – Сантьяго, 2011 – С. 82.

[29] Аринкин, Ф.М. Первый этап испытаний экспериментальных тепловыделяющих сборок с низкообогащенным топливом в активной зоне реактора ВВР-К – результаты и выводы / Ф.М. Аринкин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия Физика ядерных реакторов. – 2012. – №3. – С. 74–80.

[30] Arinkin, F. Results of the trial of lead test assemblies in the WWR-K reactor / F. Arinkin [et al.] // Управление топливом исследовательских реакторов: труды международной конференции – Любляна, 2014 – С. 227–233.

[31] Аринкин, Ф.М. Результаты испытаний опытных ТВС в активной зоне реактора ВВР-К / Ф.М. Аринкин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 6–15.

References

[1] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Zhotabayev Zh.R., Kadyrzhanov K.K., Koltochnik S.N., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Zhantikin T.M., Talanov S. Feasibility Study of the WWR-K Reactor Conversion to Low-Enriched Fuel. *Reduced enrichment of research*

and test reactors: proceedings of international conference, Vienna, 2004, p. 5.

[2] Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Dobrikova I., Gizatulin Sh.Kh., Kadyrzhanov K.K., Koltochnik S.N., Nasonov V., Taliev A., Vatulin A., Zhotabayev Zh.R., Hanan N. Feasibility Analysis for Conversion of the WWR-K Reactor Using an Eight-Tube Uranium Dioxide Fuel Assembly. *Reduced enrichment of research and test reactors: proceedings of international conference*, Boston, 2005, p. 117.

[3] Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Kadyrzhanov K.K., Kartashev K., Koltochnik S.N., Lukishev V., Nasonov V., Romanova N.K., Taliev A., Zhotabayev Zh.R. Characteristics of the WWR-R reactor core with low-enriched uranium dioxide fuel. *Reduced enrichment of research and test reactors: proceedings of international conference*, Cape town, 2006, p.47.

[4] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Zhotabayev Zh.R., Kadyrzhanov K.K., Koltochnik S.N., Nasonov V.A., Chakrov P.V., Chekushina L.V. Feasibility study of WWR-K reactor conversion to low-enriched fuel. *Research reactor fuel management: proceedings of international conference*, Sofia, 2006, p. 56.

[5] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Tuleushev A.Zh., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Garner P., Hanan N., Roglans-Ribas D. Plan of WWR-K Conversion to LEU Fuel. *Reduced enrichment of research and test reactors: proceedings of international conference*, Beijing, 2009, p. 30.

[6] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Tuleushev A.Zh., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Garner P., Hanan N., Roglans-Ribas D. Plan for conversion of the core of the WWR-K reactor to low-enriched fuel (Plan konversii aktivnoi zony reaktora VVR-K s ispol'zovaniem nizkoobogashchennogo topliva). *Nuclear and radiation physics: proceedings of international conference*, Almaty, 2009, pp.189–190 (in Russ.).

[7] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Chekushina L.V., Shaimerdenov A.A., Shamanin I.V. WWR-K research reactor core configuration changes in order to increase LTA power during life test (Izmenenie konfiguratsii aktivnoi zony issledovatel'skogo reaktora VVR-K s tsel'yu povysheniya energonapryazhennosti eksperimental'nykh toplivnykh sborok pri ikh resursnykh ispytaniyakh). *Russian Physics Journal*, 2015;58(2/2):184–190 (in Russ.).

[8] IAEA Safety Standards Series, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Vienna: IAEA, 2000, 91 p.

[9] IAEA Safety Standards, Safety of Nuclear Power Plants: Design, SSR-2/1, Vienna: IAEA, 2016, 99 p.

[10] IAEA Safety Standards Series, Safety of Research Reactors, SSR-3, Vienna: IAEA, 2016, 152 p.

[11] Sharaevskiy G.I. Methodology for determining the boiling-point regime in fuel assemblies by analyzing acoustic noise (Metodologiya opredeleniya rezhima nachala kipeniya v teplovyydel'yayushchikh sborkakh tvelov putem analiza akusticheskogo shuma), *Nuclear and radiation physics*, 2016;3(71):48–55 (in Russ.).



- [12] Sharaevskiy I.G., Fialko N.M., Nosovskii A.V., Zimin L.B., Sharaevskiy G.I. Actual problems of thermal physics of design and heavy accidents of nuclear power units (Aktual'nye problemy teplofiziki proektnykh i tyazhelykh avarii yadernykh energoblokov). *Nuclear and radiation safety*, 2016;2(70):32–36 (in Russ.).
- [13] Konshin V.I. Verification of data on the heat transfer crisis in fuel assemblies of VVER-type reactors obtained by calculation (Verifikatsiya dannykh po krizisu teplootdachi v TVS reaktorov tipa VVER, poluchennykh raschetnym putem). *Energy: economic, technology, ecology*, 2013;1:96–103 (in Russ.).
- [14] Olson A.P., Kalimullah A. Users Guide to the PLTEMP/ANL V3.5 Code. – A.: Argonne National Laboratory, 2008, 184 p.
- [15] Kalimullah M., Olson A.P., Feldman E.E., Hanan N., Dionne B. Verification and Validation of the PLTEMP/ANL Code for Thermal-Hydraulic Analysis of Experimental and Test Reactors – A.: 2015, 1 408 p.
- [16] Altshyl A.D. Examples of calculations for hydraulics (Primery raschetov po gidravlike), Moscow: Stroiizdat Publ., 1977, 248 p. (in Russ.).
- [17] Kiselev P.G. Handbook of Hydraulic Calculations (Spravochnik po gidravlicheskim raschetam). Moscow: Energiya Publ., 1972, 312 p (in Russ.).
- [18] Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance (Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975: 560 p (in Russ.).
- [19] Chirkin V.S. Thermophysical properties of nuclear materials (Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoi tekhniki). Moscow: Atomizdat Publ., 1968: 485 p (in Russ.).
- [20] Korotkih A.G., Shamanin I.V. Fundamentals of Hydrodynamics and Heat Transfer in Nuclear Reactors: A Training Manual (Osnovy gidrodinamiki i teploobmena v yadernykh reaktorakh: uchebnoe posobie). Tomsk: TSU Publ., 2007: 117 p (in Russ.).
- [21] Kutateladze S.S., Borishanskii V.M. Handbook of heat transfer (Spravochnik o teploperedache). Moscow: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo Publ., 1958: 418 p (in Russ.).
- [22] Kirillov P.L., Uriev U.S., Bobkov V.P. Handbook of thermohydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators) (Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990: 360 p (in Russ.).
- [23] Rivkin S.L., Alexandrov A.A. Thermodynamic properties of water and water vapor: a handbook (Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para: spravochnik). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984: 80 p (in Russ.).
- [24] Zhotabayev Zh.R. Restarting of operation of the VVR-K reactor (Vozobnovlenie ekspluatatsii reaktora VVR-K). Almaty: A.o.IAE NYATS RK Publ., 1998: 248 p (in Russ.).
- [25] Beisebayev A.O., Blynskii P.A., Gizatulin Sh.Kh., Dyussambayev D.S., Kiselev K.S., Koltochnik S.N., Shaimerdenov A.A. A bench for studying the hydraulic characteristics of fuel assembly mockups (Stend dlya issledovaniya gidravlicheskikh kharakteristik maketov teplovydelyayushchikh sborok). *World of scientific research*, 2011;8–9:32–36 (in Russ.).
- [26] Abagyan L.P. Alexeev N.I., Glushkov A.E., Gomin E.A., Gurevich M.I., Kalugin M.A., Maurov L.V., Marin S.V., Shkarovskii D.A., Udkevch M.S. MCU-REA program with DLC / MCUDAT - 2.1 library of nuclear constants (Programma MCU-REA s bibliotekoi yadernykh konstant DLC/MCUDAT - 2.1). *Atomic science and techniques issues: physics of atomic reactors*, 2001;3:55–62 (in Russ.).
- [27] Briesmeister J.F. MCNP/4B General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A / LA: 1994. Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M, 741 p.
- [28] Arinkin F. Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Nakipov D., Romanova N.K., Shaimerdenov A.A., Zhotabaev Zh.R. Start of low-enriched fuel lead test assemblies in the WWR-K reactor core. *Reduced enrichment of research and test reactors: proceedings of international conference*, Santiago, 2011, p. 82.
- [29] Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Nakipov D.A., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Shaimerdenov A.A. The first stage of testing experimental fuel assemblies with low-enriched fuel in the core of the VVR-K reactor – results and conclusions (Pervyi etap ispytaniy eksperimental'nykh teplovydelyayushchikh sborok s nizkoobogashchennym toplivom v aktivnoi zone reaktora VVR-K – rezul'taty i vyvody). *Atomic science and techniques issues: physics of atomic reactors*, 2012;3:74–80 (in Russ.).
- [30] Arinkin F., Chakrov P., Chekushina L., Gizatulin Sh., Koltochnik S., Shaimerdenov A. Results of the trial of lead test assemblies in the WWR-K reactor. *Research reactor fuel management: proceedings of international conference*, Ljubljana, 2014, pp. 227–233.
- [31] Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Koltochnik S.N., Nakipov D.A., Shaimerdenov A.A., Shamanin I.V. Results of the trial of lead test assemblies in WWR-K reactor (Rezul'taty ispytaniy opytnykh teplovydelyayushchikh sborok v aktivnoi zone reaktora VVR-K). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2014;325(4):6–15 (in Russ.).

Транслитерация по BSI





ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА КАК НОСИТЕЛЯ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ¹

Д.О'М. Бокрис^{1}, Т.Н. Везироглу²*

¹Хейл Плантейшн 10515 S. В. 55 плейс, Гейнсвилл, Флорида 32608, США
тел.: +1(352)335-38-43; факс: +1(352)335-69-25; e-mail: jbockris@cox.net

²Исследовательский институт чистой энергии, Университет Майямы

²Институт чистой энергии, Университет Майямы
1251 Мемориал Драйв, 219 корпус МакАртура, п/я 2048290,
Корал Гейблс, Флорида 33124, США
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.034-042

Заключение совета рецензентов: 15.08.17 Заключение совета экспертов: 21.09.17 Принято к публикации: 12.10.17

Отказ от водорода как носителя ветровой и солнечной энергии в качестве решения проблемы глобального потепления был сделан тогда, когда бензин еще стоил 1 доллар за галлон.

Стоимость водорода, полученного за счёт энергии ветра (путем электролиза воды и пара) и дающего энергию, эквивалентную энергии галлона бензина («эквивалент»), сейчас составляла бы менее 3 долларов США. А стоимость водорода, полученного за счёт солнечной энергии, снизилась бы с \$8 до \$5 за эквивалент, поскольку эффективность солнечной батареи сейчас увеличилась до 20 %². В настоящее время цены на солнечную тепловую энергию в два раза ниже цен на фотоэлектрическую солнечную энергию (солнечные батареи).

Используется прогноз максимального объема добычи нефти в мире [Прогноз добычи нефти Лахерра, 1950–2150 гг. Перепечатано с разрешения при переписке с Уильямом Хорватом, Министерство энергетики США, 29 марта 2001] на 2010 г.

В перспективе источники энергии будут вырабатывать неисчерпаемую энергию из ветра, солнечного излучения, геотермальных вод, приливов и волн. Распространёнными носителями энергии будут водород и электричество, стоимость которых примерно в два раза ниже атомной энергии.

Выращивание зерновых культур для производства алкоголя предполагает энергозатратные процессы и, в том числе, тепловые процессы ректификации. Это³ может увеличить парниковый эффект.

Ключевые слова: водород; ветер; нефть; солнечная энергия; ядерный; зерно.

¹Бокрис Д.О'М., Везироглу Т.Н. Оценка стоимости водорода как носителя ветровой и солнечной энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):34-42.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2007;32:1605–1610. ©2007 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.ijhydene.2007.04.037

² Оценки расчетной стоимости, указанные здесь, включают 25 % прибыли и стоимость транспортировки H₂ на 1 000 миль. Если не указано иное, то цены указаны по курсу доллара 2006 г.

³ Выращивание растений для производства спирта происходит за счёт солнечного света и углекислого газа и включает стадию нагревания, для чего многие производители используют ископаемое топливо, что приводит к выбросам CO₂. Однако в этой статье указывается, что для получения тепла можно использовать избыток биотоплива первой стадии, и процесс выращивания будет осуществляться на CO₂ и свете, т.е. без образования CO₂ при сжигании.

ESTIMATES OF THE PRICE OF HYDROGEN AS A MEDIUM FOR WIND AND SOLAR SOURCES

John O'M. Bockris^{1*}, T. Nejat Veziroglu²

¹Haile Plantation, 10515 S. W. 55th Place, Gainesville, FL 32608, USA

*tel.: +1 352 335 3843; fax: +1 352 335 6925; e-mail: jbockris@cox.net

²Clean Energy Research Institute, University of Miami, 1251 Memorial Drive,
219 MacArthur Engineering Building, P.O. Box 2048290, Coral Gables, FL 33124, USA
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.034-042

Referred 15 August 2017 Received in revised form 21 September 2017 Accepted 12 October 2017

The rejection of hydrogen as a solution to global warming by becoming the medium of wind and solar was made when gasoline was priced at \$1/gallon. From wind, H₂ would now cost (by electrolysis of water and steam) less than \$3 for an amount equivalent in energy to that in a gallon of gasoline ("equivalent"). From solar photovoltaics (pv), H₂ would be sinking in price between \$8 toward \$5 equivalent as the efficiency of solar pv increases toward 20%. Solar thermal's present prices offer about one-half the solar pv prices. Prediction of the maximum of the delivery rate of world oil is [Laherre's Oil Production Forecast, 1950–2150. Reprinted with permission from correspondence with William Horvath, U.S. Department of Energy, March 29, 2001] 2010. Future energy sources will develop inexhaustible energies from wind, solar, geothermal, tidal, and wave sources. The common media will be hydrogen and electricity. These sources yield energy at around one-half the cost of nuclear fission. Growing corn to make alcohol involves a net loss of energy and need for a heating mechanism. It may increase the Greenhouse.

Keywords: hydrogen; wind; oil; solar; nuclear; corn.



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".

1. Введение

Наносимый окружающей среде ущерб от использования ископаемых видов топлива был оценен Т.Н. Везироглу и др. в работе [2], а в 2006 г. удельный ущерб составлял около половины розничной цены на бензин в США. При электрохимическом получении водорода планете не наносится вреда, так как генерация электричества происходит без выделения углекислого газа.

Сейчас запасы нефти истощаются. В частности, скважины Саудовской Аравии практически пусты [3]. По данным Министерства энергетики США, пик темпов добычи нефти в мире будет достигнут через 15 лет (2021 г.) [4]. Однако эта оценка не учитывает влияния растущего спроса на энергию со стороны Китая и Индии: при этом ОПЕК прогнозирует, что добыча экспортёров нефти начнет падать в 2010 г. [1]⁴. В связи с этим актуален вопрос о замене нефти новыми источниками энергии. Так, водород теперь можно производить из ветра и других возобновляемых источников энергии по цене \$3 за галлон бензинового эквивалента. Тем не менее необходимо не только исключить выбросы CO₂ системой и значительно снизить её стоимость, но и завершить строительство новой энергетической системы по всей территории США до того, как дефицит нефти начнет ослаблять нашу экономику.

2. Временные затраты на строительство новых заводов и будущие цены на топливо

Как указано в [5], для строительства ядерных реакторов в качестве основного источника энергии на всей территории Соединенных Штатов потребуется примерно пятьдесят лет (1 800 новых реакторов)⁵, а для других возобновляемых источников энергии потребуется по крайней мере половина этого времени – 25 лет. Вероятно, мы могли бы преодолеть это энергетическое отставание (начиная с 2010 г.), используя битуминозные пески. Однако это увеличило бы температуру и повысило уровень моря, и в конечном счете привело бы к затоплению прибрежных городов раньше прогнозируемого срока.

Когда темпы добычи нефти, от которой мы так зависим, достигнут максимального уровня и начнут снижаться на 6 ÷ 10 % в год [6], розничная цена на бензин будет расти.

И наоборот, стоимость чистой энергии из возобновляемых источников (ветровой, приливной, гравитационной, геотермальной и солнечной) не будет, по крайней мере, не должна увеличиваться, так как на эти источники не влияет исчерпание запасов нефти, и их стоимость уже приемлема даже без Федеральной

⁴ Это утверждение, которое согласуется с оценками геологов о запасах нефти, относится к геологическому обзору Хабберта 1970 г.

⁵ Помимо того, что на создание экономики, основанной на ядерной энергии, потребуется очень много времени, запаса урана хватит всего на несколько десятилетий.

поддержки исследований. Таким образом, более ранние прогнозы стоимости фотоэлектрической энергии, вероятно, к 2020 г. должны быть пересмотрены, так как 30-процентная эффективность лабораторных фотопреобразователей из монокристаллического кремния в натуральных условиях на солнечных фермах снижается до 20 %. Одним из вариантов использования солнечной энергии является разработка ПТЭО с минимальными затратами солнечной энергии⁶.

3. Эффективность преобразования энергии по сравнению с ценой конечного продукта

Хорошим примером является ПТЭО – преобразование тепловой энергии океана – процесс получения солнечной энергии, который использует разницу между температурой на поверхности тропических морей и температурой на глубине [7]. Этот пример показывает, что производство солнечной энергии посредством ПТЭО в 2006 г., по-видимому, стоит в 2 ÷ 3 раза меньше, чем посредством фотоэлементов.

У ПТЭО общая эффективность преобразования тепла в работу низкая – около 2 ÷ 3 %, что не так важно, поскольку доступной тепловой энергии очень много и стоит она дешево. Но необходимо ответить на вопросы, когда и какова будет стоимость такой энергии (в пригодной для использования форме) в близлежащих городах.

Ввиду приближающегося переломного момента для нефтяной промышленности (2010 г.), большое значение приобретает скорость, с которой должны быть построены новые электростанции⁷ (на самом деле, мнение, высказанное в 2007 г., предполагает, что, возможно, потребуется построить несколько энергетических систем одновременно, чтобы компенсировать дефицит нефти).

4. Цена на электролитический водород, получаемый из ветра, воды и пара

Связь между потенциалом электрохимической ячейки, стоимостью электричества и стоимостью полученного водорода была впервые показана Дерриком Грегори [8] в 1972 г. и подтверждена Бокрисом [9]. Стоимость состоит из двух слагаемых:

$$\text{Стоимость} = A + B. \quad (1)$$

⁶ ПТЭО – преобразование тепловой энергии океана. Данный метод выработки электричества из солнечной энергии использует разность температур в 20 °C между поверхностью тропического моря и на глубине 1 000 м. Несмотря на то что эффективность преобразования энергии низка, очень большая масса теплой воды позволяет установкам ПТЭО осуществлять экономически приемлемое снабжение электричеством, полученным из водорода и т.д.

⁷ Было бы ошибкой полагать, что, согласно первому закону термодинамики, общая энергия топлива, такого как уголь, доступна в качестве основы для работы тепловых двигателей. Энергия от сжигания ископаемого топлива является производной второго закона. Долговечность, например, угля в качестве источника энергии должна, согласно первому закону, включать одну треть на нагрев.

Слагаемое A представляет собой стоимость электроэнергии, используемой для производства определенной единицы (1 ГДж) H_2 . Численное выражение для A (см. ниже) зависит только от применимости законов электролиза Фарадея, которые являются одними из самых надежных законов природы. Значение A действительно и при высокой температуре, так как электролиз водяного пара осуществляется без термической диссоциации в связи с применением ионопроводящей мембраны на цирконий-иттриевой основе $ZrO_2-Y_2O_3$.

Слагаемое B представляет собой совокупность амортизационных расходов на строительство станции вместе со страхованием, техническим обслуживанием и зарплатой технического персонала. Слагаемое B в долларах за МБТЕ (1 ГДж) должно пересматриваться каждый год, потому что оно зависит от процентных ставок, инфляции и т.д. Значение B , рассчитанное на 2006 г., составляет \$2,84 за МБТЕ (1 ГДж). Эта цифра в следующих расчетах округлена до \$3.

Значения выражений в формуле (1) вычисляются следующим образом (на 2006 г.):

$$\text{Стоимость 1 МБТЕ в US\$ } H_2 = 2,29Ec + 3, \quad (2)$$

где E – потенциал ячейки в вольтах [В], используемый в электролизере при плотности тока ячейки $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; a – стоимость электроэнергии, доступной крупному производителю электроэнергии в центах за кВт·ч.

Обычно значение E на современном промышленном производстве функционирующем при комнатной температуре и плотности тока 100 mA cm^{-2} , равна 1,6 В. Такое значение предполагает использование подходящих с точки зрения электрокатализа электродных покрытий и связанную с этим эффективность конверсии.

Для высокотемпературного электролиза (с твердыми электролитами при $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$, $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$) $E = 1,0 \text{ В}$ при 100 mA cm^{-2} .

Для ещё более высоких температур электролиза ($1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_3O_8-Y_2O_3$)⁸ потенциал ячейки составляет: $E = 0,63 \text{ В}$ [11, 12]⁹.

Стоимость водорода, полученного за счёт энергии ветра, во многом зависит от средней скорости ветра в год в ветровых районах. В США средняя скорость ветра составляет около 15 миль/ч, но есть районы, в которых она выше [13].

Для расчета стоимости энергии ветра была взята стандартная средняя скорость ветра в год – 15 миль/ч. Стоимость энергии ветра в диапазоне изменения его

скорости до 20 миль/час¹⁰ обратно пропорциональна скорости ветра в кубе.

Средняя скорость ветра выше над поверхностью моря (ввиду отсутствия препятствий). Скорость ветра, превышающая 20 миль/ч, наблюдается в Антарктике, где есть места, в которых средняя скорость ветра составляет 44 миль/ч в течение девяти месяцев в году [14] (табл. 1 и 2).

Таблица 1
Цена водорода, полученного за счёт энергии ветра со средней скоростью 15 миль/ч, в зависимости от температуры электролиза

Table 1
Price of hydrogen from wind of 15 mph average as a function of the temperature of electrolysis

Температура и соответствующее напряжение на ячейке	Цена 1 МБТЕ из H_2 + стоимость передачи по трубопроводу на 1 000 миль + 25 % прибыль (\$)	Стоимость H_2 согласно первому закону в бензиновом эквиваленте США
25 °C (1,6 В) ^a	26,43	\$3,10
1 000 °C (1,00 В)	23,63	\$2,78
1 500 °C (0,63 В)	17,59	\$2,07

^a Стоимость энергии ветра в этой таблице составляет 4,5 цента за кВт·ч⁻¹, что является самой низкой стоимостью, которая указана Департаментом энергетики (ДЭ) для энергии ветра в 2006 г., соответствующей скорости 15 миль/ч.

Таблица 2
Цена водорода, полученного за счёт энергии ветра и электролиза при 25 °C, в зависимости от двух значений скорости ветра (15 миль/ч и 20 миль/ч)

Table 2
Price of hydrogen from wind and with electrolysis at 25 °C depending on two wind speeds

Доступная скорость ветра (миль в час)	Цена 1 МБТЕ H_2	Цена эквивалента H_2 на 1 галлон бензина
15 (4,5 центов/кВт·ч)	\$26,43	\$3,10
20 (1,89 центов/кВт·ч)	\$15,73	\$1,85

Скорость ветра 20 миль/ч дала бы дополнительно \$1 на амортизацию ветряных турбин^a.

^a Значения стоимости H_2 у Департамента Энергетики в сентябре 2006 г. составляют примерно \$30 за ГДж. Некоторые из наших значений уже ниже этой стоимости, потому что мы включили результаты, основанные на высокотемпературном электролизе (табл. 1) и скорости ветра 20 миль/ч, предполагая, что отношение v^3 все еще сохраняется.

5. Оценка стоимости электроэнергии, получаемой с помощью ветра, в 2006 г.

5.1. Стоимость энергии ветра при 15 милях в час, скорость ветра, определяющая разные температуры электролиза (в частности, с использованием твердых электролитов)

При расчете цены водорода авторы столкнулись с рядом трудностей. Во-первых, американская валюта подвержена инфляции. Несмотря на то что прави-

⁸ Упомянутый здесь высокотемпературный электролиз не имеет ничего общего с термической диссоциацией воды. Это мог бы быть способ для использования водорода, но быстрая рекомбинация затруднительна по сей день [10].

⁹ Оценки стоимости высокотемпературных методов должны быть учтены в приложениях уравнения (2) стоимости тепла. Это примерно треть стоимости экономленной электроэнергии, которая была учтена в стоимости.



тельством заявлены небольшие значения инфляции, в 2006 г. в США наблюдается повсеместный рост цен на товары широкого потребления и т.д.

В связи с этим любой специалист, опираясь на рассчитанные здесь значения, в ближайшие два года должен будет учитывать повышение цен в долларах США. Встречной тенденцией является снижение реальных затрат на энергию ветра, измеряемых в долларах с постоянной покупательной способностью («постоянный доллар»), которые составляли несколько сотен процентов в последние двадцать лет. В постоянных долларах снижение цен, по-видимому, продолжается на 5 ÷ 10 % в год благодаря техническим инновациям.

Таким образом, любая цена на энергию ветра должна также указывать на предполагаемую среднюю скорость ветра (за год) в конкретной местности, предпочтительно на несколько лет. В литературе часто встречаются утверждения о стоимости энергии ветра без каких-либо ссылок на предполагаемую энергию ветра. Энергия ветра равна ωv^3 , где v – средняя скорость ветра за год. Если принять 15 миль/ч в качестве стандарта, то при 12 миль/ч доступная энергия уменьшится на 48 %, а при 18 миль/ч цена снизится на 78 %. Как видно, будут отмечены значительные эргономические различия¹⁰.

В настоящее время (сентябрь 2006 г.) стоимость должна быть принята для стандартной скорости ветра – 15 миль/час. При этом известно, что точное местоположение может изменить это значение на 50 %. Для проведения следующих расчетов¹¹ учитывалась оценка стоимости в сентябре 2006 г. экспертами из НЛВЭ в Голдене, штат Колорадо – 4,5 ÷ 6 центов/кВт·ч [15].

Как уже отмечалось, ввиду непрерывного снижения стоимости энергии ветра при постоянном курсе доллара, в альтернативных ценовых предложениях было принято более низкое значение (которое, ко-

¹⁰ Изменение конечной цены водорода не пропорционально v^3 . Это цена на электроэнергию, которая таким образом регулируется и влияет на цену водорода, некоторые элементы которой, однако, не зависят от температуры или скорости ветра. Одним из способов снижения цены на водород, которым часто пренебрегают, является использование тепла, вырабатываемого при электролизе (комбинированное тепло и мощность). Хотя эффективность электролиза не может быть более 65 %, ее можно повысить до 90 %, если использовать выработанное тепло, например, для подогрева воды в домашнем хозяйстве.

¹¹ Если вернуться к первоначальной формуле, при мощности ветровой турбины на единицу площади, эта мощность = $\frac{16}{27} \frac{1}{2} C_p v^3$.

Здесь v^3 – среднегодовое значение куба скорости ветра; ρ – плотность воздуха; C_p – коэффициент эффективности.

Для уравнения требуется среднее значение кубов скорости ветра за обычный год в определенном месте. В основном берут среднегодовое (т.е. среднее) значение скорости ветра в кубе, что дает значение в 2–3 раза меньше. Однако это почти компенсируется тем фактом, что многие расчеты принимают КПД равным 1, хотя он составляет $\sim \frac{1}{3} - \frac{1}{2}$. Таким образом, если взять КПД равным примерно 1 и куб среднего значения скорости ветра, который дает значение около 1/2 от правильного, то при таких грубых подсчетах происходит компенсация за счет использования куба среднего значения скорости ветра, а не среднего значения кубов скоростей ветра.

нечно, будет увеличиваться с падением курса доллара США).

Конечная цена H_2 , получаемого на ветродородной установке с электролизером, зависит от потенциала и плотности тока, то есть удельной скорости процесса электролиза, в ходе которого получают водород. Следует отметить, что с 1980-х гг. методы электролиза совершенствовались, о чём специалисты в области ветровой электроэнергетики мало осведомлены. Существует несколько способов снижения стоимости электролиза и, следовательно, цены на водород. Например, именно перенапряжение при выделении кислорода приводит к тому, что в водородно-кислородной ячейке потенциал становится очень высоким.

Если бы при этих процессах на аноде вырабатывали бром, а не кислород, потенциал ячеек, а следовательно, и стоимость электричества, упала бы примерно на 25 %¹².

Однако лишь процесс электролиза при температуре 1 000 °С и с мембранами $ZrO_2Y_2O_3$ может считаться «рабочим». Электролиз при 1 500 °С известен из описаний в двух статьях, в которых зафиксирован опыт с ионопроводящим твердым электролитом $U_3O_8-Y_2O_3$ под тщательным наблюдением научных сотрудников. На оксидно-урановых мембранах не было явных признаков ухудшения состояния, хотя срок их использования составлял лишь 12 недель, и мембрана нагревалась до высокой температуры за меньшее время. Следует отметить, что в США могут существовать юридические препятствия для использования урановых соединений.

6. Способ проведения расчетов

Стоимость электроэнергии для 1 МБТЕ (1 ГДж) в $US\$ = 2,29Ec$, где E – потенциал ячейки, В; c – стоимость кВт·ч электричества в центах [17]. Значение E включает КПД электролитического процесса вместе с малыми потерями в IR^{13} в мембране.

К этому добавляется (при высокотемпературном электролизе) \$4,49 для покрытия (за 2006 г.) амортизационных, страховых и эксплуатационных расходов, пропорционально выработке 1 ГДж. Эта цифра зависит от процентных ставок и должна пересчитываться ежегодно (пропорционально количе-

¹² Одним из способов снижения затрат на производство водорода (помимо использования тепла) является предотвращение выделения O_2 . Cl_2 более легко выделяется в воде, чем O_2 . В больших масштабах его можно сбросить в морскую воду. Несколько недорогих добавок к раствору (например, SO_2) позволяют сэкономить 30–40 % стоимости при образовании на аноде SO_4^- при электролизе воды по сравнению с электролизом для получения кислорода. Суперэлектролизер, разработанный Мерфи и Гутманом [16] в 1983 г. был рассчитан на 1,0 В для 10 А см² (или 0,8 В для 100 мА см⁻²). При комнатной температуре использование разработки Мерфи и Гутмана позволило бы сохранить более 50 % стоимости электричества при электролизе водорода.

¹³ I – сила тока через ячейку; R – сопротивление между двумя сторонами мембраны.

ству произведенной энергии, 1 ГДж). Помимо этого, добавляются затраты на передачу газообразного H_2 более чем на 1 000 миль, что на 2006 г. оценивается в \$ 1,66 [18].

Наконец, полученная цифра умножается на 1,25, для того чтобы определить 25 % прибыль.

Теперь для работы при более высоких температурах необходимо рекуперировать нагрев для поддержания системы, например, до 1 000 °С и до 1 500 °С соответственно. Это было сделано простым способом. Вначале была отмечена разница между потенциалами ячейки при высокой и комнатной температуре. Затем задействовано эмпирическое правило: тепло примерно на треть дешевле электроэнергии. Таким образом, к напряжению ячейки добавляется одна треть разности потенциалов, используемой при 100 мА см⁻² и высоких и низких температурах. Как при высокой, так и низкой температуре один и тот же заряд передается таким образом, что добавление эквивалентного потенциала для одного и того же процесса (тот же заряд) эквивалентно увеличению энергии, представляющей используемое тепло.

7. Стоимость солнечной электроэнергии

Стоимость солнечной энергии снизилась за последние несколько десятилетий [21]. Однако, в то время как энергия ветра и получаемый из неё водород стали дешевле, чем традиционные загрязняющие окружающую среду виды энергии, солнечная энергия, получаемая с помощью фотоэлектрических устройств, стоит все еще слишком дорого для того, чтобы использовать ее в больших масштабах¹⁴. При этом стоимость солнечной энергии, получаемой с помощью фотоэлектрических устройств, напрямую зависит от эффективности преобразования солнечного света в электричество [19, 20].

Стоимость фотоэлементов складывается из нескольких компонентов: не только материала фотоэлементов (ФЭ), но и материала контейнеров, электрических сетей и инфраструктуры.

При написании этой части статьи по солнечному водороду [22] мы были вынуждены опираться на ценовые прогнозы на 15 лет вперед (2021 г.), сделанные экспертами из Департамента Энергетики США (DOE) и др. [19, 23, 24]. Вероятно, цена на фотоэлектрическую энергию в 10 центов/кВт·ч (валюта 2006 г.) может быть достигнута только в случае массового использования больших поликристаллических матриц (преобразование 20 %). Эффективность преобразования в 15 % должна привести к 13,3 цента за

кВт·ч⁻¹ [19] к 2021 г. (следует обратить внимание на то, что улучшение характеристик монокристаллического кремния > 20 % уравнивается ростом цены) (табл. 3).

Инфляция может увеличить стоимость, хотя стоимость солнечных батарей в долларах 2006 г., вероятно, значительно сократится¹⁵.

Прогнозировать уровень инфляции рискованно, поскольку по заявлениям правительства её уровень оказывается меньше наблюдаемого роста цен во всех отраслях экономики. Предположим, по самым скромным подсчётам, что средний уровень инфляции в течение следующих 15 лет составит 5 % в год, а стоимость электроэнергии, эквивалентная 10 центам/кВт·ч (в \$ 2006 г.), через 15 лет и без технических улучшений – $(1 + \frac{5}{100})^{15} = 2,07$, то есть вырастет примерно до 20 центов/кВт·ч.

Эти наблюдения подчеркивают необходимость разработки технологий солнечно-тепловой энергии и ПТЭО параллельно с работой по снижению затрат на фотоэлектрические элементы. Системный анализ показывает, что солнечная энергия от ПТЭО будет составлять от $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{3}$ стоимости использования ФЭ (оба значения определены для аналогичного времени и также в долларах США 2006 г.) [25]. В связи с актуальностью ПТЭО необходима ее апробация путем строительства большой установки и проверки предполагаемых показателей.

Государственная политика развития угольной и атомной энергетики сталкивается с хорошо известными трудностями использования угля¹⁶, которые в настоящее время значительно усугубляются угрозой выброса CH_4 из тундры (метан в 23 раза увеличивает парниковый эффект из-за CO_2). Атомная энергетика (если учитывать затраты на вывоз отходов и их захоронение) в два раза дороже ветряных, геотермальных и приливных источников (и, возможно, других возобновляемых источников энергии). Эти возобновляемые источники энергии не только дешевле тех, которые нынешнее правительство планирует развивать, – они неисчерпаемы и чисты. В то время как ядерные источники энергии по своей природе радиоактивны (отходы), и, что важно, урановая руда закончится, как и нефть!

Для синтеза необходимой энергии для США под действием солнечного света в сахарном тростнике нужно значительно больше пространства, чем все имеющиеся сельскохозяйственные земли США. А для перегонки и ректификации зерновых могут потребоваться ископаемые виды топлива [26–29].¹⁷

¹⁴ Наконец, эти утверждения обычно относятся к обсуждаемым солнечным фотоэлементам. Существуют и другие способы преобразования солнечной энергии в полезную энергию, и при системном анализе метод ПТЭО часто оказывается дешевле, чем энергия ФЭ (не подвержены суточным колебаниям). Тем не менее исследование моря в качестве источника энергии не получали от правительства финансовой поддержки в течение многих лет (но см. недавнюю работу Ван Рызина и др. [7], которая предлагает широкое использование ПТЭО).

¹⁵ Показатели окупаемости высокотемпературного электролиза отсутствуют, работа продолжается уже шесть лет. Электролизеры при комнатной температуре функционируют дольше (30–40 лет), если электроды не оснащены электрокатализаторами. Если современные ячейки используются с электрокатализаторами, то срок их службы может снизиться до трех лет. Однако катализаторы формируются посредством электроимпульсной обработки и очень тонких слоев, так что восстановление будет недорогим.

¹⁶ В дополнение к прогнозам об увеличении CO_2 (и даже CH_4) широкое использование угля потребует увеличения числа шахт.



Однако нельзя допустить, чтобы использование жидкого топлива увеличило опасность затопления

наших прибрежных городов и выброса метана в тундре.

Таблица 3

Прогнозируемая стоимость солнечного водорода в долларах (2006 г.) к 2021 г.^a

Table 3

Projected cost of solar hydrogen in 2006 \$ in 2021^a

С переменными затратами температуры электролиза				
Потенциал ячейки 100 мА см ⁻²	Стоимость МБТЕ H ₂ , ε = 15 % 13 центов/кВт·ч ⁻¹ (2006\$)	Стоимость МБТЕ H ₂ , ε = 20 % 10 центов/кВт·ч ⁻¹ (2006\$)	Стоимость H ₂ = 1 галлон в бензиновом эквиваленте ε = 15 %	Стоимость H ₂ = 1 галлон в бензиновом эквиваленте ε = 20 % ^b
1,6 V (25 °C)	\$66,73	\$51,62	\$8	\$6
1,0 V (1 000 °C)	\$53,37	\$42,03	\$6	\$5
0,63 V (1 500 °C)	\$44,23	\$35,16	\$5	\$4

ε = эффективность преобразования солнечного света в электричество.

^a Эти затраты хорошо обоснованы. Фактические значения в 2021 г. будут зависеть от инфляции, но уже сейчас можно сделать прогноз. Строительство солнечных ферм, создание преобразователей для производства водорода, в котором хранится солнечная энергия и др., займет не менее 15 лет. Они могут быть заменены менее дорогими установками ПТЭО.

^b К стоимости количества H₂ 1 МБТЕ: 229 \$c + 4 – была добавлена одна треть потенциальной разницы, вызванной изменением температуры, для того чтобы учесть стоимость тепла и \$ 1,66 для транспортировки 1 МБТЕ H₂ по трубам на 1 000 миль; вместе с 25 % от общих затрат на прибыль. Долларовая стоимость водорода, эквивалентная 1 гал. бензина, была округлена до 50 центов (больше расчетных значений).

Таким образом, следует быстрыми темпами развивать только возобновляемые источники энергии, что уменьшит опасность нехватки энергии для нашего населения.

8. Будущее

В будущем будут использоваться два носителя энергии: электричество на расстояние до 1 000 миль от источника и водород на гораздо большее расстояние, а также для хранения периодически доступной энергии (например, ветра, волн, приливов и солнца).

Существуют источники неиссякаемой энергии, которые нуждаются в разработке, и наиболее перспективным являются петротермальные источники, которые могут быть реализованы в большинстве равнинных районов любой страны. Всё зависит от повышения температуры 40-мильной подстилающей горной породы, на которой мы живем. На глубине около 5 миль температура этой породы превышает температуру кипения воды.

Существует несколько аспектов гравитации (например, приливы), которые могут быть задействованы. Для того чтобы использовать прилив в качестве источника энергии, перепад высот приливов и отливов должен составлять 10 футов и более [24]. Кроме того, должна быть подходящая водосборная площадь с диффузором, куда вода поступает из моря во время прилива. Турбины в диффузоре преобразовывают энергию в электричество в обоих направлениях подачи. В настоящее время в рассматриваемых районах используются естественные географические образования, но, при условии наличия достаточной разницы между приливами и отливами, накопительный

бассейн может быть спроектирован в любых незаселенных районах. Транспортировка энергии на большие расстояния возможна путем преобразования приливного электричества в водород, который затем может храниться или передаваться по трубам на большие расстояния.

Все эти неисчерпаемые источники энергии могут быть превращены в чистую энергию и обеспечить огромное население, которое сейчас живет на планете. Необходимо только ответить на очень важный вопрос – можно ли своевременно развить эти источники до достаточного уровня, чтобы справиться с падением нефтедобычи, которое, по всей видимости, мы начнем ощущать менее чем через десять лет.

9. Заключение

В данной статье, в связи с естественно имеющимися сложностями в аргументации, были приняты завышенные значения стоимости обсуждаемых альтернативных энергетических систем. Тем не менее, для того чтобы помочь читателю составить свое мнение о статье, будут представлены два важных момента.

1. Затраты на амортизацию в условиях высокой температуры были приняты в два раза выше, чем при комнатной температуре, что полностью основано на шестилетних лабораторных исследованиях, в течение которых высокотемпературное оборудование с изменяющейся во времени температурой «горячих» мембран эксплуатировалось только половину рабочего дня.

2. Самые чувствительные зоны при работе с высокотемпературным паром – это, конечно, ионопро-



водящие мембраны. Не отмечалось никакого ухудшения, но при этом, как указывалось выше, работа оборудования в течение года не была непрерывной.

Авторы попытались представить данные и расчёты стоимости, которые могут оказаться полезными для тех, кто желает обеспечить население неисчерпаемой, полностью чистой энергией. Однако предполагается, что коммерциализация ветро-водородного производства приведет к затратам, которые не были учтены, например, страхование производственного оборудования и т.д. Тем не менее представленный вариант ветро-водородного производства имеет свои основания, поскольку предлагает лучшую экономику для неисчерпаемого чистого топлива.

Результаты применения солнечных батарей на фотоэлементах, даже при проектировании до 2021 г., предполагают гораздо большие затраты, чем схема с использованием энергии ветра. При этом не вполне очевидно, но солнечная тепловая энергия намного дешевле, чем солнечная ФЭ, а ПТЭО – несмотря на то что еще не было построено крупномасштабных установок – возможно, ещё выгоднее (в частности, благодаря круглосуточной работе по сравнению с 6 часами в других методах; кроме того, ПТЭО подразумевает масштабное опреснение морской воды).

Благодарности

Большую помощь нам оказали коллеги, которые предоставили информацию о затратах на синтез водорода при использовании как энергии ветра, так и солнечной энергии (ФЭ). Среди них: Гюстав Гроб, Международный энергетический консорциум, Моргарцен-Цуг, Швейцария, который держал нас в курсе по поводу альтернативы аккумуляторам, особенно по части электрохимических конденсаторов; г-жа Луиза Ги-ли, Министерство энергетики, Управление по энергетической информации, Вашингтон, округ Колумбия, стоимость энергии ветра; Х.Х. Хьюитт, Департамент энергетики, Управление по энергетической информации, Вашингтон, округ Колумбия, стоимость передачи и удаления отходов для ядерных реакторов; Дж. Джонсон, Отдел ветроэнергетики, Департамент энергетики, Вашингтон, округ Колумбия, прогнозируемая стоимость фотоэлектрической энергии в течение пятнадцати лет; Доктор Гуан Лин, Соларекс (в отставке), Филадельфия, Пенсильвания, стоимость фотоэлектрической энергии; профессор Питер Швертфегер, бывший профессор наук о Земле, Университет Флиндерс в Южной Австралии, о ветрах в Антарктике; Джон А. Тернер, Национальная Лаборатория возобновляемых источников энергии, Голден, Колорадо, о водороде при прямом разложении воды солнцем (электрохимическое).

Acknowledgments

We had much help from colleagues who yielded information concerning costs both of wind and solar (pv) synthesis of hydrogen. Among these were: Gustav Grob, International Clean Energy Consortium, Morgarten-Zug, Switzerland who has kept us aware of battery alternatives, particularly the electrochemical capacitors; Ms. Louise Guey-Lee, Department of

Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, cost of wind power; H.H. Hewett, Department of Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, cost of devolution and waste removal for fission reactors; J. Johnson, Wind Section, Department of Energy, Washington, DC, projected cost of photovoltaic energy projected forward for fifteen years; Dr. Guang Lin, Solarex (retired), Philadelphia, PA, Cost of photovoltaics; Professor Peter Schwertfeger, formerly Professor of Earth Sciences, Flinders University of South Australia, on winds in Antarctica; John A. Turner, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, on hydrogen through solar direct decomposition of water: Electrochemical.

Список литературы

- [1] Laherre's Oil Production Forecast, 1950–2150. Reprinted with permission from correspondence with William Horvath, U.S. Department of Energy, March 29, 2001.
- [2] Nejat Veziroglu T., Awad A.H. Int. J. Hydrogen Energy, 1984;9:355.
- [3] Simmons M.R. Twilight in the desert. New York: Wiley; 2005 p. 348.
- [4] Letter from H. Horvath, A Correspondent of the Department of Energy, July, 2006.
- [5] A quotation from Romm J.J. In: The hype about hydrogen. Island Press, 2004. p. 86.
- [6] E.J. Campbell Quoted by Legget B.J. In: The empty tank. New York: Random House; 2005.
- [7] The Hydrogen Economy of 2050: OTEC Driven, Joe Van Ryzin, Patrick Grandelli, David Lip, Richard Argall, 2005, 2006. <http://www.clubdesargonauts.org/energie/hydrogene.pdf>
- [8] Gregory D.D., Ng D.Y.C., Long G.M. On the electrochemistry of cleaner environments. New York: Plenum; 1972.
- [9] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halsted Press; 1980 p. 148–56.
- [10] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halsted Press; 1980 p. 311–14.
- [11] Bockris J.O'M, Bevan J., Badwall S. Electrode kinetics of evolution and dissolution of oxygen at Urania-Zirconia interfaces. Acta Electrochim 1980;25:115.
- [12] Pound B.G., Bevan D.J.M., Bockris J.O'M. Electrolysis of steam during uranium oxide electrodes. Int. J. Hydrogen 1980;6:473.
- [13] Feller G. Wind, waves & tides economically viable energy from the World's Oceans, August 9, 2003, Ecoworld; Economics of Wind Energy, February, 2005, American Wind Energy Association; <http://en.wikipedia.org/wiki/windenergyJuly/August2006>.
- [14] Professor Peter Schwertfeger, former member of Australian Group in the Antarctic, private communication August 8, 2006; http://globe-net.ca/market_reports/index.cfm?ID_Report=762July/August2006.
- [15] Wind Energy Manual—Wind and Wind Power, Iowa Energy Center, 2006, http://www.energy.iastate.edu/renewable/wind/wem/wem-08_power.html



- [16] Murphy O., Gutman F. Electrochemical splitting of water. In: White R, Bockris JO'M, Conway BE, editors. Modern aspects of electrochemistry, vol. 15. New York: Plenum Press; 1983. p. 1–82 [chapter 1].
- [17] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halstead Press; 1980, p. 295.
- [18] Reynolds R.A., Slager W.L. Theme, 1974; 521.
- [19] Private communications from Dr. G. Lin on cost/kwh. as a function of efficiency in pv, 2006.
- [20] Sano S.K., Metsada M., Kuelm K., Mishimoto J., Ogawa I., Kajitu K. Proceedings of the second world conference P.V. solar energy conversion, 6–10 July, 1998. p. 351.
- [21] Nejat Veziroglu T., Bockris J.O'M. A solar-hydrogen economy for the USA, vol. 8, 1983. p. 323.
- [22] Bockris J.O'M. Int. J. Hydrogen Energy, 2002;27:731.
- [23] Lin G., Carlson D.E. Int. J. Hydrogen Energy, 2000;25:807
http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion.
- [24] Wave Energy As a Preferred Renewable Energy and The Economics of Wave Energy Energetech, August 2006.
<http://energetech.com.au:8080/index.htm?http://www.energetech.com.au/content/market.html>
- [25] Vega L. Survey of OTEC, encyclopedia of energy, technology, and the environment, 2005.
- [26] Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel production using soybean and sunflower. In: Pimentel D, Patzek H, editors. Natural Resources Research, vol. 14(1), March 2005.
- [27] Pimentel D., Patzek H., Cecil P., editors. Ethanol production: energy economic and environmental losses.
- [28] Pimentel D., Patzek H. Editorial: green plants, fossil fuels, and now biofuels. Bioscience, 2006;56(11):875.
- [29] Pimentel D. Rev Environ Contam Toxicol, 2007;189:25–41.



Welcome to ICEPP 2018

We welcome your participation and contribution to the 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention (ICEPP 2018) to be held in Brisbane, Australia during December 6–8, 2018.

In the coming decades, the world Environmental Systems will face huge challenges. The influence factors include on-going growth of the world population, the limited availability of natural resources and climate change. Due to this reason, 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention, as one of the premier forum for presenting developments in Environmental Systems Research, aimed to bring together leading scientists, researchers around the world to discuss the priority topics for Environment Pollution and Prevention in recent years

The conference programme will include prominent keynote speakers, plenary speakers, invited speakers and regular paper presentations in parallel tracks. The General Chairs, along with the entire team cordially invite you to submit your latest research results and to take part in the upcoming conference, to be held during December 6-8, 2018 in Brisbane, Australia.

General Chairs – ICEPP 2018

Paper Publication

All accepted papers fulfilling requirements on quality will be published in **International Conference Proceedings**. It is mandatory that at least one author registers and presents for every paper that is included in the conference proceedings. The Conference Proceedings which will be indexed by **EI Compendex** and submitted to be reviewed by SCOPUS.

For those who do not willing to publish papers can submit abstract. The accepted abstract can be presented in the conference as Presentation Only.

Prospective authors are kindly invited to submit full papers/abstracts(.pdf) via Electronic Submission System or send the submission to icepp@cbees.net.

- [16] Murphy O., Gutman F. Electrochemical splitting of water. In: White R, Bockris JO'M, Conway BE, editors. Modern aspects of electrochemistry, vol. 15. New York: Plenum Press; 1983. p. 1–82 [chapter 1].
- [17] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halstead Press; 1980, p. 295.
- [18] Reynolds R.A., Slager W.L. Theme, 1974; 521.
- [19] Private communications from Dr. G. Lin on cost/kwh. as a function of efficiency in pv, 2006.
- [20] Sano S.K., Metsada M., Kuelm K., Mishimoto J., Ogawa I., Kajitu K. Proceedings of the second world conference P.V. solar energy conversion, 6–10 July, 1998. p. 351.
- [21] Nejat Veziroglu T., Bockris J.O'M. A solar-hydrogen economy for the USA, vol. 8, 1983. p. 323.
- [22] Bockris J.O'M. Int. J. Hydrogen Energy, 2002;27:731.
- [23] Lin G., Carlson D.E. Int. J. Hydrogen Energy, 2000;25:807
http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion.
- [24] Wave Energy As a Preferred Renewable Energy and The Economics of Wave Energy Energetech, August 2006.
<http://energetech.com.au:8080/index.htm?http://www.energetech.com.au/content/market.html>
- [25] Vega L. Survey of OTEC, encyclopedia of energy, technology, and the environment, 2005.
- [26] Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel production using soybean and sunflower. In: Pimentel D, Patzek H, editors. Natural Resources Research, vol. 14(1), March 2005.
- [27] Pimentel D., Patzek H., Cecil P., editors. Ethanol production: energy economic and environmental losses.
- [28] Pimentel D., Patzek H. Editorial: green plants, fossil fuels, and now biofuels. Bioscience, 2006;56(11):875.
- [29] Pimentel D. Rev Environ Contam Toxicol, 2007;189:25–41.



Welcome to ICEPP 2018

We welcome your participation and contribution to the 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention (ICEPP 2018) to be held in Brisbane, Australia during December 6–8, 2018.

In the coming decades, the world Environmental Systems will face huge challenges. The influence factors include on-going growth of the world population, the limited availability of natural resources and climate change. Due to this reason, 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention, as one of the premier forum for presenting developments in Environmental Systems Research, aimed to bring together leading scientists, researchers around the world to discuss the priority topics for Environment Pollution and Prevention in recent years

The conference programme will include prominent keynote speakers, plenary speakers, invited speakers and regular paper presentations in parallel tracks. The General Chairs, along with the entire team cordially invite you to submit your latest research results and to take part in the upcoming conference, to be held during December 6-8, 2018 in Brisbane, Australia.

General Chairs – ICEPP 2018

Paper Publication

All accepted papers fulfilling requirements on quality will be published in **International Conference Proceedings**. It is mandatory that at least one author registers and presents for every paper that is included in the conference proceedings. The Conference Proceedings which will be indexed by **EI Compendex** and submitted to be reviewed by SCOPUS.

For those who do not willing to publish papers can submit abstract. The accepted abstract can be presented in the conference as Presentation Only.

Prospective authors are kindly invited to submit full papers/abstracts(.pdf) via Electronic Submission System or send the submission to icepp@cbees.net.

ХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОТОННЫХ ПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ И La_6WO_{12} К CO_2 *

Д.В. Корона, Г.С. Партин, И.Е. Анимица, А.Р. Шарафутдинов

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия
тел./факс: +7(343)375-95-51; e-mail: D.V.Korona@urfu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.043-059

Заключение совета рецензентов: 21.07.17 Заключение совета экспертов: 15.11.17 Принято к публикации: 27.02.18

Для создания эффективного топливного элемента на базе высокотемпературного протонного проводника необходимо разработать долговечный протонный электролит. В общем случае долговременная химическая устойчивость фазы к CO_2 обусловлена термодинамикой (невозможность реакции) или кинетикой взаимодействия (замедление реакции). В данной работе проведено сравнение химической устойчивости по отношению к CO_2 (как термодинамической, так и связанной с кинетическими затруднениями) перспективных высокотемпературных протонных проводников на базе двойного перовскита $Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb_2O_{11}$ ($x = 0,4; 0; -0,4$) и двойного флюорита $La_{6-x}WO_{12-1,5}$ ($x = 0,4; 0,6; 0,8; 1$).

Температура устойчивости к CO_2 (выше которой фаза стабильна к CO_2 , ниже которой фаза взаимодействует с CO_2) является важной технической характеристикой термодинамической устойчивости фазы к CO_2 : чем ниже температура устойчивости, тем стабильнее фаза к CO_2 . В работе применялись методы твердофазного синтеза, РФА, термогравиметрии с масс-спектрометрией и для измерения электропроводности – метод импеданса. Установлено, что материалы на базе La_6WO_{12} относительно термодинамически устойчивы в обычном воздухе с CO_2 (10^{-3} атм) в рабочем диапазоне 650–1 000 °С (верхняя граница рабочих температур твердооксидного топливного элемента составляет 1 000 °С). Фазы на основе $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ устойчивы к CO_2 в воздухе в диапазоне 850–1000 °С. Для того чтобы материал использовался в условиях его термодинамической стабильности, требуется температура устойчивости ниже рабочей температуры (400–700 °С). Таким образом, фазы на основе $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ термодинамически неустойчивы к CO_2 при 700 °С, а фазы на основе La_6WO_{12} устойчивы при 700 °С.

При отсутствии термодинамической устойчивости фазы в некоторых случаях может проявляться связанная с кинетическими затруднениями устойчивость данной фазы к CO_2 , достаточно долговременная для практического использования. Например, возможно образование сплошного блокирующего диффузию поверхностного слоя продуктов взаимодействия с CO_2 (карбонатов Ba, Ca, La) на границе зерен основной фазы. Наблюдаемое для исследованных образцов увеличение зернограничного сопротивления может быть связано с образованием поверхностного слоя продуктов взаимодействия с CO_2 . Для керамических образцов $La_{6-x}WO_{12-1,5x}$ ($x = 0,4; 0,6; 0,8; 1$) показано, что зернограничное и электродное сопротивление после выдержки 30 суток при 200 °С во влажном атмосферном воздухе (CO_2 10^{-3} атм) возрастает примерно в 3 раза при 800 °С и в 10 раз при 400 °С.

Ключевые слова: высокотемпературные протонные проводники; химическая устойчивость; термогравиметрия; электрохимический импеданс; углекислый газ; двойной перовскит; двойной флюорит.

CHEMICAL CO_2 -RESISTIVITY OF PROTON CONDUCTORS ON BASE OF $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ AND La_6WO_{12}

D. V. Korona, G. S. Partin, I. E. Animitsa, A. R. Sharafutdinov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira St., Yekaterinburg, 620002, Russia
tel./fax: +7(343)375 95 51, e-mail: D.V.Korona@urfu.ru

*Корона Д.В., Партин Г.С., Анимица И.Е., Шарафутдинов А.Р. Химическая устойчивость протонных проводников на основе $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ и La_6WO_{12} к CO_2 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):43-59.

In order to create an efficient fuel cell based on a high-temperature proton conductor, it is necessary to develop a long-lived proton electrolyte. In the general case, the long-term chemical stability of the phase to CO₂ is provided by thermodynamics (impossibility of reaction) or interaction kinetics (slowing down of the reaction). The paper compares the chemical stability with respect to CO₂ (both thermodynamic and related to kinetic difficulties) for promising high-temperature proton conductors based on double perovskite Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁ (x = 0.4; 0; -0.4) and double fluorite La_{6-x}WO_{12-1.5x} (x = 0.4, 0.6, 0.8, 1). The temperature of resistance to CO₂ (above which the phase is stable to CO₂, below which the phase interacts with CO₂) is an important technical characteristic of the thermodynamic stability of the phase to CO₂. The upper limit of the operating temperatures of the solid oxide fuel cell is 1,000°C. When the temperature of stability is the lower, then the phase is more stable to CO₂. We use solid-phase synthesis, X-ray diffraction, thermogravimetry with mass spectrometry and conductivity measurement by the impedance method. It is established that materials based on La₆WO₁₂ are relatively thermodynamically stable in ordinary air with CO₂ (10⁻³ bar) in the operating range of 650–1,000 °C. The phases based on Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁ are resistant to CO₂ in the air in the range of 850–1,000 °C. In order to use the material in conditions of its thermodynamic stability, the stability temperature is required to be below the operating temperature (400–700 °C). Thus, phases based on Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁ are thermodynamically unstable to CO₂ at 700°C, and phases based on La₆WO₁₂ are stable at 700°C. In the absence of thermodynamic stability of the phase, stability of this phase to CO₂, associated with the kinetic difficulties, may be revealed in some cases, which is sufficiently long-term for practical use. For example, it is possible to form a continuous diffusion-blocking surface layer of products of interaction with CO₂ (Ba, Ca, La carbonates) at the grain boundary of the main phase. The increase in the grain-boundary resistance observed for the studied samples may indicate the formation of a surface layer of products of interaction with CO₂. For ceramic samples La_{6-x}WO_{12-1.5x} (x = 0.4, 0.6, 0.8, 1), the grain-boundary and electrode resistance after aging for 30 days at 200°C in moist atmospheric air (CO₂ 10⁻³ bar) is shown to increase approximately 3 times at 800°C and 10 times at 400 °C.

Keywords: high temperature proton conductors; chemical stability; thermogravimetry; electrochemical impedance; carbon dioxide; double perovskite; double fluorite.



Даниил Валентинович
Корона
Daniil Korona

Сведения об авторе младший научный сотрудник отдела химического материаловедения научно-исследовательского института физики и прикладной математики Института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Образование: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, химик (2003 г.).

Область научных интересов: высокотемпературная протонная проводимость в сложных оксидах.

Публикации: 8.

h-index: 4

ORCID: 0000-0001-5422-717X

Сведения об авторе аспирант, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Образование: Уральский государственный университет, химик (2015 г.).

Область научных интересов: высокотемпературная протонная проводимость в сложных оксидах.

Публикации: 3.

h-index: 1



Григорий Сергеевич
Партин
Grigory Partin

Information about the author:

Junior Researcher of the Department of Chemical Materials Science of the Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Education: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chemist, 2003.

Research interests: high-temperature proton conductivity in complex oxides.

Publications: 8.

Information about the author:

Postgraduate, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Education: Ural State University, Chemist, 2015.

Research interests: high-temperature proton conductivity in complex oxides.

Publications: 3.



Ирина Евгеньевна
Анимитца
Irina Animitsa

Сведения об авторе: д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Образование: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, химик (1987 г.).

Область научных интересов: высокотемпературная протонная проводимость в сложных оксидах.

Публикации: 67.

h-index: 13

ORCID: 0000-0002-0757-9241

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Education: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chemist, 1987.

Research interests: high-temperature proton conductivity in complex oxides.

Publications: 67.



Альберт Рашитович
Шарафутдинов
Albert Sharafutdinov

Сведения об авторе: канд. хим. наук, научный сотрудник, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Образование: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, химик (1983 г.).

Область научных интересов: высокотемпературная протонная проводимость в сложных оксидах.

Публикации: 14.

h-index: 8

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Researcher, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Education: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, chemist, 1983.

Research interests: high-temperature proton conductivity in complex oxides.

Publications: 14.



1. Введение

В настоящее время широкому применению высокотемпературных протонных проводников (ВТПП) в твердооксидных топливных элементах препятствует их низкая химическая стабильность, поэтому данной проблеме уделяется повышенное внимание [1–12]. Например, взаимодействие ВаСеО₃ с углекислым газом происходит при $P(\text{CO}_2) = 1$ атм ниже 1 000 °С, а SrZrO₃ – ниже 500 °С [1]. В работе [2] одной из причин низкой химической устойчивости ВТПП к кислотным газам (СО₂, Н₂С) называется высокая основность фазы ВТПП, в частности [1], обусловленная присутствием в составе сложного оксида щелочно-земельных металлов (ЩЗМ). В этой связи предлагается несколько решений проблемы повышения устойчивости (часто за счет снижения электропроводности): 1) замещение атомов в В-подсетке АВО₃ (например, ВаСе_{1-х}М_хО_{3-δ}) на более электроотрицательный элемент (М=Тi, Zr [3–5], Sn [6], Р [7], Pr [8], Nb, Та [9]); 2) замещение ЩЗМ в перовскитоподобной структуре на редкоземельные элементы (Ва_{1-х}La_хIn₂O_{5+0,5х} [13], LaSrMg_хNb_{1-х}O_{3-δ} [1], LaScO₃ [14]); 3) использование в качестве ВТПП неперовскитных оксидов (La₆WO₁₂ [15], La₂Zr₂O₇ [16], LaNbO₄ [17]); 4) образование композитов на основе неустойчивых к СО₂ протонопроводящих фаз (ВаСеО_{3-δ}) с добавкой устойчивых фаз (УРО₄ [2], Na₃PO₄ [18], Li₂CO₃ и Na₂CO₃ [19]). При этом следует отметить, что допирование [3–9] фазы церата бария повышает ее термодинамическую устойчивость, а получение композитов [2, 19] только замедляет ки-

нетику взаимодействия церата бария с СО₂ и Н₂О. Поскольку допированный церат бария ВаСе_{0,9}У_{0,1}О_{3-δ} известен как один из лучших высокотемпературных протонных проводников по проводимости (~10⁻² См/см при 600 °С [17]) и спекаемости керамики, но с низкой устойчивостью к СО₂, значительные усилия направлены на повышение стабильности церата бария. Получение композитов в приведенных работах не привело к повышению протонной проводимости ВаСе_{0,9}У_{0,1}О_{3-δ}, однако повысилась химическая устойчивость.

В свою очередь номинально высокая устойчивость цирконата бария Ва(Zr_{1-х}У_х)О_{3-δ} [18] на воздухе сочетается с высоким сопротивлением границ зерен. Решение данной проблемы также может быть связано с повышением устойчивости к поверхностному взаимодействию с СО₂. В большинстве случаев для оценки химической устойчивости материала в условиях высокой активности СО₂ и Н₂О в литературе исследуется изменение химического состава образца с помощью рентгенофазового анализа (РФА). При этом следует отметить недостаточную точность обнаружения примесных фаз методом РФА (1 ÷ 5 % примесной фазы), особенно в случае аморфной примеси на поверхности и границах зерен. В частности, в работе [20] результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии интерпретировались как доказательство наличия аморфного ВаTiO₃ и ВаСО₃. Подобные примеси, которые не удается определить посредством РФА, могут значительно снижать проводимость. В результате для Ва(Zr_{1-х}У_х)О_{3-0,5х} протонная проводимость за счет низкой зернограничной

проводимости оказывается ниже на 2 порядка, например, при 600 °С объемная проводимость составляет $\sim 10^{-2}$ См/см [17], а лимитирующая общую проводимость (и ограничивающая тем самым применение) зернограничная проводимость – $\sim 10^{-4}$ См/см [21].

Для развития материаловедческого поиска новых фаз с оптимальным сочетанием высокой проводимости и химической стойкости представляет интерес исследование фаз на основе $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ и La_6WO_{12} , известных достаточно высокой протонной проводимостью – 10^{-3} См/см при 500 °С. Таким образом, авторами данной работы была поставлена цель исследовать

возможности повышения устойчивости при варьировании состава перовскита $Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb_2O_{11}$ ($x = 0,4; 0; -0,4$) и флюорита $La_{6-x}WO_{12-1,5}$ ($x = 0,4; 0,6; 0,8; 1$) к углекислому газу. Задачами работы стали исследования данных фаз с помощью методов, применяемых для оценки химической стойкости к CO_2 : РФА и термогравиметрического анализа (ТГА), – а также более точная оценка химической устойчивости протонпроводящих материалов по изменению как объемной, так и зернограничной электропроводности методом импеданса (для образца сопротивлением 1 кОм точность метода составляет 0,01 %).

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
2θ	Угол рентгеновского излучения, °
σ	Электропроводность, См/см
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$a(X)$	Активность твердого компонента X
C	Электрическая емкость (нижний индекс), Ф
d	Плотность, г/см ³
ΔG	Изменение энергии Гиббса, Дж/моль
ΔH	Изменение энтальпии реакции, Дж/моль
ImZ	Мнимая часть импеданса, Ом
i	Ионный ток масс-спектрометрии, нА
$M(CO_2)$	Молярная масса CO_2 , г/моль
$m(CO_2)$	Масса CO_2 , г
$n(CO_2)$	Количество вещества CO_2 , моль
$P(CO_2)$	Парциальное давление CO_2 , атм
R	Универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)
ReZ	Действительная часть импеданса, Ом
ΔS	Изменение энтропии реакции, Дж/(моль·К)
T	Абсолютная температура, К
V	Объем, см ³ /моль
<i>Индексы нижние</i>	
b	Ионное объемное
d	Двойной электрический слой
el	Шунтирующее электронное
gb	Зернограничное
m	Мольный
st	Устойчивость оксида к CO_2
<i>Аббревиатуры</i>	
СРЕ	Элемент с постоянным сдвигом фазы
ВТПП	Высокотемпературные протонные проводники
РФА	Рентгенофазовый анализ
ТГА	Термогравиметрический анализ
ЩЗМ	Щелочно-земельные металлы

2. Теоретическая часть

Для практики важной термодинамической характеристикой электролита ВТПП является температура устойчивости фазы к CO_2 . Теоретической базой для экспериментального измерения или расчета температуры устойчивости является метод гетерогенных равновесий для изучения термодинамики твердофазных реакций [22]. Данный метод основан на измерении зависимости давления летучего компонента от состава реакционной твердофазной системы:



Динамический вариант метода гетерогенных равновесий предусматривает нагрев исследуемого вещества в потоке газа с фиксированной активностью летучего компонента в течение времени, необходимого для достижения равновесия:

$$\Delta G(1) = -RT \ln \frac{a(CaCO_3)}{a(CaO) \times P(CO_2)_{const}}, \quad (2)$$

Так, при установлении равновесия реакции (1) при постоянном $P(\text{CO}_2)$ выше или ниже температуры устойчивости CaO (или разложения CaCO₃) активность твердых компонентов меняется: а) если $T < T_{st}$, то $a(\text{CaCO}_3) > a(\text{CaO})$; б) если $T > T_{st}$, то $a(\text{CaCO}_3) < a(\text{CaO})$. Это значит, что фаза CaO термодинамически неустойчива к CO₂ ниже T_{st} и, соответственно, устойчива выше T_{st} . Изменение состава твердой фазы (степень превращения) при нагреве может быть определено с помощью ТГА:

$$\Delta m = m(\text{CO}_2) = M(\text{CO}_2) \cdot n(\text{CO}_2). \quad (3)$$

Температура устойчивости может быть определена по ступени на ТГА зависимости или по максимуму на дифференцированной кривой $dm/dT = f(T)$.

Реакция (1) является экзотермической $\Delta H < 0$ и сопровождается уменьшением энтропии $\Delta S < 0$ (газ переходит в твердую фазу), химическое взаимодействие с CO₂ уменьшается с ростом температуры (ΔG растет в сторону положительных значений). При температурах ниже T_t энергия Гиббса реакции $\Delta G < 0$ при температурах выше T_{st} энергия Гиббса реакции возрастает и становится больше нуля $\Delta G > 0$:

$$\Delta G = \Delta H_T - T\Delta S_T. \quad (4)$$

Можно рассчитать температуру устойчивости, используя уравнение (4) и условие $\Delta G = 0$ (для уравнения (2) это значит, что $P(\text{CO}_2) = 1$ атм, отношение $a(\text{CaCO}_3)/a(\text{CaO}) = 1$), тогда получаем уравнение (5):

$$T_{st} = \Delta H_T / \Delta S_T. \quad (5)$$

Однако точный расчет температуры устойчивости, при которой энергия Гиббса реакции (1) становится равной нулю, $\Delta G = 0$, затруднителен, так как требует справочных данных по коэффициентам температурных зависимостей энтальпии и энтропии каждого компонента. В связи с этим определять температуру устойчивости более целесообразно экспериментальным путём.

При отсутствии термодинамической устойчивости фазы к CO₂ в некоторых случаях всё же может проявляться связанная с кинетическими затруднениями устойчивость данной фазы к CO₂, достаточно долговременная для практического использования. Большинство твердофазных реакций [22], например реакция (1), протекает в несколько последовательных стадий, одна из которых является лимитирующей (ограничивающей скорость процесса). Обычно на начальном этапе твердофазная реакция лимитируется химическим взаимодействием в местах контакта исходных фаз. В случае образования непрерывного слоя продукта процесс переходит в диффузионный режим и лимитируется движением ионов через слой продукта. Для оценки устойчивости, связанной с кинетическими затруднениями, также необходимы экспериментальные данные по изменению характе-

ристик материала в течение длительных испытаний в рабочих условиях.

3. Экспериментальная часть

Исследуемые фазы: а) Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁ ($x = 0,4; 0; -0,4$); б) La_{6-x}WO_{12-1,5x} ($x = 0,4; 0,6; 0,8; 1$) – были получены твердофазным синтезом из соответствующих оксидов (Nb₂O₅, WO₃, La₂O₃) и карбонатов (BaCO₃, CaCO₃) квалификации «ос.ч».

РФА проводился с целью контроля фазового состава порошков и спеченных керамических образцов. По результатам РФА для образцов наблюдалось остаточное содержание примесей исходных веществ ниже уровня фона – менее 1 %. Рентгенограммы были получены на дифрактометрах ДРОН-4 и Advance D8 «Bruker», излучение Cu K α , интервал углов $2\theta = 10 \div 80^\circ$ с шагом 0,05° и экспозицией 1 с при комнатной температуре.

Термогравиметрические измерения проводили с помощью термовесов Pyris 1 TGA «Perkin-Elmer» при ступенчатом (с шагом 25 °C) нагревании до 1 000 °C в потоке воздуха 100 мл/мин с $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм, $P(\text{H}_2\text{O}) = 10^{-2}$ атм. Точность весов составляла 0,001 мг, однако с учетом нестабильности потока воздуха и вычитания базовой линии точность измерения массы снижалась до 0,01 мг, для образца 100 мг точность измерения массы – 0,01 %.

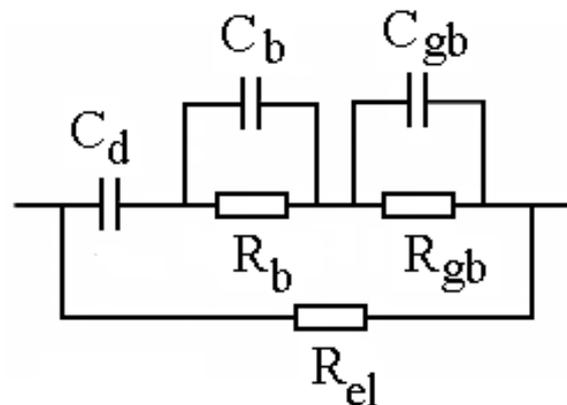


Рис. 1 – Эквивалентная схема для поликристаллического твердого электролита с разделенным ионным и электронным вкладом в сопротивление (сопротивления: R_b – ионное объемное, R_{gb} – ионное зернограничное, R_{el} – шунтирующее электронное; емкости: C_d – двойного электрического слоя, C_b – объемная, C_{gb} – зернограничная)
Fig. 1 – Equivalent scheme for a polycrystalline solid electrolyte with separated ionic and electronic contributions to the resistance (resistances: R_b – ionic bulk, R_{gb} – ionic grain boundary, R_{el} – bridging electronic resistance; capacitance: C_d – double electric layer; C_b – bulk, C_{gb} – grain boundary)

Для термогравиметрии, совмещенной с масс-спектрометрией (для анализа отходящих газов), в режиме быстрого нагрева применяли термоанализатор TG STA 409 PC в комплекте с блоком квадрупольного масс-спектрометра QMS 403C («Netzsch»). Термический анализ проводили в интервале температур $30 \div 1\,000$ °C со скоростью нагрева 5 °/мин.



Образцы для измерений электропроводности представляли собой предварительно спрессованные и спеченные в течение 10 часов при 1 500 ° С керамические диски диаметром 1 см и толщиной 0,3 см. Плотность спеченных керамических образцов относительно теоретической рентгеновской составляла 83 ÷ 84 % для $Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb_2O_{11}$ и 95 ÷ 97 % для $La_{6-x}WO_{12-1,5x}$. В качестве электродного материала, обратимого по кислороду и водороду, наносился порошок сплава серебро – палладий (70 % Ag, 30 % Pd).

Измерения спектров импеданса проводили двух-контактным методом посредством импедансметра Z-1000P (ЗАО «Эллинс», г. Черноголовка) в частотном интервале 100 Гц – 1МГц. Расчет объемного и зерно-

граничного сопротивления проводили при помощи специализированной программы обработки импедансных данных «ZView2».

В работе использовалась кирпично-слоевая модель для керамических образцов с повышенным сопротивлением границ зерен. Теоретическая эквивалентная электрическая схема для электролита с разделенными вкладками ионной и электронной проводимости представлена на рис. 1 [23].

Однако на практике измеряется общее (смешанное) сопротивление образца, содержащее вклады ионов и электронов; при его описании используется схема Войта, представленная на рис. 2.

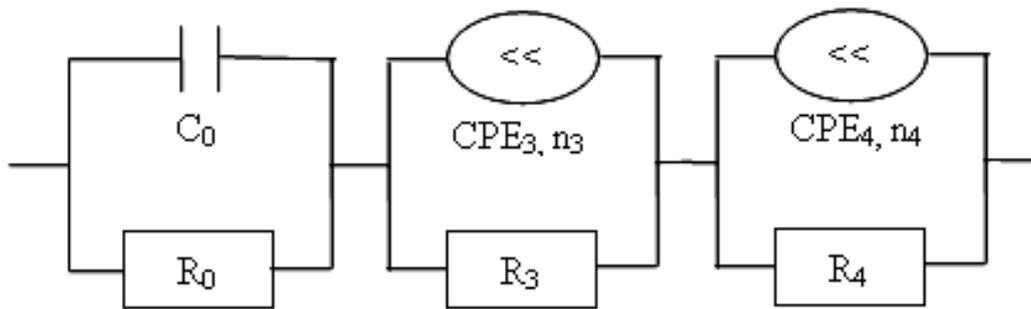
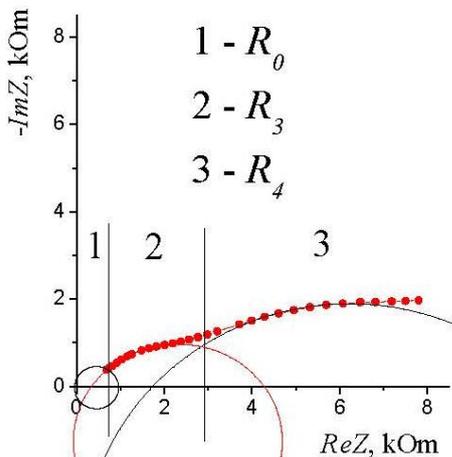


Рис. 2 – Электрическая схема (Войта) для описания спектров импеданса: R_0 – объемное сопротивление; C_0 – объемная емкость; R_3 – зернограничное сопротивление; C_3 – зернограничный CPE; n_3 – коэффициент зернограничного CPE; R_4 – электродное сопротивление; C_4 – электродный элемент со CPE; n_4 – коэффициент электродного CPE

Fig. 2 – Electrical circuit (Voigt) for describing the impedance spectra: R_0 – the bulk resistance; C_0 – the bulk capacitance; R_3 – the grain boundary resistance; C_3 – the grain boundary constant phase element (CPE); n_3 – the coefficient of the grain boundary CPE; R_4 – the electrode resistance; C_4 – the electrode element with CPE; n_4 – the coefficient of the electrode CPE



Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, можно описать тремя перекрывающимися полуокружностями, три отрезка отсекаемые на оси ReZ служат начальными приближениями для математической обработки в соответствии со структурной моделью на рис. 2.

Результаты уточнения параметров импеданса представлены в табл. 1.

Рис. 3 – Пример экспериментального спектра импеданса образца $La_{5,6}WO_{11,4}$
Fig. 3 – An example of the experimental impedance plot of the $La_{5,6}WO_{11,4}$ sample

Пример уточненных параметров импеданса

Таблица 1

Example of refined impedance parameters

Table 1

R_0 , Ом	C_0 , Ф	R_3 , Ом	C_3 , Ф	n_3
170±60	$(1,6±0,3) \times 10^{-10}$	1 430±70	$(4,7±0,3) \times 10^{-7}$	0,57±0,01
		R_4 , Ом	C_4 , Ф	n_4
		13 000±500	$(7±0,6) \times 10^{-6}$	0,38±0,01

Как видно из табл. 1, расчетные емкости лежат в диапазонах, соответствующих литературным [23]: для объема (C_0) в интервале $10^{-12} \div 10^{-9}$ Ф, для границ и поверхности зерен (C_3) в интервале $10^{-9} \div 10^{-7}$ Ф и для контактов электрод-образец в интервале (C_4) $10^{-7} \div 10^{-5}$ Ф.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Сравнение термодинамической устойчивости фаз ВТПП к CO₂ по данным ТГА

Химическая устойчивость фазы к CO₂ может быть обусловлена термодинамикой или кинетикой взаимодействия. Связанная с кинетическими затруднениями устойчивость ВТПП к CO₂ обычно достигается за счет медленной стадии диффузии через блокирующий поверхностный слой. Однако блокирующий слой может не только сохранять основную фазу от взаимодействия с CO₂, но и заблокировать трехфазную границу электролита (а также границы зерен). Следовательно, для эффективной работы на воздухе ВТПП в качестве электролита важна термодинамическая устойчивость при стандартных рабочих температурах (500 ÷ 700 °С).

Взаимодействие CO₂ с сильноосновным оксидом ЩЗМ или La является экзотермической реакцией $\Delta H < 0$ с уменьшением энтропии $\Delta S < 0$ (газ переходит в твердую фазу), химическое взаимодействие с CO₂ уменьшается с ростом температуры. Поэтому температурный интервал термодинамической устойчивости оксидной фазы ВТПП к CO₂ начинается выше температуры устойчивости T_{st} (температуры смеще-

ния равновесия в сторону выделения CO₂). Термодинамическая устойчивость фазы к CO₂ тем выше, чем ниже T_{st} – температура реакции выделения CO₂.

Температура устойчивости к CO₂ является термодинамическим параметром и в соответствии с уравнением (4) выражается через термодинамические функции: энтальпию и энтропию реакции. При этом T_{st} подходит в качестве параметра для оценки термодинамической устойчивости оксидных ВТПП, так как позволяет оценивать и сравнивать устойчивость фаз. Если T_{st} к CO₂ лежит в рабочем интервале (500 ÷ 700 °С) или ниже, то фаза термодинамически устойчива в рабочих условиях.

Реакция выделения CO₂ (потеря массы) в отличие от поглощения CO₂ (набор массы) при повышенной температуре протекает без существенных кинетических затруднений и, как показано на рис. 4, при ступенчатом повышении температуры с шагом 30 °С (для контроля равновесия) равновесие смещается достаточно быстро. Вследствие этого измеренная (с точностью в диапазоне $\Delta T = \pm 15$ °С, соответствует шагу по температуре) температура T_{st} разложения /устойчивости является удобным для практики техническим параметром равновесия, характеризующим собственно термодинамику процесса взаимодействия с CO₂. Следует уточнить, что особенностью данной методики является ступенчатый нагрев предварительно уравновешенной с CO₂ системы, содержащей карбонаты, что позволяет исследовать именно термодинамику более равновесного процесса потери массы.

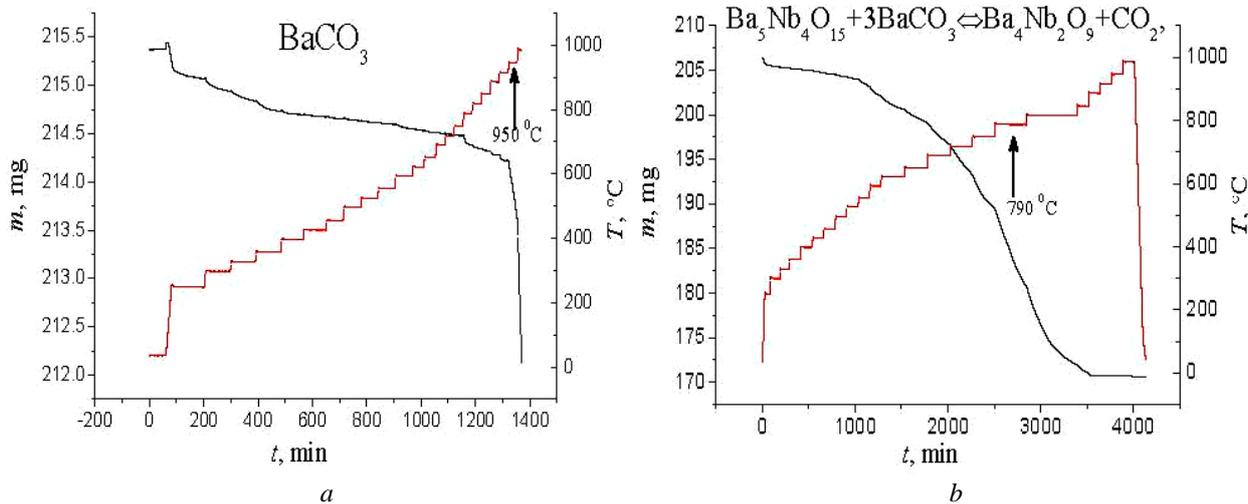


Рис. 4 – Временные зависимости массы и температуры при ступенчатом нагреве в потоке воздуха 100 мл/мин при $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм: а) $\text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$; б) $3\text{BaCO}_3 + \text{Ba}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15} \leftrightarrow 2\text{Ba}_4\text{Nb}_2\text{O}_9 + 6\text{CO}_2$
 Fig. 4 – Time dependences of mass and temperature under stepwise heating in an air flow of 100 ml/min at $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ bar: а) $\text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$; б) $3\text{BaCO}_3 + \text{Ba}_5\text{Nb}_4\text{O}_{15} \leftrightarrow 2\text{Ba}_4\text{Nb}_2\text{O}_9 + 6\text{CO}_2$

Температура устойчивости для ряда оксидных систем определена с помощью термогравиметрии в

атмосферном воздухе (скорость потока 100 мл/мин) с парциальным давлением $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение термодинамической устойчивости к CO₂ (воздух, P(CO₂) = 10⁻³ атм) ряда оксидных фаз по температуре смещения равновесия в сторону выделения CO₂

Table 2

Comparison of thermodynamic stability to CO₂ (air, P(CO₂) = 10⁻³ bar) for a number of oxide phases from the temperature of the equilibrium shift towards CO₂ emission

Реакционная оксидная система с участием CO ₂	Температура, °C
BaCO ₃ ↔ BaO+CO ₂	950
xBaCO ₃ + Ba _{4-x} Ca ₂ Nb ₂ O _{11-x} ↔ Ba ₄ Ca ₂ Nb ₂ O ₁₁ + CO ₂	900
BaCO ₃ + BaIn ₂ O ₄ ↔ Ba ₂ In ₂ O ₅ + CO ₂ [24]	890
SrCO ₃ ↔ SrO+CO ₂	800
BaCO ₃ + CeO ₂ ↔ BaCeO ₃ + CO ₂	790
3BaCO ₃ + Ba ₅ Nb ₄ O ₁₅ ↔ 2Ba ₄ Nb ₂ O ₉ + 6CO ₂ [25]	790
La ₂ O(CO ₃) ₂ ↔ La ₂ O ₃ +2CO ₂ [26]	650
3La ₂ O(CO ₃) ₂ + La ₆ W ₂ O ₁₅ ↔ 2La ₆ WO ₁₂ +6 CO ₂ [27]	650
BaCO ₃ + ZrO ₂ ↔ BaZrO ₃ + CO ₂	650
CaCO ₃ ↔ CaO + CO ₂	580

Известно, что высокотемпературную протонную проводимость проявляют в основном перовскитоподобные и другие структуры с катионами Ba, Sr, Ca и La в А-подрешетке, поэтому для сравнения также приведены температуры устойчивости карбонатов Ba, Sr, Ca и La. Известные ВТПП (например, BaZr_{1-x}Y_xO_{3-δ}) не содержат водород в своем составе и получают протонные носители заряда за счет заполнения вакансий в кислородной подрешетке при поглощении паров воды. Однако для ВТПП, в отличие от униполярного кислородно-ионного проводника (например, Zr_{1-x}Y_xO_{2-δ}), требуются не только вакансии кислорода, но также высокое сродство к воде при высоких температурах. Поскольку BaO образует сильную бариевую щелочь Ba(OH)₂, устойчивую до температуры 780 °C (температура кипения с разложением [28]), можно предположить, что высокое сродство к воде ВТПП связано с высоким содержанием бария, других щелочно-земельных металлов или лантана, то есть компонентов с высокой основностью. Однако для сильноосновных оксидов также характерно взаимодействие с более кислотным оксидом CO₂, поэтому поиск оптимального по термодинамической устойчивости к CO₂ высокотемпературного протонного электролита остается актуальным. В табл. 2 приведены температурные границы устойчивости к CO₂ ряда барий- и лантансодержащих оксидных фаз. В целом можно отметить, что устойчивость сложнооксидной фазы к CO₂ возрастает с уменьшением содержания более основного оксидного компонента и с увеличением содержания более кислотного оксидного компонента.

На рис. 4а (см. рис. 4) показано, что BaCO₃ в потоке воздуха 100 мл/мин начинает разлагаться выше 950 °C. На рис. 4б представлены данные ТГА для реакции образования Ba₄Nb₂O₉:



Как видно, взаимодействие начинается при 790 °C, то есть значительно ниже температуры разложения карбоната. Аналогичная ситуация складывается для

таких ВТПП, как Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁ и Ba₃Ca_{1,18}Nb_{1,82}O_{9-y} (BCN-18) [29]. Фазы на основе Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁, исследованные в данной работе, характеризуются низкой термодинамической устойчивостью (устойчивы выше 800 ÷ 900 °C при P(CO₂)= 10⁻³ атм).

В системе BaO – Nb₂O₅ в области, близкой к BaO [24], существует три основных фазы Ba₆Nb₂O₁₁ (можно сопоставить с протонным проводником Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁ из [29]), Ba₄Nb₂O₉ (можно сопоставить с протонным проводником Ba₃Ca_{1,18}Nb_{1,82}O_{9-y} из [29]) и Ba₅Nb₄O₁₅. Оказалось, что для Ba₆Nb₂O₁₁ ниже 890 °C равновесие при взаимодействии с CO₂ (образование BaCO₃) устанавливается с образованием Ba₄Nb₂O₉, а ниже 790 °C дальнейшее взаимодействие приводит к образованию Ba₅Nb₄O₁₅. Измерение методом ТГА количества выделенного CO₂ подтверждает образование фаз данного состава.

Для сравнения с Ba_{4-x}Ca₂Nb₂O_{11-x} измерялась температура устойчивости к CO₂ известных из литературы протонных проводников Ba₂In₂O₅ [5]. Измерение методом ТГА количества выделенного CO₂ подтверждает образование фаз состава, указанного на фазовых диаграммах [24]. Определено, что для фазы Ba₂In₂O₅ ниже 890 °C равновесие при взаимодействии с CO₂ (с образованием BaCO₃) устанавливается с образованием BaIn₂O₄, а ниже 790 °C дальнейшее взаимодействие BaIn₂O₄ с CO₂ (с образованием BaCO₃) приводит к образованию In₂O₃. Таким образом, можно сделать вывод о том, что фаза Ba₂In₂O₅ термодинамически устойчива к примеси CO₂ в воздухе при температуре выше 890 °C.

Воспроизводимость методики оценки термодинамической устойчивости оксидных фаз к CO₂ подтверждается сравнением измеренных и литературных данных о температурах устойчивости известных фаз (BaCeO₃ и BaZrO₃). Для церата бария BaCeO₃ (неустойчивый к CO₂ материал) температура устойчивости (смещение вправо равновесия реакции BaCO₃ + CeO₂ ↔ BaCeO₃+CO₂) при P(CO₂) = 10⁻³ атм составляет по результатам ТГА 800 °C (рис. 5а), что согласуется с литературными данными, T = 850 °C



[10]. Для цирконата бария BaZrO₃ (относительно устойчивый к CO₂ материал) температура устойчи-

вости составляет по литературным данным 500 °C [10], по результатам ТГА – 650 °C (рис. 5b).

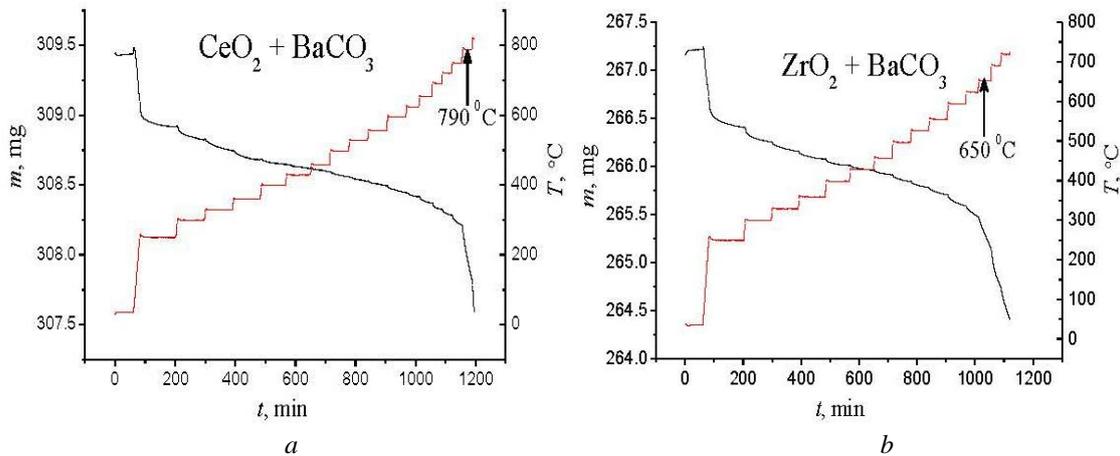


Рис. 5 – Временные зависимости массы и температуры при ступенчатом нагреве в потоке воздуха 100 мл/мин при $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм: а) $\text{CeO}_2 + \text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaCeO}_3 + \text{CO}_2$; б) $\text{ZrO}_2 + \text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaZrO}_3 + \text{CO}_2$
Fig. 5 – Time dependences of mass and temperature under stepwise heating in an air flow of 100 ml/min at $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ bar: а) $\text{CeO}_2 + \text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaCeO}_3 + \text{CO}_2$; б) $\text{ZrO}_2 + \text{BaCO}_3 \leftrightarrow \text{BaZrO}_3 + \text{CO}_2$

Согласно работам [26, 32], последовательное разложение карбоната лантана $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$ происходит через ряд твердых растворов (в интервале температур $430 \div 860$ °C), среди которых выделяют фазы оксокарбоната лантана $\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2$ и $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$. Согласно работам [28, 32], гидроксокарбонат лантана $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3$ и его кристаллогидрат $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ образуются при длительной выдержке La_2O_3 с влажным воздухом. Показанные на рис. 6а результаты ТГА можно объяснить следующим изменением состава. Первое

падение массы при 200 °C связано с удалением кристаллизационной воды кристаллогидрата гидроксокарбоната, дегидратация гидроксогрупп происходит при ~ 300 °C (второе снижение массы), однако после второго падения массы снова осуществляется прирост массы до 400 °C, а значит, гидроксогруппы замещаются карбоксильными группами при поглощении CO₂ из воздуха, после чего образуется оксокарбонат $\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2$, который дальше разлагается выше 650 °C (третье снижение массы).

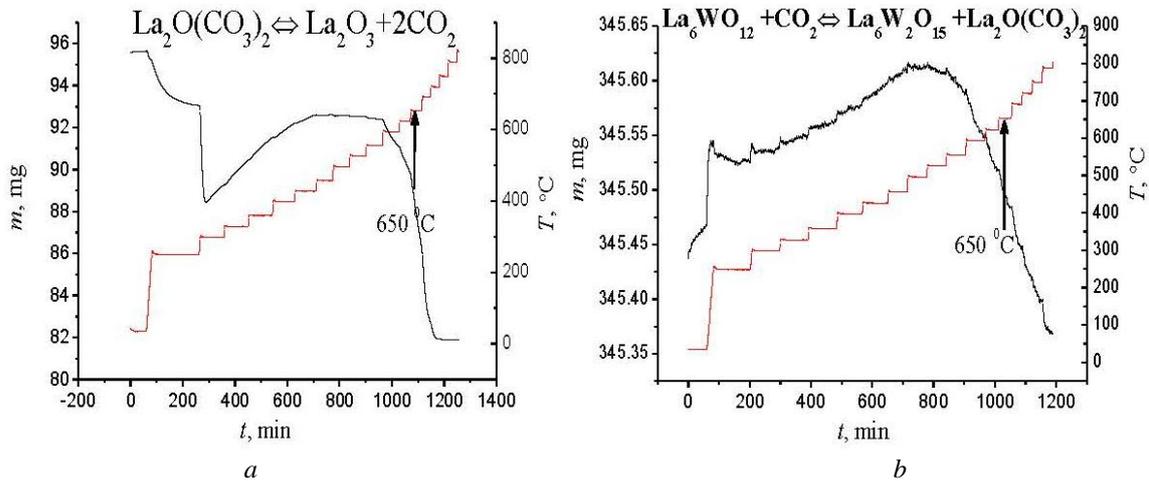


Рис. 6 – Временные зависимости массы и температуры при ступенчатом нагреве в потоке воздуха со скоростью 100 мл/мин при $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм: а) $\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 \leftrightarrow \text{La}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$; б) $3\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 + \text{La}_6\text{W}_2\text{O}_{15} \leftrightarrow 2\text{La}_6\text{WO}_{12} + 6\text{CO}_2$
Fig. 6 – Time dependences of mass and temperature under stepwise heating in an air flow of 100 ml/min at $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ bar: а) $\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 \leftrightarrow \text{La}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$; б) $3\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 + \text{La}_6\text{W}_2\text{O}_{15} \leftrightarrow 2\text{La}_6\text{WO}_{12} + 6\text{CO}_2$

В системе $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{WO}_3$ в области, близкой к La_2O_3 , на фазовой диаграмме [27] наблюдается двухфазная область с фазами протонного проводника $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ [30] и $\text{La}_6\text{W}_2\text{O}_{15}$ [31]. Ниже 650 °C равновесие $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ при взаимодействии с CO₂ (образование

оксокарбоната лантана) устанавливается с образованием $\text{La}_6\text{W}_2\text{O}_{15}$, что подтверждается данными РФА.

Фазы на основе $\text{La}_6\text{WO}_{12}$, аттестованные в работе [30] как устойчивые выше 650 °C (рис. 6b), обладают термодинамической устойчивостью к CO₂, близкой

к La_2O_3 и BaZrO_3 . Однако при близкой термодинамической устойчивости фаз $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ и La_2O_3 следует отметить значительно более высокую связанную с кинетическими затруднениями устойчивость $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ к CO_2 при комнатной температуре на воздухе. В отличие от оксида лантана La_2O_3 , сильно взаимодействующего с CO_2 и H_2O (масса возрастает на 15 %), фаза $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ незначительно меняется при хранении в течение 30 суток на воздухе (масса возрастает на 0,1 %). В работах [10, 12] показано, что твердый раствор, образованный фазами с различной температурой термодинамической устойчивости, обладает промежуточной температурой устойчивости ($\text{BaCeO}_3 - 850^\circ\text{C} > \text{BaCe}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_3 - 650^\circ\text{C} > \text{BaZrO}_3 -$

500°C при $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм). Следовательно, термодинамическая устойчивость твердого раствора может монотонно возрастать с увеличением содержания термодинамически устойчивого к CO_2 компонента. При добавлении более термодинамически устойчивого компонента – оксида CaO (рис. 7а: выделение CO_2 $500 \div 600^\circ\text{C}$) к менее устойчивому компоненту $\text{Ba}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ (как показано ранее для $\text{Ba}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ на рис. 4b: выделение CO_2 $800 \div 900^\circ\text{C}$) образуется фаза $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}$, для которой (рис. 7b) наблюдаются два соответствующих температурных интервала выделения CO_2 $500 \div 600^\circ\text{C}$ и $800 \div 900^\circ\text{C}$. Входящие в фазу $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}$ компоненты ($\text{Ba}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ и CaO) взаимодействуют с CO_2 независимо друг от друга.

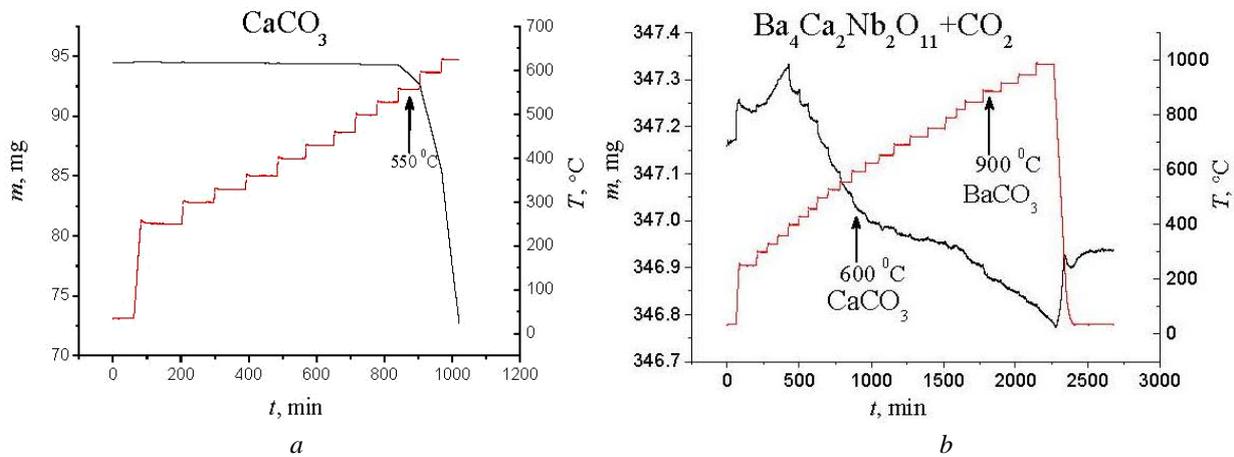


Рис. 7 – Временные зависимости массы и температуры при ступенчатом нагреве в потоке воздуха 100 мл/мин при $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм: а) $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$; б) $\text{Ba}_{4-x}\text{Ca}_x\text{Nb}_2\text{O}_{11+z} + x\text{BaCO}_3 + y\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11} + \text{CO}_2$
Fig. 7 – Time dependences of mass and temperature under stepwise heating in an air flow of 100 ml/min at $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ bar: а) $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$; б) $\text{Ba}_{4-x}\text{Ca}_x\text{Nb}_2\text{O}_{11+z} + x\text{BaCO}_3 + y\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11} + \text{CO}_2$

Таким образом, в данном случае не удастся повысить устойчивость к CO_2 за счёт вклада устойчивого компонента (как, например, для $\text{BaCe}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_{3-\delta}$ [10, 12]) и сместить в целом область удаления CO_2 в более низкие температуры.

4.2. Сравнение связанной с кинетическими затруднениями устойчивости твердых растворов $\text{Ba}_{4-x}\text{Ca}_{2+x}\text{Nb}_2\text{O}_{11}$ ($x = 0,4; 0; -0,4$) к CO_2

Фазы на основе $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}$, изученные в работе [29], характеризуются низкой термодинамической устойчивостью к CO_2 , примерно как BaCeO_3 (неустойчивы ниже 900°C). Однако термодинамически неустойчивая фаза может найти применение в случае высокой устойчивости, связанной с кинетическими затруднениями. Например, керамика со-

става $\text{Ba}_{4,4}\text{Ca}_{1,6}\text{Nb}_2\text{O}_{11}$ не разрушается под действием CO_2 в отличие от керамики $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}$, которая на воздухе покрывается трещинами и рассыпается в порошок, что нельзя объяснить незначительной разницей в термодинамической устойчивости (все данные фазы примерно одинаково неустойчивы к $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм ниже 900°C). В связи с этим требуется также оценка устойчивости исследуемых фаз, связанной с кинетическими затруднениями.

Образцы керамики состава $\text{Ba}_{3,4}\text{Ca}_{2,6}\text{Nb}_2\text{O}_{11}[\text{Vo}]_1$, $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}[\text{Vo}]_1$ и $\text{Ba}_{4,4}\text{Ca}_{1,6}\text{Nb}_2\text{O}_{11}[\text{Vo}]_1$ подвергались в течение 30 суток при 200°C воздействию воздушной атмосферы 80 % влажности ($P(\text{H}_2\text{O}) = 3 \cdot 10^{-2}$ атм), а также содержащей CO_2 ($P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм). Изменения, произошедшие с керамикой в результате взаимодействия с H_2O и CO_2 , оценивались с помощью РФА (рис. 8) и ТГА (рис. 9, табл. 3).

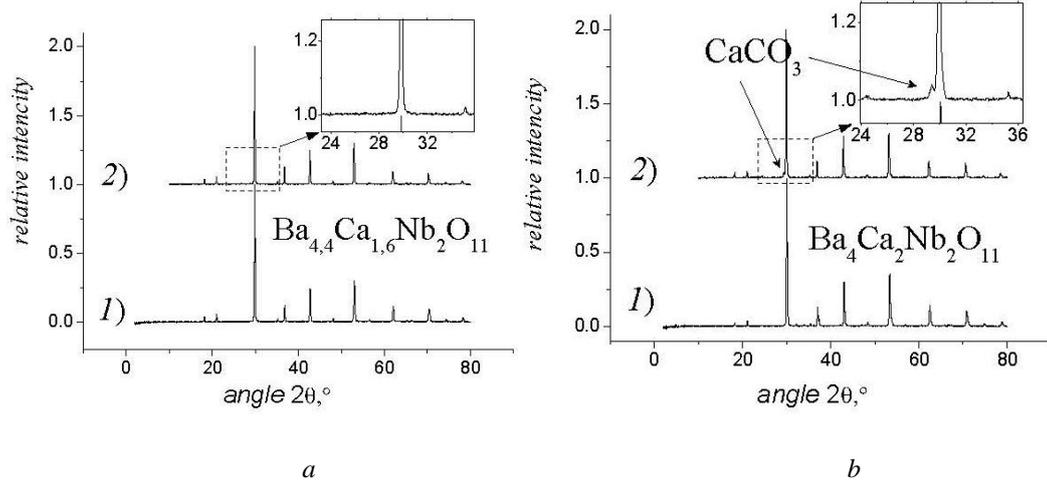


Рис. 8 – Рентгенограммы керамических образцов а) Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb₂O₁₁ и б) Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁: 1) до выдержки; 2) после выдержки 30 суток при 200 °С во влажном воздухе ($P(\text{H}_2\text{O}) = 3 \cdot 10^{-2}$ и $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм)
Fig. 8 – X-ray diffraction patterns of ceramic samples а) Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb₂O₁₁ and б) Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁: 1) prior to holding; 2) after holding for 30 days under 200 °С in humid air ($P(\text{H}_2\text{O}) = 3 \cdot 10^{-2}$ and $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ bar)

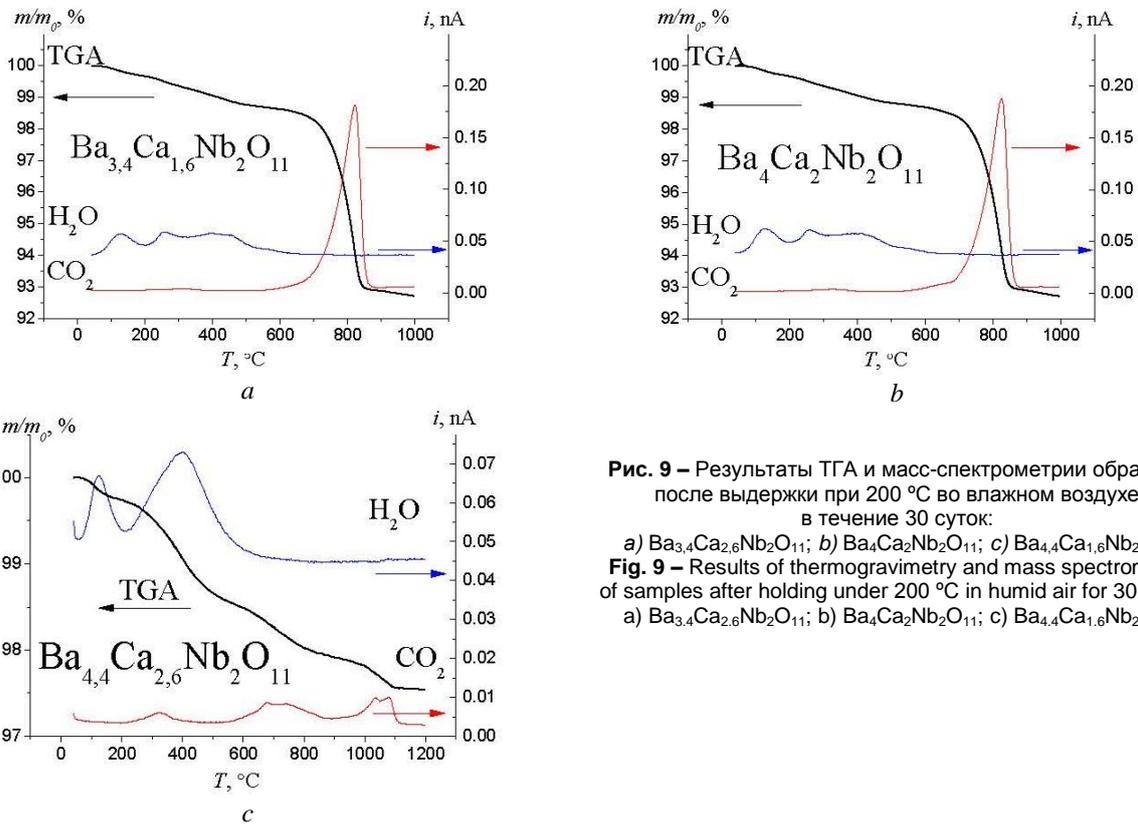


Рис. 9 – Результаты ТГА и масс-спектрометрии образцов после выдержки при 200 °С во влажном воздухе в течение 30 суток:
 а) Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb₂O₁₁; б) Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁; в) Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb₂O₁₁
Fig. 9 – Results of thermogravimetry and mass spectrometry of samples after holding under 200 °С in humid air for 30 days:
 а) Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb₂O₁₁; б) Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁; в) Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb₂O₁₁

Изменение керамики Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁ (x = 0,4; 0; -0,4) после 1 месяца выдержки во влажном воздухе
 Change in the ceramic samples Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁ (x = 0.4; 0; -0.4) after exposition of 1 month in humid air

Состав керамики	РФА	ТГ, потеря массы (Δm) при 1 000 °С	Механические свойства
Ba _{3,4} Ca _{2,6} Nb ₂ O ₁₁	примесь CaCO ₃	6 % CO ₂ , 1 % H ₂ O	разрушение
Ba ₄ Ca ₂ Nb ₂ O ₁₁	примесь CaCO ₃	6 % CO ₂ , 1 % H ₂ O	разрушение
Ba _{4,4} Ca _{1,6} Nb ₂ O ₁₁	без изменений	1 % CO ₂ , 1 % H ₂ O	без изменений

Как видно, наблюдается возрастание химической устойчивости керамики при повышении содержания бария и снижении содержания кальция. При этом, с точки зрения термодинамики, BaO является менее устойчивым компонентом, чем CaO. Можно предположить, что в данном случае наблюдается увеличение связанной с кинетическими затруднениями устойчивости.

Следует отметить, что для сравнения устойчивости три керамических таблетированных образца $Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb_2O_{11}$ ($x = 0,4; 0; -0,4$) одновременно помещались в трубчатую печь и после нагрева до 900 °C и уравнивания в потоке влажного воздуха охлаждались до 200 °C, а затем выдерживались в течение 30 суток. После выдержки во влажном воздухе при $P(H_2O) = 3 \cdot 10^{-2}$ атм и $P(CO_2) = 10^{-3}$ (см. рис. 8) для образцов $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ и $Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb_2O_{11}$ на рентгенограмме появились пики второй фазы $CaCO_3$ (кальцит). По результатам ТГА, совмещенной с масс-спектрометрией, масса образцов уменьшилась на 1 % за счет выделения H_2O для всех образцов (см. рис. 9). За счет выделения CO_2 масса уменьшилась на 1 % для $Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb_2O_{11}$ и на 6% для $Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb_2O_{11}$ и $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$. Таким образом, содержание CO_2 в

$Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb_2O_{11}$ и $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ достигло почти 1 моль на формульную единицу.

Для того чтобы объяснить более высокую устойчивость фазы с большим содержанием бария $Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb_2O_{11}$, предположим, что на поверхности зерен происходит образование блокирующего слоя $BaCO_3$. На возможность образования $BaCO_3$ указывает тот факт, что на рис. 9с наблюдается пик выделения CO_2 при 1 100 °C.

Одним из условий образования сплошного и плотного блокирующего слоя одной фазы на поверхности другой фазы является близость их молярных объемов. Объем V_m , приходящийся на 1 моль фазы, можно рассчитать, используя плотность d и молярную массу M по уравнению:

$$V_m = M \text{ (г/моль)} / d \text{ (г/моль)}. \quad (6)$$

Карбонат бария $BaCO_3$ и фазы на основе $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ имеют очень близкий молярный объем, приходящийся на единицу бария $V_m(BaCO_3) = 47,5$ мл/моль и $1/4V_m(Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}) = 45,3$ мл/моль. В ряду $BaCO_3 \rightarrow Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb_2O_{11} \rightarrow Ba_4Ca_2Nb_2O_{11} \rightarrow Ba_{3,4}Ca_{2,6}Nb_2O_{11} \rightarrow CaCO_3$ объем V_m убывает 47,5→45,5→45,3→44,4→36,8 мл/моль.

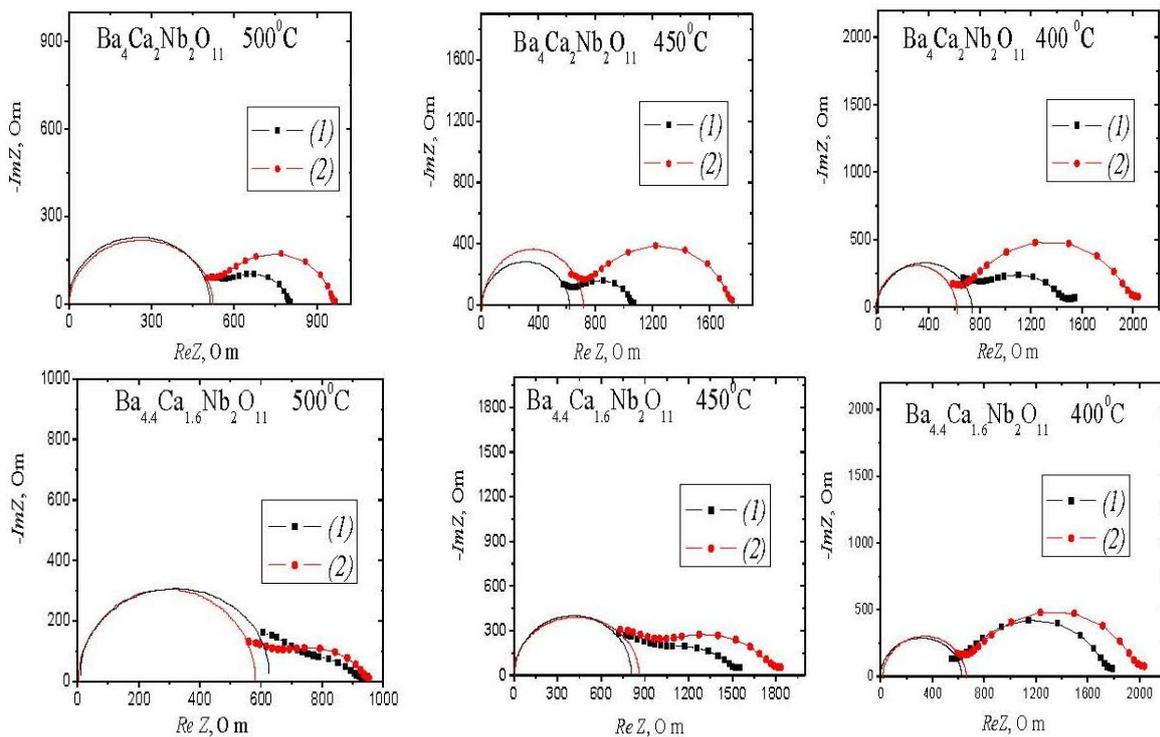


Рис. 10 – Сравнение изменений годографов импеданса для $Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb_2O_{11}$ и $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ при указанных температурах, измеренных в сухом воздухе ($P(H_2O) = 10^{-4}$ атм, $P(CO_2) = 10^{-3}$ атм): 1) до выдержки; 2) после выдержки в течение 7 суток при 400 °C во влажном воздухе ($P(H_2O) = 10^{-2}$ атм, $P(CO_2) = 10^{-3}$ атм).

Fig. 10 – Comparison of changes in the impedance data for $Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb_2O_{11}$ and $Ba_4Ca_2Nb_2O_{11}$ at the indicated temperatures measured in dry air ($P(H_2O) = 10^{-4}$ bar, $P(CO_2) = 10^{-3}$ bar): 1) prior to holding; 2) after holding for 7 days under 400 °C in humid air ($P(H_2O) = 10^{-2}$ bar, $P(CO_2) = 10^{-3}$ bar)

Кроме того, $BaCO_3$, в отличие от $CaCO_3$, не разрушается в рабочем для электролита интервале темпера-

тур 600 ÷ 900 °C. Поэтому, как уже говорилось, кинетические затруднения глубокого взаимодействия с CO_2

фазы Ва_{4,4}Са_{1,6}№₂О₁₁, вероятно, могут быть связаны с наличием на поверхности зерен тонкого, но плотного блокирующего слоя ВаСО₃: 1) близкие мольные объемы ниобатов с ВаСО₃; 2) отсутствие пиков фазы ВаСО₃ на рентгенограммах Ва_{4,4}Са_{1,6}№₂О₁₁; 3) при доказанном наличии ВаСО₃ (по данным термогравиметрии пик выделения СО₂ 1 100 °С на рис. 9с) – все вместе указывает на присутствие аморфного ВаСО₃ на границах зерен (аналогично [20]).

На рис. 10 видно увеличение зернограничного сопротивления (вторая полуокружность) при неизменном объемном сопротивлении (первая полуокружность из начала координат) для Ва_{4,4}Са_{1,6}№₂О₁₁ и Ва₄Са₂№₂О₁₁ после 30 суток выдержки при 200 °С во влажном воздухе ($P(\text{H}_2\text{O}) = 10^{-2}$ атм, $P(\text{CO}_2) = 10^{-3}$ атм).

Первая полуокружность (в соответствии с расчетом в программе «ZView2»), экстраполированная из начала координат, отсекает на оси ReZ объемное сопротивление, вторая полуокружность, построенная по экспериментальным точкам, отсекает зернограничное сопротивление. Данный результат может указывать на прирост поверхностного слоя ВаСО₃, причем этот прирост более выражен для менее устойчивого к СО₂ образца Ва₄Са₂№₂О₁₁.

4.3. Сравнение связанной с кинетическими затруднениями устойчивости La_{6-x}WO_{12-1,5x} флюоритоподобных фаз (x = 0,4; 0,6) и композитов La_{6-x}WO_{12-1,5x} (x = 0,8; 1) на базе La₆WO₁₂ к СО₂ (с добавкой La₆W₂O₁₅)

Фазы на основе La₆WO₁₂ характеризуются относительно высокой термодинамической устойчиво-

стью к СО₂ (устойчивы выше 650 °С [30]) так же, как ВаZrО₃. В связи с этим интерес представляет более точная оценка их связанной с кинетическими затруднениями устойчивости по электропроводности.

В работе [30] определена область существования флюоритоподобного твердого раствора La_{6-x}WO_{12-1,5x} – 0,3 ≤ x ≤ 0,7. При составах La_{6-x}WO_{12-1,5x} с x < 0,3 появляется вторая фаза La₂O₃, и можно ожидать снижения термодинамической устойчивости керамики к СО₂. При составах La_{6-x}WO_{12-1,5x} с x > 0,7 появляется вторая фаза La₆W₂O₁₅, и можно ожидать увеличения термодинамической устойчивости керамики к СО₂.

В данной работе получены однофазные образцы керамики La_{6-x}WO_{12-1,5x} (x = 0,4; 0,6) La_{5,6}WO_{11,4} и La_{5,4}WO_{11,1}. Образцы La_{6-x}WO_{12-1,5x} состава (x = 0,8; 1) получены не однофазными (согласуется с [30]), кроме основной флюоритной фазы они содержали 3 % и 10 % соответственно примесной фазы La₆W₂O₁₅ (La₃WO_{7,5}):

$$\langle \text{La}_{5,2}\text{WO}_{10,8} \rangle = 0,97 \text{La}_{5,25}\text{WO}_{10,9} + 0,03 \text{La}_3\text{WO}_{7,5}, \quad (7)$$

$$\langle \text{La}_5\text{WO}_{10,5} \rangle = 0,9 \text{La}_{5,25}\text{WO}_{10,9} + 0,1 \text{La}_3\text{WO}_{7,5}. \quad (8)$$

Для проверки устойчивости La_{6-x}WO_{12-1,5x} к воздействию H₂O и СО₂, содержащихся в воздухе, были проведены измерения импеданса керамических образцов при циклическом изменении влажности при P(CO₂) = 10⁻³ атм: 1) сухой воздух – P(H₂O) = 3·10⁻⁵ атм; 2) влажный воздух – P(H₂O) = 3·10⁻² атм; 3) сухой воздух.

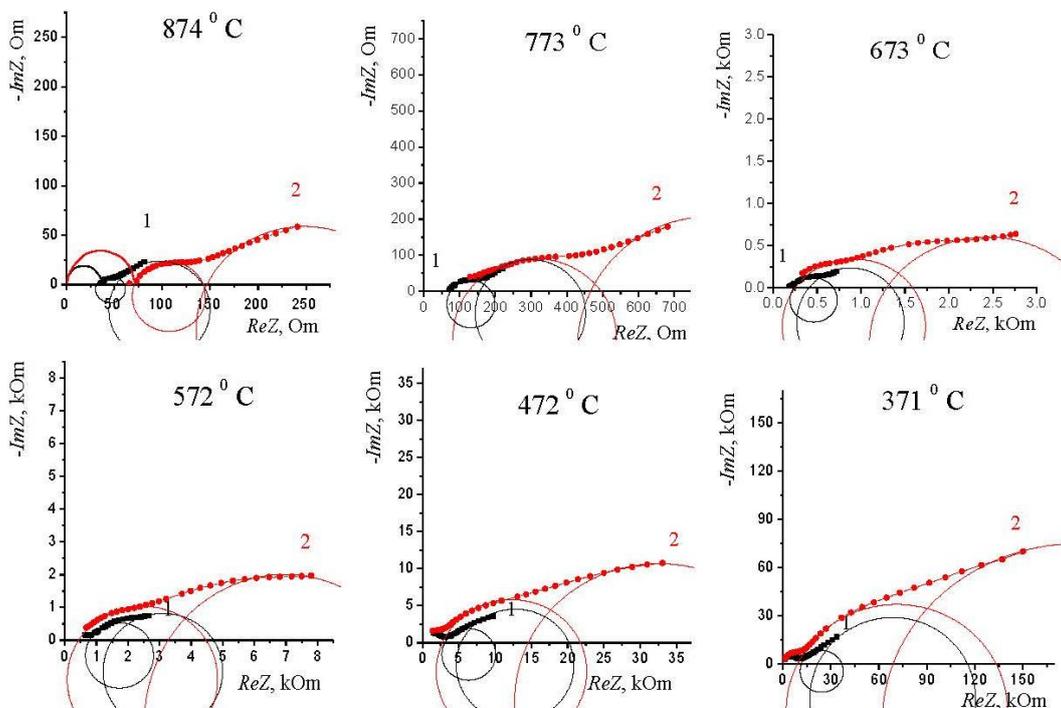


Рис. 11 – Годографы импеданса La_{5,6}WO_{11,4}, измеренные в сухом воздухе, при P(H₂O) = 10⁻⁴ атм; P(CO₂) = 10⁻³ атм: 1 – до выдержки; 2 – после выдержки при 200 °С во влажном воздухе

Fig. 11 – Hodographs of the impedance La_{5,6}WO_{11,4}, measured in dry air at P(H₂O) = 10⁻⁴ bar; P(CO₂) = 10⁻³ bar: 1 – prior to holding; 2 – after holding under 200 °C in humid air



По данным [30] и результатам ТГА (см. рис. 3) исследуемые составы должны быть устойчивы к воздействию H_2O и CO_2 при температуре выше $650\text{ }^\circ\text{C}$. Однако сравнение годографов импеданса, измеренных в сухом воздухе, до и после выдержки при $200\text{ }^\circ\text{C}$ во влажном воздухе (рис. 11) показало снижение проводимости в 2 ÷ 3 раза за счет прироста сопротивления границ зерен и электродов уже при $900\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 11 объемное сопротивление составляет отрезок на оси ReZ от начала координат до первой полуок-

ружности; зернограничное сопротивление – отрезок на оси ReZ, отсекаемый первой полуокружностью; электродное сопротивление – отрезок на оси ReZ, отсекаемый второй полуокружностью (в соответствии с расчетом в программе «ZView2»).

Как показано на рис. 12, для $La_{5,6}WO_{11,4}$ после выдержки во влажном воздухе зернограничное и электродное сопротивление оказывается выше примерно в 3 раза при $800\text{ }^\circ\text{C}$; в 5 раз при $400\text{ }^\circ\text{C}$; в 10 раз при $300\text{ }^\circ\text{C}$.

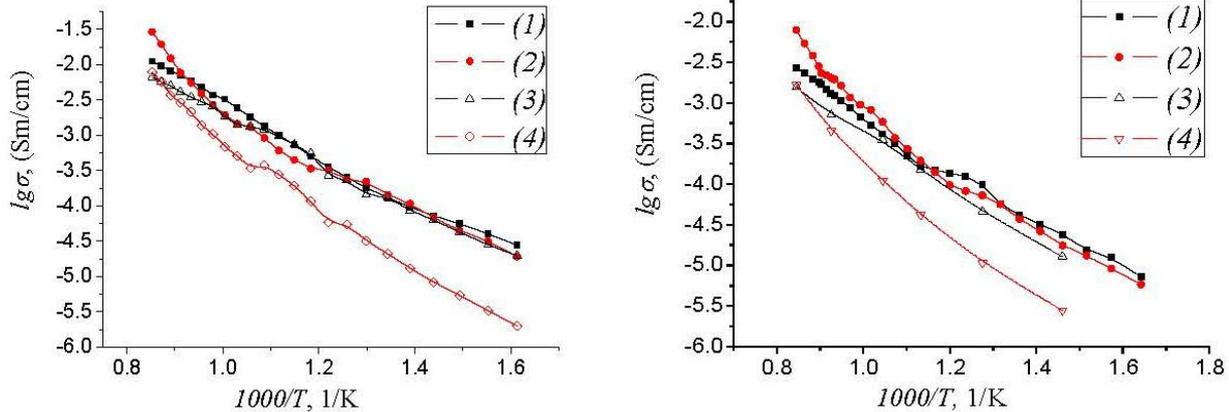


Рис. 12 – Температурные зависимости объемной и зернограничной проводимости для $La_{6-x}WO_{12-1.5x}$: а) $La_{5,6}WO_{11,4}$ и б) « $La_5WO_{10,5}$ », измеренные в сухом воздухе ($P(H_2O) = 10^{-4}$ атм, $P(CO_2) = 10^{-3}$ атм), до и после 30 суток выдержки при $200\text{ }^\circ\text{C}$ во влажном воздухе ($P(H_2O) = 10^{-2}$ атм, $P(CO_2) = 10^{-3}$ атм): 1) объемная до выдержки; 2) объемная после выдержки; 3) зернограничная до выдержки 4) зернограничная после выдержки

Fig. 12 – Temperature dependences of bulk and grain-boundary conductivity for $La_{6-x}WO_{12-1.5x}$: а) $La_{5,6}WO_{11,4}$ And б) « $La_5WO_{10,5}$ » measured in dry air ($P(H_2O) = 10^{-4}$ bar, $P(CO_2) = 10^{-3}$ bar) before and after holding for 30 days under $200\text{ }^\circ\text{C}$ in humid air ($P(H_2O) = 10^{-2}$ bar, $P(CO_2) = 10^{-3}$ bar): 1) bulk conductivity prior to holding; 2) grain boundary before holding; 3) bulk after holding; 4) grain boundary after holding

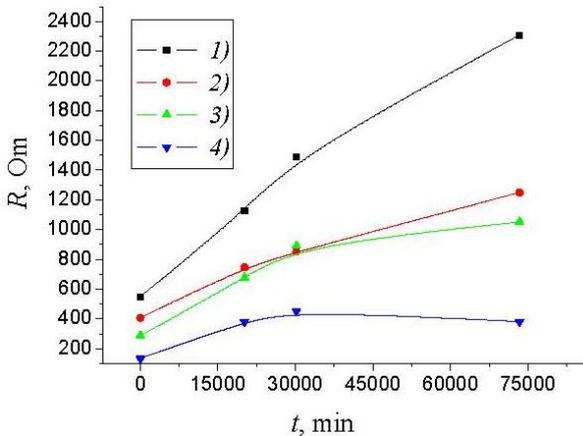


Рис. 13 – Изменение общего (сумма объемного и зернограничного) сопротивления ($800\text{ }^\circ\text{C}$) при выдержке образцов во влажном воздухе (60 суток $P(H_2O) = 10^{-2}$ атм, $P(CO_2) = 10^{-3}$ атм): 1) « $La_5WO_{10,5}$ »; 2) « $La_{5,2}WO_{10,8}$ »; 3) $La_{5,4}WO_{11,1}$; 4) $La_{5,6}WO_{11,4}$

Fig. 13 – A change in the total (sum of bulk and grain boundaries) resistance ($800\text{ }^\circ\text{C}$) when the samples are holding in humid air (60 days $P(H_2O) = 10^{-2}$ bar, $P(CO_2) = 10^{-3}$ bar): 1) « $La_5WO_{10,5}$ »; 2) « $La_{5,2}WO_{10,8}$ »; 3) $La_{5,4}WO_{11,1}$; 4) $La_{5,6}WO_{11,4}$

Поскольку прирост зернограничного сопротивления со временем может замедляться при образовании

на поверхности слоя продуктов, блокирующего диффузию H_2O и CO_2 , важно сравнить образцы по скорости роста зернограничного сопротивления во времени.

Самой низкой связанной с кинетическими затруднениями устойчивостью (рис. 13) отличается композитный образец номинального состава « $La_5WO_{10,5}$ », что, вероятно, обусловлено большим содержанием примеси $La_3WO_{7,5} \equiv La_6W_2O_{15}$.

Уменьшение содержания La при переходе от $La_{5,6}WO_{11,4}$ к « $La_5WO_{10,5}$ » должно повышать термодинамическую устойчивость к CO_2 , однако наличие примеси второй фазы $La_6W_2O_{15}$ (с низким качеством керамики согласно [32]) приводит к снижению связанной с кинетическими затруднениями устойчивости. По данным работы [32], примесная фаза $La_6W_2O_{15}$ отличается более низкой проводимостью по сравнению с основной фазой, а также низкой механической устойчивостью ввиду двух фазовых переходов, происходящих при $600\text{ }^\circ\text{C}$ и $930\text{ }^\circ\text{C}$. Как показано на рис. 13, образец с наибольшим содержанием La состава $La_{5,6}WO_{11,4}$ отличается относительно высокой связанной с кинетическими затруднениями устойчивостью к CO_2 – прирост его сопротивления наименьший.



5. Заключение

Методом термогравиметрии установлено, что вольфраматы лантана на базе La₆WO₁₂ отличаются сравнительно высокой термодинамической устойчивостью к CO₂ в воздухе (устойчивы при P(CO₂) = 10⁻³ атм выше 650 °С, аналогично BaZrO₃). Ниобаты бария кальция лантана (Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁) отличаются низкой термодинамической устойчивостью к CO₂ (устойчивы выше 850 ÷ 900 °С, аналогично BaCeO₃).

С помощью методов РФА и ТГА проведено оценочное сравнение устойчивости к H₂O и CO₂ Ba_{4-x}Ca_{2+x}Nb₂O₁₁ (x = 0,4; 0; -0,4). Установлено, что изменение состава твердых растворов незначительно меняет термодинамику взаимодействия с CO₂. При этом связанная с кинетическими затруднениями устойчивость существенно изменяется: керамика состава Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁ разрушается на воздухе, а Ba_{4,4}Ca_{1,6}Nb₂O₁₁ остается практически неизменной. Показано, что связанная с кинетическими затруднениями устойчивость керамики данных фаз возрастает при замещении Ca на Ba, так как повышается вероятность образования BaCO₃, создающего плотный блокирующий слой на границе зерен из-за близких мольных объемов сложнооксидной фазы и BaCO₃ (в отличие от CaCO₃).

Для относительно термодинамически устойчивых к CO₂ фаз La_{6-x}WO_{12-1,5x} (x = 0,4; 0,6) и композитов (x = 0,8; 1) на базе La₆WO₁₂ проведена более точная оценка связанной с кинетическими затруднениями устойчивости по измерению зернограницной проводимости методом импеданса. Показано, что зернограницная проводимость после выдержки в течение 1 месяца во влажном воздухе снижается примерно в 3 раза при 800 °С и в 10 раз при 300 °С, что свидетельствует о поверхностном взаимодействии с CO₂ керамики состава La_{6-x}WO_{12-1,5x} (x = 0,4; 0,6; 0,8; 1). Керамика состава La_{5,6}WO_{11,4} отличается относительно высокой связанной с кинетическими затруднениями устойчивостью к CO₂, так как наблюдаемый в течение 30 суток двукратный прирост сопротивления является наименьшим для исследованных образцов.

Благодарности

Эта работа была частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Государственное задание № 4.2288.2017) и Постановлением № 211 Правительства Российской Федерации, соглашение 02.A03.21.0006.

Acknowledgments

This work was supported in parts by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State Task 4.2288.2017) and by Act 211 Government of the Russian Federation, agreement 02.A03.21.0006.

Список литературы

- [1] Kawasaki, Y. Proton conduction and chemical stability of (La_{0,5}Sr_{0,5})(Mg_{0,5+y}Nb_{0,5-y})O_{3-d} [Text] / Y. Kawasaki [et al.] // Materials Research Bulletin. – 2009. – Vol. 44. – P. 457–461.
- [2] Pasierb, P. Application of DTA-TG-MS for determination of chemical stability of BaCeO_{3-δ} based protonic conductors [Text] / P. Pasierb [et al.] // Thermal Analysis and Calorimetry – 2014. – Vol. 117. – P. 683–691.
- [3] Lin, B. Stable, easily sintered BaCe_{0,5}Zr_{0,3}Y_{0,16}Zn_{0,04}O_{3-d} electrolyte-based protonic ceramic membrane fuel cells with Ba_{0,5}Sr_{0,5}Zn_{0,2}Fe_{0,8}O_{3-d} perovskite cathode [Text] / B. Lin [et al.] // Journal of Power Sources. – 2008. – Vol. 183. – P. 479–484.
- [4] Fabbri, E. Tailoring the chemical stability of Ba(Ce_{0,8-x}Zr_x)Y_{0,2}O_{3-δ} protonic conductors for intermediate temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFCs) [Text] / E. Fabbri [et al.] // Solid State Ionics. – 2008. – Vol. 179. – P. 558–564.
- [5] Shin, J.F. Enhanced CO₂ stability of oxyanion doped Ba₂In₂O₅ systems co-doped with La, Zr [Text] / J.F. Shin, P.R. Slater // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – P. 8539–8543.
- [6] Murugaraj, P. High proton conductivity in barium yttrium stannate BaYSnO_{5,5}. [Text] / P. Murugaraj [et al.] // Solid state ionics. – 1997. – Vol. 98. – P. 1–6.
- [7] Smith, A. D. Investigation into the incorporation of phosphate into BaCe_{1-y}A_yO_{3-y/2} (A = Y, Yb, In) [Text] / A.D. Smith and P.R. Slater // Inorganics. – 2014. – Vol. 2. – P. 16–28.
- [8] Magraso, A. Structure, chemical stability and mixed proton–electron conductivity in BaZr_{0,9-x}Pr_xGd_{0,1}O₃₋₁ [Text] / A. Magraso [et al.] // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – P. 9141–9147.
- [9] Bhella, S.S. Synthesis and characterisation of carbon dioxide and boiling water stable proton conducting double perovskite-type metal oxides [Text] / S.S. Bhella, V. Thangadurai // J. of Power Sources. – 2009. – Vol. 186. – P. 311–319.
- [10] Lu, J. Chemical stability of doped BaCeO₃–BaZrO₃ solid solutions in different atmospheres [Text] / J. Lu // Journal of Rare Earth. – 2008. – Vol. 26. – No. 4. – P. 505–510.
- [11] Medvedev, D.A. Sulfur and carbon tolerance of BaCeO₃–BaZrO₃ proton-conducting materials [Text] / D.A. Medvedev [et al.] // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 273–P. 716–723.
- [12] Medvedev, D.A. BaCeO₃: Materials development, properties and application. [Text] / D.A. Medvedev [et al.] // Progress in Materials Science. – 2014. – Vol. 60 – P. 72–129.
- [13] Kakinuma, K. Oxide-ion conductivity of (Ba_{1-x}La_x)₂In₂O_{5+x} system based on brownmillerite structure [Text] / K. Kakinuma [et al.] // Solid State Ionics. – 2001. – Vol. 140. – P. 301–306.
- [14] Строева, А.Ю. Электропроводность и природа ионного переноса в системе La_{1-x}Sr_xSc_{1-y}Mg_yO_{3-α} (0,01 ≤ x = y ≤ 0,20) в сухом и влажном воздухе



[Текст] / А.Ю. Строева [и др.] // Электрохимия. – 2010. – Т. 46. – № 5. – С. 585–593.

[15] Haugrud, R. Defects and transport properties in $\text{Ln}_6\text{WO}_{12}$ ($\text{Ln}=\text{La}, \text{Nd}, \text{Gd}, \text{Er}$) [Text] / R. Haugrud // *Solid State Ionics*. – 2007. – Vol. 178. – P. 555–560.

[16] Ярославцев, А.Б. Основные направления разработки и исследования твердых электролитов [Текст] / А.Б. Ярославцев // *Успехи химии*. – 2016. – Т. 85. – С. 1255–1276.

[17] Malavasi, L. Oxide-ion and proton conducting electrolyte materials for clean energy applications: structural and mechanistic features [Text] / L. Malavasi, C.A.J. Fisher, and M. S. Islam // *Chemical Society Revue*. – 2010. – Vol. 39. – P. 4370–4387.

[18] Ma, G. Enhanced proton conduction of $\text{BaZr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ by hybrid doping of ZnO and Na_3PO_4 [Text] / Ma G. [et al.] // *Solid State Ionics*. – 2015. – Vol. 281. – P. 6–11.

[19] Schober, T. Composites of ceramic high-temperature proton conductors with inorganic compounds [Text] // T. Schober // *Electrochemical and Solid-State Letters*. – 2005. – Vol. 8 – No. 4. – P. 199–200.

[20] Шилкина, Л.А. Эффекты легирования титаната свинца щелочноземельными элементами [Текст] / Л.А. Шилкина [др.] // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58. – № 1. – С. 114–124.

[21] Горелов, В.П. Ионная, протонная и кислородная проводимости в системе $\text{BaZr}_{1-x}\text{Y}_x\text{O}_{3-\alpha}$ ($x=0.02-0.15$) во влажном воздухе [Текст] / В.П. Горелов, В.Б. Балакирева, А.В. Кузьмин // *Электрохимия*. – 2010. – Т. 46. – № 8 – С. 948–953.

[22] Третьяков, Ю.Д. Твердофазные реакции. / Ю.Д. Третьяков. – М.: Химия, 1978. – 360 с.

[23] Буянова, Е.С. Импедансная спектроскопия электролитических материалов: уч. пособие [Текст] / Е.С. Буянова, Ю.В. Емельянова. – Екатеринбург: УрГУ, 2008. – 70 с.

[24] Kalinina, T.A. Phase diagrams of $\text{BaO}-\text{In}_2\text{O}_3$ system [Text] / T.A. Kalinina [et al.] // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 1983. – Vol. 28. – No. 2. – P. 269–262.

[25] Trunov, V. K. The $\text{BaO}-\text{Nb}_2\text{O}_5$ system [Text] / V. K. Trunov, Yu. A. Velikodnyi and L. G. Makarevich // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 1979. – Vol. 24. – No. 5. – P. 737–739.

[26] Shirsat, A.N., Ali M., Kaimal K.N.G., Bharadwaj S.R., Das D. Thermochemistry of $\text{La}_2\text{O}_3\text{CO}_3$ decomposition [Text] / A.N. Shirsat [et al.] // *Thermochimica Acta*. – 2003. – Vol. 399. – P. 167–170.

[27] Ivanova, M. M. The constitution diagram of the $\text{La}_2\text{O}_3-\text{WO}_3$ system [Text] / M.M. Ivanova, G.M. Balagina, and E.Ya. Rode // *Inorganic Materials*. – 1970. – Vol. 6. – No. 5. – P. 803–805.

[28] Химическая энциклопедия / Под ред.: Кнунянц И.Л. [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 623 с.

[29] Magraso, A. Complete structural model for lanthanum tungstate: a chemically stable high temperature proton conductor by means of intrinsic

defects [Text] / A. Magraso [et al.] // *Journal of Material Chemistry* – 2012. – Vol. 22. – P. 1762–1764.

[30] Animitsa, I.E. Proton and oxygen-ion conductivity of $\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_{11}$ [Text] / I.E. Animitsa [et al.] // *Solid State Ionics*. – 2003. – Vol. 162–163. – P. 63–71.

[31] Ivanova, M. E., Influence of the $\text{La}_6\text{W}_2\text{O}_{15}$ Phase on the Properties and Integrity of $\text{La}_{6-x}\text{WO}_{12-\delta}$ -Based Membranes [Text] / M. E. Ivanova [et al.] // *Chemistry and Materials Research*. – 2012. – Vol. 2. – P. 56–83.

[32] Савин, В.Д. Оксикарбонатные соединения редкоземельных металлов [Текст] / В.Д. Савин, Н.П. Михайлова, З.В. Еременко // *Журнал неорганической химии*. – 1987. – Т. 32 – № 11. – С. 2662–2666.

References

[1] Kawasaki Y., Okada S., Ito N., Ishihara T. Proton conduction and chemical stability of $(\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})(\text{Mg}_{0.5+y}\text{Nb}_{0.5-y})\text{O}_{3-d}$. *Materials Research Bulletin*, 2009; 44(2):457–461.

[2] Pasierb P., Gajerski R., Osiadly M., Lacz A. Application of DTA-TG-MS for determination of chemical stability of $\text{BaCeO}_{3-\delta}$ based protonic conductors. *Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014;117(3):683–691.

[3] Lin B., Zhang S., Zhang L., Bi L., Ding H., Liu X., Gao J. and Meng G. Stable, easily sintered $\text{BaCe}_{0.5}\text{Zr}_{0.3}\text{Y}_{0.16}\text{Zn}_{0.04}\text{O}_{3-d}$ electrolyte-based protonic ceramic membrane fuel cells with $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-d}$ perovskite cathode. *Journal of Power Sources*, 2008;183(2):479–484.

[4] Fabbri E., D'Epifanio A., Di Bartolomeo E., Licocchia S., Traversa E. Tailoring the chemical stability of $\text{Ba}(\text{Ce}_{0.8-x}\text{Zr}_x\text{Y}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ protonic conductors for intermediate temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFCs). *Solid State Ionics*, 2008;179(15–16):558–564.

[5] Shin J.F., Slater P.R. Enhanced CO_2 stability of oxyanion doped $\text{Ba}_2\text{In}_2\text{O}_5$ systems co-doped with La, Zr. *Journal of Power Sources*, 2011;196(20):8539–8543.

[6] Murugaraj P., Kreuer K.D., He T., Schober T., Maier J. High proton conductivity in barium yttrium stannate $\text{BaYSnO}_{5.5}$. *Solid state ionics*, 1997;98(1):1–6.

[7] Smith A.D., Slater P.R. Investigation into the incorporation of phosphate into $\text{BaCe}_{1-y}\text{A}_y\text{O}_{3-y/2}$ ($\text{A} = \text{Y}, \text{Yb}, \text{In}$), *Inorganics*, 2014;2(1):16–28.

[8] Magraso A., Frontera C., Gunnæs A. E., Taracón A., Marrero-López D., Norby T., Haugrud R. Structure, chemical stability and mixed proton–electron conductivity in $\text{BaZr}_{0.9-x}\text{Pr}_x\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{3-1}$. *Journal of Power Sources*, 2011;196(22):9141–9147.

[9] Bhella S.S., Thangadurai V. Synthesis and characterisation of carbon dioxide and boiling water stable proton conducting double perovskite-type metal oxides. *Journal of Power Sources*, 2009;186(2):311–319.

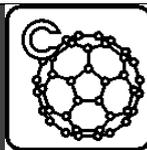
[10] Lu J. Chemical stability of doped $\text{BaCeO}_3-\text{BaZrO}_3$ solid solutions in different atmospheres. *Journal of Rare Earth*, 2008;26(4):505–510.



- [11] Medvedev D., Lyagaeva J., Plaksin S., Demin A., Tsiakaras P. Sulfur and carbon tolerance of BaCeO₃-BaZrO₃ proton-conducting materials. *Journal of Power Sources*, 2015;273(4):716–723.
- [12] Medvedev D., Murashkina A., Pikalova E., Demin A., Podias A., Tsiakaras P. BaCeO₃: Materials development, properties and application. *Progress in Materials Science*, 2014;60(1):72–129.
- [13] Kakinuma K., Yamamura H., Haneda H., Atake T. Oxide-ion conductivity of (Ba_{1-x}La_x)₂In₂O_{5+x} system based on brownmillerite structure. *Solid State Ionics*, 2001;140(3–4):301–306.
- [14] Stroeve A.Yu., Balakireva V.B., Dunyushkina L.A., Gorelov V.P. Electroconductivity and nature of ionic transport in system of La_{1-x}Sr_xSc_{1-y}Mg_yO_{3-α} (0,01≤x=y≤0,20) in dry and wet air (Elektroprovodnost' i priroda ionnogo perenosa v sisteme La_{1-x}Sr_xSc_{1-y}Mg_yO_{3-α} (0,01≤x=y≤0,20) v sukhom i vlazhnom vozdukh). *Elektrokhimiya*, 2010;46(5):585–593 (in Russ.).
- [15] Haugrud R. Defects and transport properties in Ln₆WO₁₂ (Ln=La, Nd, Gd, Er). *Solid State Ionics*, 2007;178(7–10):555–560.
- [16] Yaroslavtsev A.B. Basic directions of development and research of solid electrolytes (Osnovnye napravleniya razrabotki i issledovaniya tverdykh elektrolitov). *Uspekhi khimii*, 2016;85(11):1255–1276 (in Russ.).
- [17] Malavasi L., Fisher C. A. J. and Islam M. S. Oxide-ion and proton conducting electrolyte materials for clean energy applications: structural and mechanistic features. *Chemical Society Review*, 2010;39(11):4370–4387.
- [18] Ma G., Wen Z., Han J., Zhang J., Wen Y. Enhanced proton conduction of BaZr_{0.9}Y_{0.1}O_{3-δ} by hybrid doping of ZnO and Na₃PO₄. *Solid State Ionics*, 2015;281(1):6–11.
- [19] Schober T. Composites of ceramic high-temperature proton conductors with inorganic compounds. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2005;8(4):199–200.
- [20] Shilkina L.A., Reznichenko L.A., Razumovskaya O.N., Dudkina S.I., Vlasenko V.G., Shevtsova S.I., Guglev K.A., Kozakov A.T., Nikol'skii A.V. Effects of doping lead titanate with alkaline earth elements (Effekty legirovaniya titanata svintsa shchelochnozemel'nymi elementami). *Fizika tverdogo tela*, 2016;58(1):114–124 (in Russ.).
- [21] Gorelov V.P., Balakireva V.B., Kuz'min A.V. Ionic, proton and oxygen-ion conductivities in system of BaZr_{1-x}Y_xO_{3-α} (x = 0.02–0.15) in wet air (Ionnaya, protonnaya i kislorodnaya provodimosti v sisteme BaZr_{1-x}Y_xO_{3-α} (x = 0.02–0.15) vo vlazhnom vozdukh). *Elektrokhimiya*, 2010;46(8):948–953 (in Russ.).
- [22] Tretyakov Yu.D. Solid state reactions (Tverdogaznye reaktsii).— M.: *Khimiya*, 1978 (in Russ.).
- [23] Buyanova E.S., Emel'yanova Yu.V. Impedance spectroscopy of electrolytic materials: a training manual (Impedansnaya spektroskopiya elektroliticheskikh materialov: uch. posobie). Ekaterinburg: *UrGU*, 2008. — 70 p. (in Russ.).
- [24] Kalinina T.A., Lykova L.N., Kovba L.M., Mel'nikova M.G., and Porotnikov N. V. Phase diagrams of BaO-In₂O₃ system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1983;28(2):259–262.
- [25] Trunov V.K., Velikodnyi Yu.A., Makarevich L.G. The BaO-Nb₂O₅ system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1979;24(5):737–739.
- [26] Shirsat A.N., Ali M., Kaimal K.N.G., Bharadwaj S.R., Das D. Thermochemistry of La₂O₂CO₃ decomposition. *Thermochimica Acta*, 2003;399:167–170.
- [27] Ivanova M.M., Balagina G.M., and Rode E.Ya., The constitution diagram of the La₂O₃-WO₃ system (Diagramma sostoyaniya sistemy La₂O₃-WO₃). *Inorganic Materials*, 1970;6(5):803–805.
- [28] Chemical encyclopedia (Khimicheskaya entsiklopediya) / Ed.: Knunyants I.L. et al. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988;1:623 p. (in Russ.).
- [29] Animitsa I. Neiman A., Kochetova N., Melekh B., Sharafutdinov A. Proton and oxygen-ion conductivity of Ba₄Ca₂Nb₂O₁₁. *Solid State Ionics*, 2003;162–163(1):63–71.
- [30] Magraso A., Polfus J. M., Frontera C., Canales-Vazquez J., Kalland L.E., Hervoches C. H., Erdal, S., Hancke R., Islam M. S., Norby T. and Haugrud R. Complete structural model for lanthanum tungstate: a chemically stable high temperature proton conductor by means of intrinsic defects. *Journal of Material Chemistry*, 2012;22(4):1762–1764.
- [31] Ivanova M.E., Seeger J., Serra J.M., Solis C., Meulenberg W.A., Fischer W., Roitsch S., Buchkremer H.P. Influence of the La₆W₂O₁₅ phase on the properties and integrity of La_{6-x}WO_{12-δ}-based membranes. *Chemistry and Materials Research*, 2012;2(1):56–83.
- [32] Savin V.D., Mikhailova N.P., Eremanko Z.V. Oxidicarbonate compounds of rare earth metals (Oksikarbonatnye soedineniya redkozemel'nykh metallov). *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 1987;32(11):2662–2666 (in Russ.).

Транслитерация по BSI





РЕЛАКСАЦИОННЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЛИТОЛА-24 С МЕЗОГЕННЫМИ ПРИСАДКАМИ*

Л.В. Ельникова¹, А.Т. Пономаренко², В.Г. Шевченко²

¹ФГБУ «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова»
НИЦ «Курчатовский институт»

д. 25, ул. Большая Черемушкинская, Москва, 117218, Россия
тел.: +7 (906) 086-25-82; e-mail: elnikova@itep.ru

²Институт синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова РАН

д. 70, ул. Профсоюзная, Москва, 117393, Россия
тел.: +7 (495) 333-94-70; e-mail: anapon@ispm.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.060-069

Заключение совета рецензентов: 28.03.18 Заключение совета экспертов: 05.04.18 Принято к публикации: 12.04.18

Для повышения износостойкости деталей машин в промышленности и сельском хозяйстве применяются разнообразные синтетические смазки с мезогенными присадками, так как добавление присадки в базовую смазку приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа детали. Такие многокомпонентные системы, как смазки, с присадками являются лиотропными жидкими кристаллами (ЖК) и демонстрируют богатый мезоморфизм, который также влияет на их трибологические характеристики. Построение фазовых диаграмм ЖК смазок с присадками в зависимости от концентрации и термодинамических величин является важной исследовательской задачей в связи с необходимостью оптимизации компонентного состава смазок и выяснения режимов их наиболее эффективного функционирования. В этой связи кроме проведения механических испытаний деталей в присутствии смазочных композиций необходимо изучать физико-химические свойства и проводить структурные исследования многокомпонентных смазок.

Настоящее исследование было проведено с целью дополнить имеющиеся данные оптической и рентгеновской спектроскопии, электронной микроскопии и теоретические оценки термодинамических параметров смазочных композитов результатами диэлектрической спектроскопии. С помощью данного метода впервые исследованы электрические свойства смазочных композиций на основе Литола-24, включающие в себя мезогенные присадки в виде гомологов карбоксилатов меди (II), валерата и изовалерата меди, с концентрацией 1 масс. %, 5 масс. %, 10 масс. % и 20 масс. %. Получены частотные зависимости диэлектрической проницаемости, электропроводности, тангенса угла потерь, температурные и концентрационные зависимости электрических величин смазочных композиций при использовании измерительного электрического поля в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц и при нагреве от комнатной температуры до температур, превышающих температуры плавления Литола-24. Подтверждена возможность возникновения фазовых переходов между колончатой и изотропной жидкокристаллическими фазами при концентрациях присадок 1 масс. %, 5 масс. % и 10 масс. %, по порядку величин оценены энергии активации смазочных композиций. Полученные результаты применимы для анализа трибологических показателей смазочных композиций.

*Ельникова Л.В., Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г. Релаксационные и диэлектрические свойства смазочных композиций на основе литола-24 с мезогенными присадками // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):60-69.

Ключевые слова: смазочные композиции на основе Литола-24; присадки; карбоксилаты меди; диэлектрические измерения.

RELAXATION AND DIELECTRIC PROPERTIES OF LUBRICANT COMPOSITIONS BASED ON LITOL-24 WITH MESOGENIC ADDITIVES

L.V. Elnikova, A.T. Ponomarenko, V.G. Shevchenko

¹Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, NRC Kurchatov Institute
25 Bolshaya Cheremushkinskaya St., Moscow, 117218, Russia
tel: +7 (906) 086 25 82, e-mail: elnikova@itep.ru

²Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials, Russian Academy of Sciences
70 Profsoyuznaya St., Moscow, 117393, Russia
tel.: +7 (495) 333 94 70, e-mail: anapon@ispm.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.060-069

Referred 28 March 2018 Received in revised form 5 April 2018 Accepted 12 April 2018

In order to improve the wear resistance of machine parts in industry and agriculture, the various synthetic lubricants with mesogenic additives are used. It is established that adding an additive to the base lubricant leads to a decrease in the friction coefficient and a decrease in the wear of the machine parts. Such multi-component systems, lubricants and additives, are lyotropic liquid crystals (LC) and exhibit rich mesomorphism which also affects their tribological characteristics. The composing of phase diagrams of LC lubricants with additives depending on the concentration and thermodynamic quantities is an important research task in connection with the need to optimize the composition of lubricants and to determine the regimes of their most effective employment. In this regard, in addition to mechanical testing of specimens in the presence of lubricant compositions, it is necessary to study the physico-chemical properties and carry out structural studies of multicomponent lubricants.

We were motivated by the possibility to complement the existing data on the optical and X-ray spectroscopy, electron microscopy and theoretical studies of the thermodynamic parameters of lubricant composites by dielectric spectroscopy (DE). Using the method of DE spectroscopy, we first investigated the electrical properties of lubricating compositions based on Litol's-24 comprising mesogenic additives as homologues carboxylates of copper (II), valerate and isovalerate copper in the concentration range 1, 5, 10 and 20 wt. %. We found the frequency dependence of the dielectric permeability, conductance, dielectric loss, as well as the temperature and concentration dependence of the electrical quantities of lubricant compositions in the measuring electric field of the frequency range 100 Hz – 1 MHz and at heating from room temperature to temperatures exceeding Litol's-24 melting temperature. The paper confirms the possibility of the occurrence of phase transitions between the columnar and isotropic liquid-crystalline phases at the concentrations of additives of 1, 5 and 10 wt. %, and estimates the activation energies of the lubricant compositions in order of magnitude. The obtained results are applicable for the analysis of tribological characteristics of lubricant compositions.

Keywords: Litol-24 based lubricant composites; additives; карбоксилаты меди; dielectric measurements.



Лилия Вячеславовна
Ельникова
Liliya Elnikova

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, ФГБУ «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова» НИЦ «Курчатовский институт».

Образование: НИЯУ МИФИ (1998 г.).

Область научных интересов: физика конденсированных сред; геометрия, топология.

Публикации: 67.

h-index: 2

ORCID: 0000-0003-4525-5755

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Scientific Researcher, Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, NRC "Kurchatov Institute".

Education: MPhI National Research Nuclear University, 1998.

Research interests: condensed matter; geometry, topology.

Publications: 67.



Анатолий Тихонович
Пономаренко
Anatoliy Ponomarenko

Сведения об авторе: д-р хим. наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, главный научный сотрудник Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН.

Образование: Киевский технологический институт; инженер-технолог (1958 г.).

Область научных интересов: физическая химия; кинетика полимеризационных процессов; современное материаловедение в электромагнитных полях; функциональные структуры с применением полимерных материалов.

Публикации: более 300, в том числе 2 монографии и 1 учебное пособие.
h-index: 11

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Professor, Full Member of Prokhorov Academy of Engineering Science, Principal Researcher at N.S. Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials.

Education: Kiev Institute of Technology, 1958.

Research interests: physical chemistry; polymerization kinetics; materials science in electromagnetic field; polymer-based functional structures.

Publications: more than 300 including 2 books and a textbook.



Виталий Георгиевич
Шевченко
Vitaliy Shevchenko

Сведения об авторе: д-р хим. наук, ведущий научный сотрудник Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1974 г.).

Область научных интересов: полимерные нанокмозиты; диэлектрическая спектроскопия; функциональные наноматериалы.

Публикации: 163.
h-index: 11
ORCID: 0000-0002-1895-9872

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Leading Researcher at N.S. Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1974.

Research interests: polymer nanocomposites; dielectric spectroscopy; functional nanomaterials.

Publications: 163.

1. Введение

Для повышения износостойкости деталей машин применяются смазочные композиции, состоящие из базовых смазок и мезогенных присадок. Такие многокомпонентные системы являются лиотропными жидкими кристаллами и могут проявлять мезоморфизм нематического, смектического, дискотического типа [1–3]. Промышленные смазки на основе Литола-24 используются в машинах и механизмах более века, их характеристики и состав стандартизированы [4]. В результате многократных испытаний изделий на машинах трения в присутствии смазочных композиций [1–3] установлено, что добавление присадок к базовым смазкам влияет на их физико-химические свойства и эксплуатационные показатели (в частности, повышается температура плавления, а также улучшаются трибологические характеристики: уменьшается коэффициент трения и износ, увеличивается срок службы деталей машин). Физические свойства присадок, определяющие мезоморфизм в смазочных композициях, изучались методами ин-

фракрасной Фурье-спектроскопии [5] и другими методами, а самоорганизация композитных колончатых фаз предсказывалась в теории [6].

В настоящей работе методом диэлектрической спектроскопии впервые изучены частотные зависимости электрических величин композитов на основе Литола-24 с присадками валерата и изовалерата меди(II) в различных концентрациях в температурных диапазонах от нормальных условий до температур, превышающих температуры плавления. В исследуемых смазочных композициях при изменении концентрации присадки происходит лиотропный переход между изотропной и дискотической фазами [2]. Цель диэлектрических измерений – установление термодинамических и концентрационных зависимостей фазовых диаграмм композитов на основании соотношений электрических величин. Это позволяет детально охарактеризовать мезоморфизм в смазочных композициях с карбоксилатами меди (KM) и решить задачи поиска их перспективных индустриальных и сельскохозяйственных применений.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

$tg\delta$	Тангенс угла диэлектрических потерь
ε'	Диэлектрическая проницаемость
ε''	Диэлектрические потери
σ	Электропроводность, Ом ⁻¹ см ⁻¹

Продолжение списка обозначений

ω	Частота переменного тока, 1/с
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
a	Параметр симметричного уширения релаксационного процесса
b	Параметр асимметричного уширения релаксационного процесса
C	Электрическая емкость ячейки с веществами, Ф
f	Величина переменного тока, Гц
f_0	Обратное время релаксации, 1/с
Q	Энергия активации, эВ
R	Электрическое сопротивление ячейки с веществами, Ом
T	Температура, К
<u>Индексы нижние</u>	
HN	Модель Хаврилиака – Негами
<u>Аббревиатуры</u>	
ДЭ	Диэлектрические
ЖК	Жидкие кристаллы
КМ	Карбоксилат меди

2. Материалы и методы

Гомологи КМ валерат и изовалерат были синтезированы в Ивановском государственном университете, НИИ наноматериалов и Ивановской государственной сельскохозяйственной академии по методикам, изложенным в [3]. Структурная формула валерата и изовалерата меди(II) изображена на рис. 1. Авторами [2–3] были приготовлены смазочные композиции путем механического смешивания Литола-24 с порошками карбоксилатов меди(II) $Cu(C_4H_9COO)_2$ в концентрациях 1 масс.%, 5 масс.%, 10 масс.% и 20 масс.%.

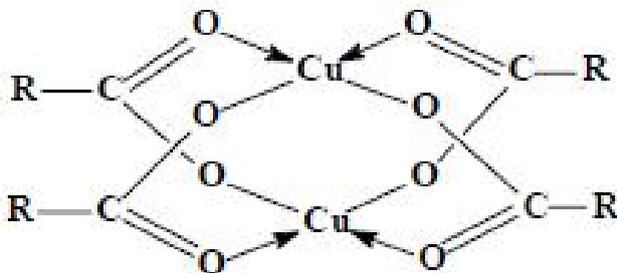


Рис. 1 – Структурная формула валерата и изовалерата меди(II), R = C₄H₉ [3]

Fig. 1 – Structure formula of Cu(II) valerates and isovalerates, R = C₄H₉ [3]

Измерения электрических величин – сопротивления, емкости, индуктивности – проводились в соответствии со стандартной методикой [7] при помощи установки Fluke PM 6303 (измеритель емкости, сопротивления, индуктивности) в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц с точностью измерений 0,1 % [8]. Программное обеспечение измерительного устройства Fluke PM 6303 позволяет задавать и регулировать параметры и фиксировать результаты измерений в текстовые файлы для последующей обработки.

Образцы в измерительных ячейках емкостью 7 pF помещались в блок термостатирования, который включает в себя воздушный термостат с регулятором

температуры, позволяющим менять скорость нагрева объектов измерений. Объем исследуемого вещества в ячейке составлял 2,12 см³, площадь электрода – 7,07 см². Температура образцов внутри термостата регистрировалась с помощью цифрового термометра Актаком АТТ-2002 с погрешностью измерений, не превышающей 0,5°. Измерение электрических характеристик проводилось в режиме непрерывного нагрева и фиксировалось на данной частоте.

Диэлектрические (ДЭ) измерения проводились при нагреве с шагом 10° в два последовательных цикла от комнатной температуры до температур плавления чистого Литола-24, охлаждение осуществлялось до комнатной температуры, последующий нагрев проходил до температур, превышающих температуру плавления на 10 ÷ 30 К. При измерении емкости образцов наблюдался температурный гистерезис. Для анализа ДЭ спектров использовались данные повторного нагрева.

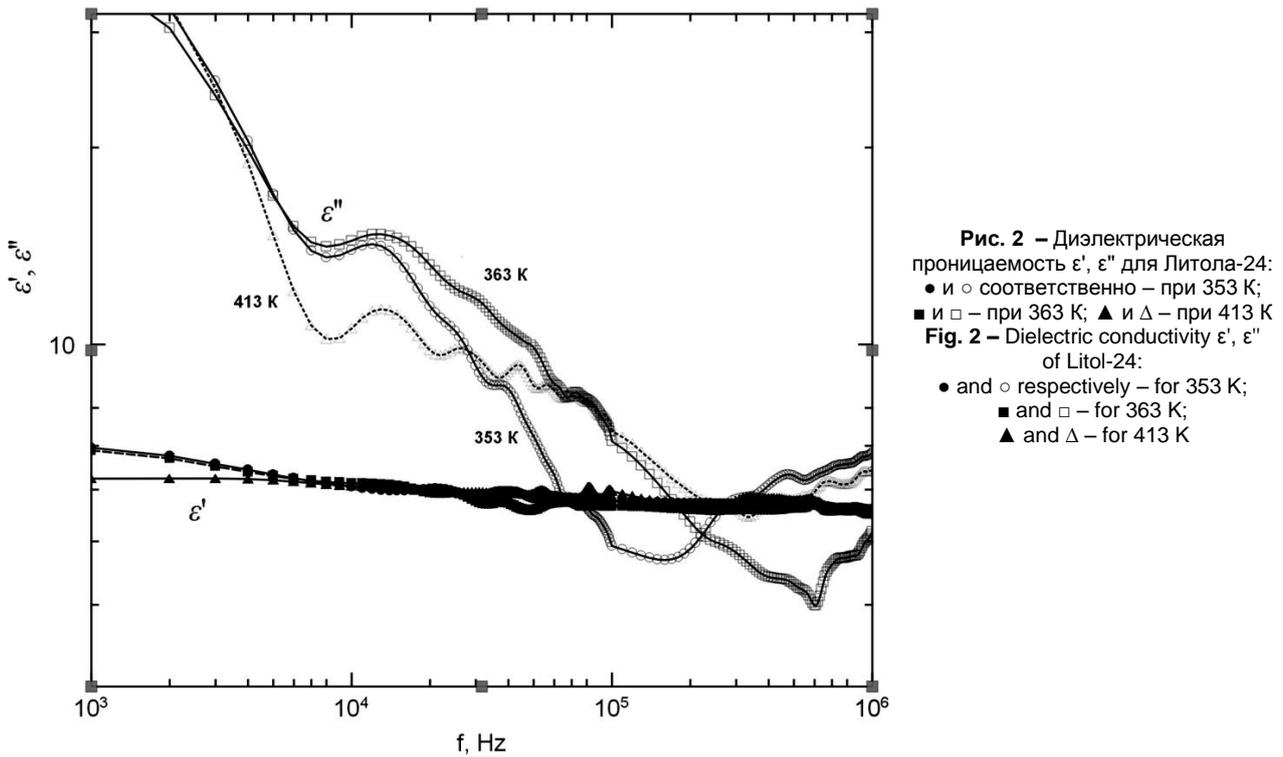
ДЭ измерения проводились по схеме идеального конденсатора, при этом были получены частотные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' , ϵ'' и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta = 1/\omega CR$.

3. Анализ результатов

Диэлектрические величины Литола-24 и смазочных композиций на его основе изображены на рис. 2–7.

Литол-24 является многокомпонентным лиотропным мезоморфным веществом, в составе которого присутствуют: смазочное масло (30 ÷ 40 %) с молярной массой от 250 г/моль до 1 000 г/моль и более; масло остаточное депарафинированное (50 ÷ 60 %) с молярной массой 390 000 г/моль; 12-гидроксистеарат лития (10 ÷ 15 %) с молярной массой 306, 41 г/моль; дифениламин (до 0,5 %) с молярной массой 169,227 г/моль. Молярная масса КМ $Cu(C_4H_9COO)_2$ составляет 435,546 г/моль. На частотах более 1 МГц при различных температурах ожидается появление пиков тангенса угла потерь, которые могут отвечать различным процессам релаксации (рис. 2).

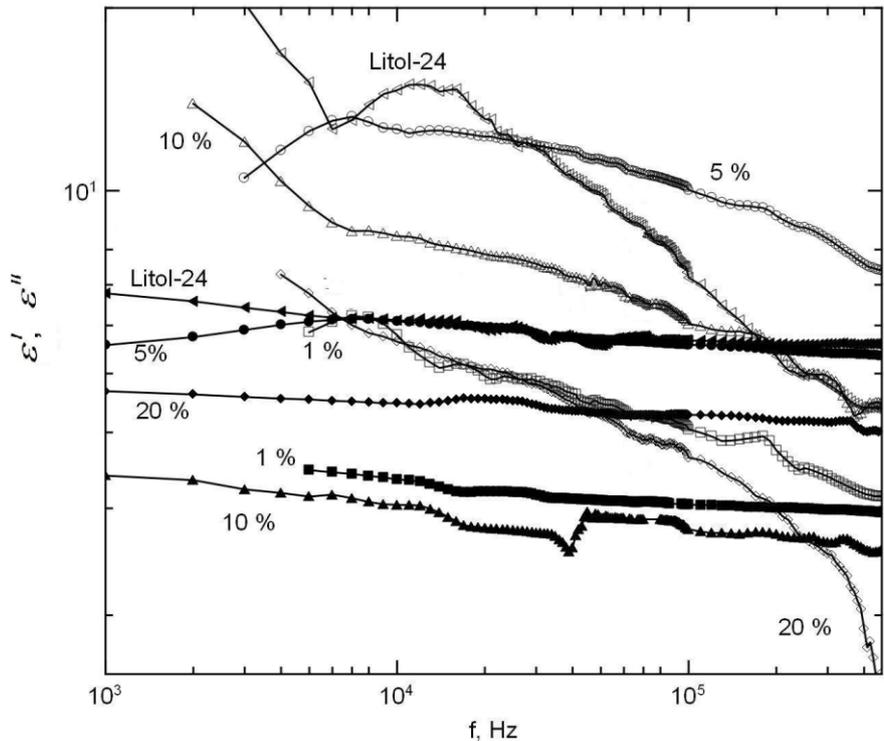




В присутствии добавок в соотношении 1 масс.%, 5 масс.%, 10 масс.% и 20 масс.% при воздействии частот от 100 Гц до 1 МГц проявилось изменение характера диэлектрической проницаемости $\epsilon'+i\epsilon''$ и электропроводности (рис. 3–7).

Рис. 3 – Частотная зависимость ϵ' , ϵ'' Литола-24 с различными концентрациями валерата меди при 363 К: ■ и □ соответственно – 1%; ● и ○ – 5%; ▲ и Δ – 10%; ◇ и ◆ – 20%; наклонные треугольники – бесприсадочный Литол-24

Fig. 3 – Frequency dependencies of ϵ' , ϵ'' for Litol-24 with different concentrations of Cu(II) valerate at 363 K: ■ and □ respectively – 1%; ● and ○ – 5%; ▲ and Δ – 10%; ◇ and ◆ – 20%; tilted triangles – for additiveless Litol-24



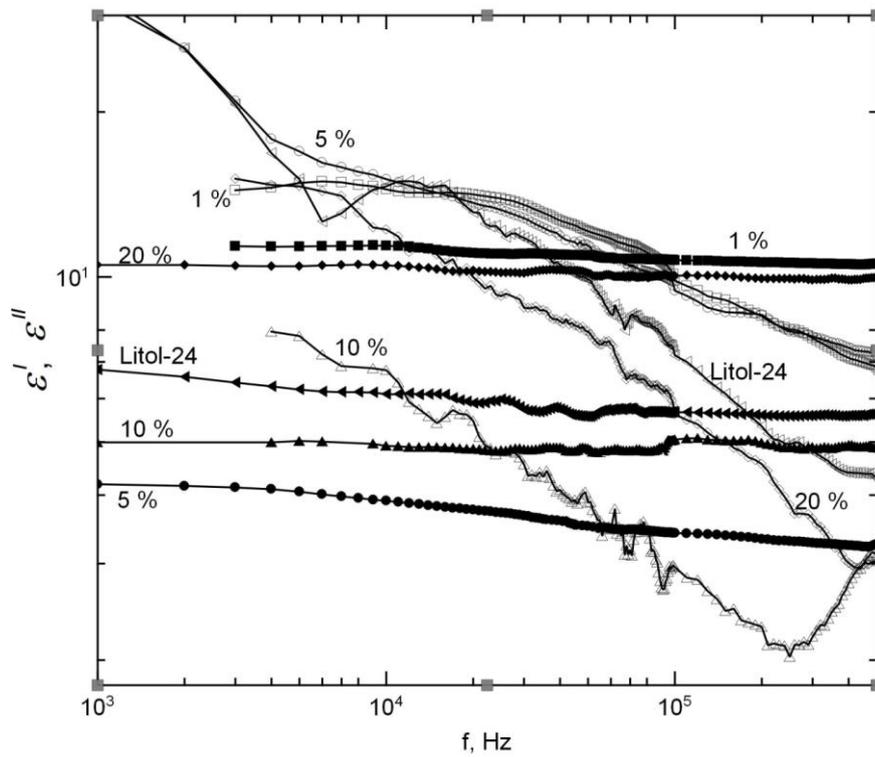
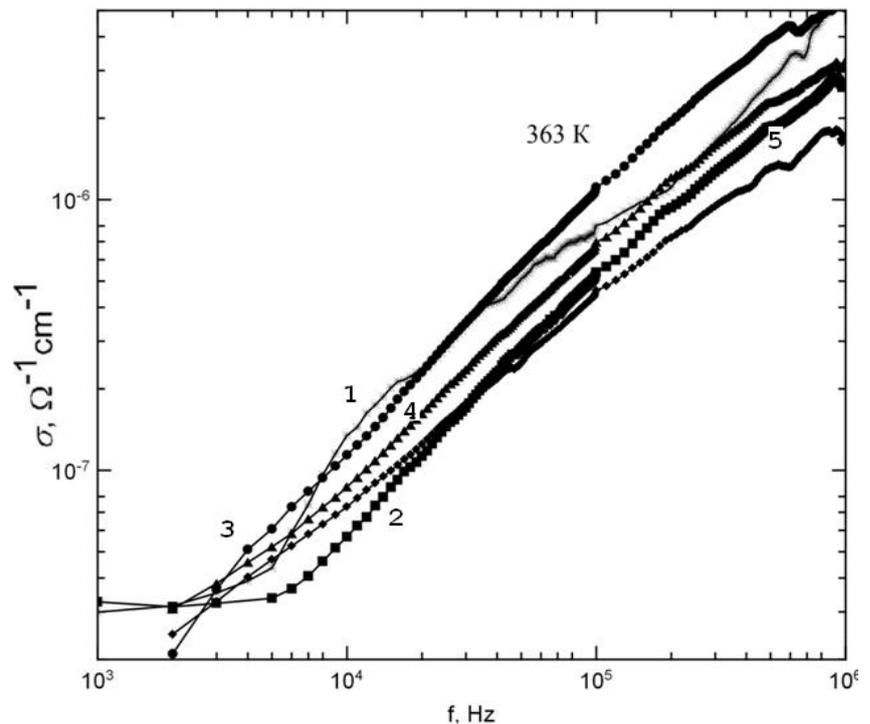


Рис. 4 – Частотная зависимость ϵ' и ϵ'' Литола-24 с различными концентрациями изовалерата меди при 363 К:

■ и □ соответственно – 1 %;
 ● и ○ – 5 %; ▲ и △ – 10 %;
 ◇ и ◆ – 20 %;
 наклонные треугольники –
 бесприсадочный Литол-24
Fig. 4 – Frequency dependencies of ϵ' , ϵ'' for Litol-24 with different concentrations of Cu(II) isovalerate at 363 K:
 ■ and □ respectively – 1 %;
 ● and ○ – 5 %; ▲ and △ – 10 %;
 ◇ and ◆ – 20 %;
 tilted triangles – for additiveless Litol-24

Рис. 5 – Электропроводность Литола-24 (кривая 1) и системы Литол-24 с различными концентрациями валерата меди при температуре 363 К: 1% (кривая 2); 5% (кривая 3); 10% (кривая 4); 20% (кривая 5)

Fig. 5 – Electroconductivity of Litol-24 (curve 1) and of the system Litol-24 with different concentrations of Cu(II) valerate at 363 K:
 1% (curve 2); 5% (curve 3);
 10% (curve 4); and 20% (curve 5)



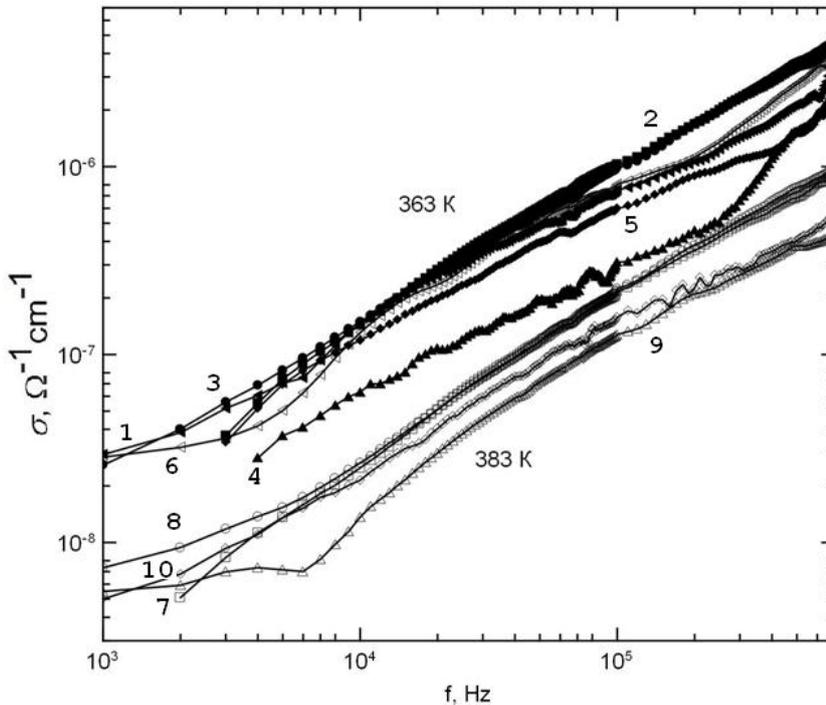


Рис. 6. – Электропроводность Литола-24 (кривые 1 и 6) и системы Литол-24 с различными концентрациями изовалерата меди при температурах 363 и 383 К соответственно: 1 % (кривые 2 и 7); 5 % (кривые 3 и 8); 10 % (кривые 4 и 9); 20 % (кривые 5 и 10)

Fig. 6 – Electroconductivity of Litol-24 (curves 1 and 6) and of the system Litol-24 with different concentrations of Cu(II) isovalerate at 363 and 383 K respectively: 1% (curves 2 and 7); 5% (curves 3 and 8); 10% (curves 4 and 9); 20% (curves 5 and 10)

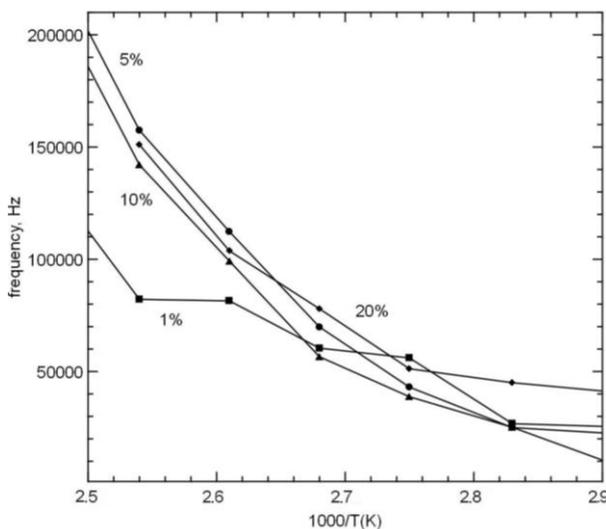


Рис. 7 – Функции Аррениуса для смазочной композиции Литол-24 – валерат меди при концентрациях присадки:

■ и □ – 1 %; ● и ○ – 5 %; ▲ и △ – 10 %; ◇ и ◆ – 20 %
Fig. 7 – The Arrhenius plot for the lubricant composition Litol-24-Cu(II) – valerate at additive concentrations:
 ■ and □ – 1 %; ● and ○ – 5 %; ▲ and △ – 10 %; ◇ and ◆ – 20 %

По утверждениям источников [1–3], подобные смазочные композиции при лиотропном мезоморфизме, вызванном изменением концентрации присадок, образуют колончатые негеометрические фазы.

Для образцов с присадками валерата и изовалерата меди при измеренных температурах проявилось наличие пиков тангенсов угла потерь. На основе их распределения удалось вычислить энергию активации [9] при концентрации валерата и изовалерата меди 1 % $Q = 1,13212$ эВ и $1,1151$ эВ, при концентрации 5 % $Q = 1,083$ эВ и $1,05305$ эВ соответственно

(рис. 8, 9). Наиболее вероятно принадлежность этих пиков к α - или β -релаксации (≈ 97 кДж/моль). При повышении температуры пики величины $\tan\delta$ смещаются в сторону высоких частот и уменьшаются по абсолютной величине. Для анализа полученных спектров потерь использовалась модель Хавриилака – Негами в виде приближения:

$$\varepsilon''_{HN} = \Im \left\{ \frac{\Delta\varepsilon}{\left[1 + (if / f_0)^a \right]^b} \right\}, \quad (1)$$

где $\Delta\varepsilon$ – проводимость, зависящая от температуры; значения параметров a, b ($0 < a, b < 1$) соответствуют как релаксации Коула – Давидсона, так и Коула – Коула. На базе этих результатов можно оценить [10] температурно и частотно зависимые времена релаксации (например, для концентрации 1 масс.% изовалерата меди в Литоле-24 эти времена составляют порядка 0,1 мс).

Такое приближение основывается на представлении об ориентационной и вращательной дипольной релаксации молекул ЖК и аналогичных наблюдениях многокомпонентных ЖК нематогенов при низких частотах [11]. Авторы данной статьи предполагают, что исследуемые многокомпонентные системы проявляют по меньшей мере два типа релаксационных процессов, происходящих как в изотропной, так и в колончатой фазе. Свободные объемы и анизотропия формы мезогенной присадки позволяют приближенно ассоциировать параметр порядка колончатых фаз параметром порядка нематиков [12, 13].



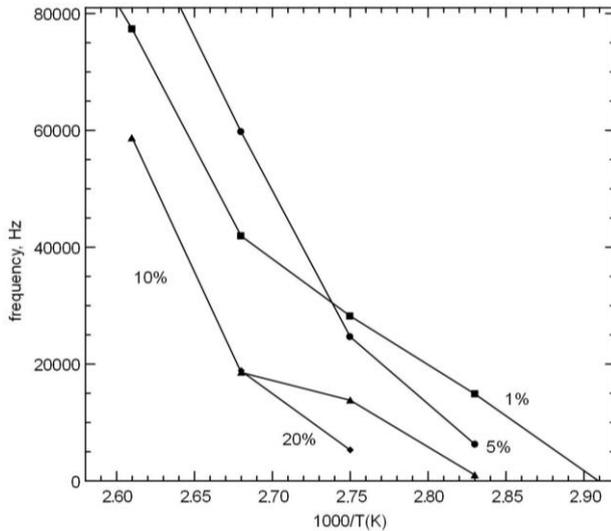


Рис. 8 – Функции Аррениуса для смазочной композиции Литол-24 – изовалерат меди при концентрациях присадки: ■ и □ – 1 %; ● и ○ – 5 %; ▲ и △ – 10 %; ◇ и ◆ – 20 %
Fig. 8 – The Arrhenius plot for the lubricant composition Litol-24-Cu(II) – isovalerate at additive concentrations: ■ and □ – 1 %; ● and ○ – 5 %; ▲ and △ – 10 %; ◇ and ◆ – 20 %

Такая β-релаксация может быть вызвана вращением С-С связей КМ и конформационными поворотами цикла [14].

Среди прочих методов ДЭ-измерения служат идентификации мезоморфизма в данных жидкокристаллических композитах. В дальнейшем это позволит количественно изучать явления внутреннего трения и вычислять коэффициенты вязкости [13]. В настоящее время вопрос о корреляции внутреннего и внешнего трения, являющегося предметом трибологических исследований, остается открытой и актуальной прикладной и теоретической сферой исследований.

В случаях бесприсадочной смазки и композита с присадками концентрации 1 масс.% валерата и 10 % изовалерата меди наблюдается низкочастотный выход электропроводности на плато (см. рис. 5, 6) – зональная проводимость, а на частотах выше 3,7 ÷ 4 кГц возникает прыжковая проводимость. Смена типа проводимости обусловлена орбитальными связями КМ валерата и изовалерата.

Наличие присадки в Литоле-24 определяет изменение температурной зависимости электропроводности (рис. 9, 10), при этом в смазке без присадки электропроводность мало зависит от температуры и увеличивается при приближении к температуре плавления в смазках с присадками.

Конформация присадки также влияет на температурный характер проводимости: можно наблюдать такую зависимость для системы с валератом меди и ее отсутствие для присадки изовалерата (весь температурный диапазон не указан). Кроме того, ДЭ-измерения подтвердили различие функций $\sigma(1/T)$ для разных частот и прохождение двух типов релаксационных процессов.

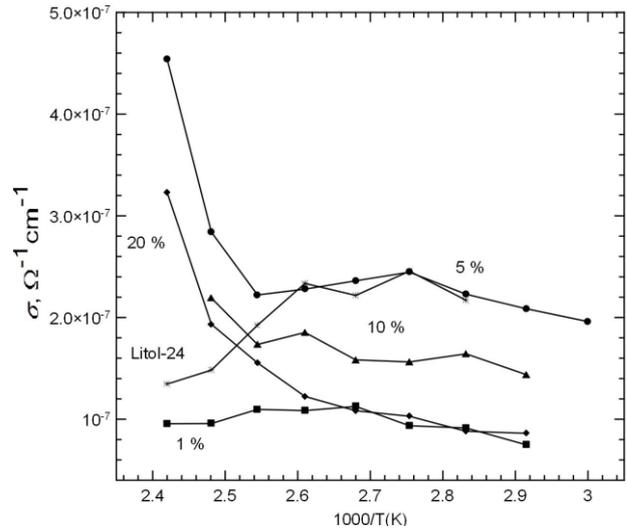


Рис. 9 – Температурные зависимости электропроводности Литола-24 и системы Литол-24 – валерат меди при 20 кГц
Fig. 9 – Temperature dependencies of electroconductivity for Litol-24 and the system Litol-24-Cu(II) – valerate at 20 kHz

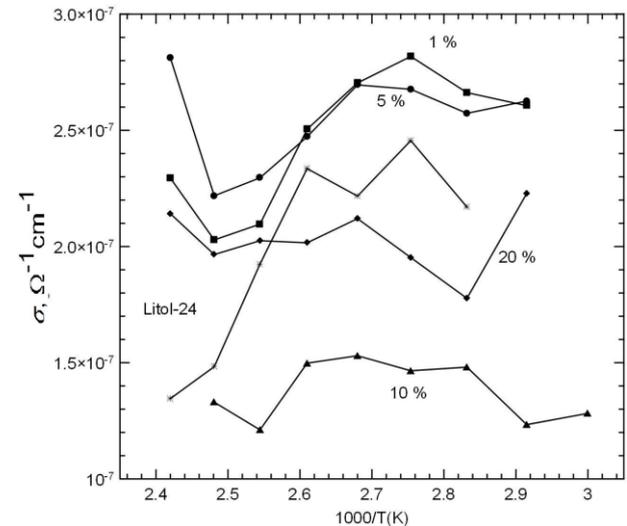


Рис. 10 – Температурные зависимости электропроводности Литола-24 и системы Литол-24 – изовалерат меди при 20 кГц
Fig. 10 – Temperature dependencies of electroconductivity for Litol-24 and the system Litol-24 – Cu(II) isovalerate at 20 kHz

Изменение типа проводимости при добавлении 1 масс.% валерата или 10 % изовалерата меди может сопутствовать ожидаемым лиотропным фазовым переходам, хотя не позволяет делать окончательные количественные выводы.

Приведенные результаты ДЭ-измерений, дополненные структурными исследованиями, могут оказаться полезными при построении фазовых диаграмм лиотропных смазочных композиций и, следовательно, установления областей применения этих композиций.



4. Заключение

Для развития промышленных приложений смазочных композиций важно изучать их физические свойства. С помощью метода ДЭ-спектроскопии установлено, что при концентрации присадок 1 масс.% валерата меди и 10 масс.% изовалерата меди к базовой смазке Литолу-24 наилучшим образом стабилизируется упорядоченная фаза, а в диапазоне концентраций 5 ÷ 10 масс.% может происходить фазовый переход в изотропную фазу; при высоких концентрациях присадок, 20 масс.%, смазка ведет себя подобно бесприсадочной, но может меняться тип ее проводимости.

В системе Литол-24-присадка гомологов КМ обнаружено по меньшей мере два релаксационных механизма.

По низкочастотным ДЭ-спектрам выявлена зависимость релаксационных характеристик от конформации присадки: наблюдалась для случая изовалерата меди и отсутствовала – для валерата.

Для спецификации типа колончатой фазы в данных композициях Литола-24 необходимо дополнительно подкрепить результаты диэлектрических измерений оптическими методами, нейтронным, рентгеноструктурным анализом и пр.

Благодарности

Авторы выражают благодарность проф. О.Б. Акоповой и В.В. Терентьеву за предоставление образцов и консультации, а также И.О. Кучкиной за тестирование ряда композиций на термотропный мезоморфизм методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Acknowledgments

The authors are grateful to prof. O.B. Akopova and V.V. Terentyev for providing samples and helpful discussions, and also to I.O. Kuchkina for testing a few of compositions on the thermotropic mesomorphism by differential scanning calorimetry.

Список литературы

- [1] Усольцева, Н.В. Жидкие кристаллы: дискотические мезогены [Текст] / Н.В. Усольцева [и др.]. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2004. – 546 с.
- [2] Акопова, О.Б. Карбоксилаты меди. Моделирование, синтез, мезоморфизм и трибологические свойства [Текст] / О.Б. Акопова [и др.] // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2012. – Вып. 2(40). – С. 20–28.
- [3] Терентьев, В.В. Повышение надежности сельскохозяйственной техники за счет использования пластичных смазочных материалов с мезогенными присадками-карбоксилатами меди [Текст] / В.В. Терентьев [и др.] // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2014. – Вып. 14(2). – С. 97–102.
- [4] ГОСТ 21150-87. Смазка Литол-24. Технические условия – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 61 с.

[5] Ельникова, Л.В. Инфракрасные спектры поглощения карбоксилатов меди(II) гомологов 4...21 // Москва, Препринт ИТЭФ. – 2016. – № 5–16.

[6] Orlandi, S. Core charge distribution and self assembly of columnar phases: the case of triphenylenes and azatriphenylenes [Text] / S. Orlandi [et al.] // Chemistry Central Journal. – 2007. – Vol. 1(15). – P. 1–13.

[7] Эме, Ф. Диэлектрические измерения [Текст] / Ф. Эме. – М.: Химия, 1967. – 224 с.

[8] Programmable Automatic RCL Meter PM 6306. User manual. FLUKE. 1996 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.download-service-manuals.com/en/manual.php?file=Fluke-4810.pdf> – (Дата обращения: 05.09.2016).

[9] Новик, А. Релаксационные явления в кристаллах [Текст] / А. Новик, Б. Берри. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

[10] Torgova, S. Short Bent-Core Molecules: X-Rays, Polarization, Dielectricity, Texture and Electro-optics Investigations [Text] / S. Torgova [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017, DOI: 10.1039/C7CP03561F.

[11] Yano, S. Dielectric relaxations in a few binary mixtures of p-methoxybenzylidene-p-nbutylaniline and a nematogenic or nonmesogenic compound / S. Yano, Y. Hayashi, K. Aoki // J. Chem. Phys. – 1978. – Vol. 68. – P. 5214–5218.

[12] Martin, A.J. Extended Debye Theory for Dielectric Relaxations in Nematic Liquid Crystals [Text] / A.J. Martin, G. Meier, A. Saupe // Symp. Far. Soc. – 1971. – Vol. 5. – P. 119–133.

[13] Беляев, В.В. Вязкость нематических жидких кристаллов [Текст] / В.В. Беляев. – М.: Физматлит, 2002. – 224 с.

[14] Блайт, Э.П. Электрические свойства полимеров [Текст] / Э.П. Блайт, Д. Блур. – М.: Физматлит, 2008. – 376 с.

References

- [1] Usol'ceva N.V., Akopova O.B., Bykova V.V., Smirnova A.I., Pikin S.A. Liquid crystals: discotic mesogens (Zhidkie kristally: diskoticheskie mezogeny). Ivanovo: Ivanovo State Un-ty, 2004, 546 p. (in Russ.).
- [2] Akopova, O.B. Lapshin V.B., Terent'ev V.V., Bogdanov V.S. Copper(ii) carboxylates. Simulation, synthesis, mesomorphism and tribological properties (Karboksilyaty medi. Modelirovanie, sintez, mezomorfizm i tribologicheskie svoistva). *Liq. Cryst and Their Appl.*, 2012;2(40):20–28 (in Russ.).
- [3] Terentyev V.V., Akopova O.B., Telegin I.A., Bobrova N.V. Increasing reliability of agricultural machinery by using plastic lubricant additives with mesogenic copper carboxylates (Povyshenie nadezhnosti sel'skokoziastvennoi tehniky za schet ispol'zovaniya plastichnyh smazochnyh materialov s mezogennymi prisadkami-karboksilatami medi). *Liq. Cryst and Their Appl.*, 2014;14(2):97–102 (in Russ.).
- [4] GOST 21150-87 Grease Litol-24. Specifications Smazka Litol-24. Tehnicheskie usloviya. – Vved. 1989-



01-01. – Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2001, 61 p. (in Russ.).

[5] Elnikova L.V. Infrared absorption spectra for cooper(II) carboxylates of homologs 4 ... 21 (Infrakrasnye spektry pogloshheniia karboksilatov medi(II) gomologov 4...21). Moscow, Preprint ITEP, 2016, No. 5–16 (in Russ.).

[6] Orlandi S., Muccioli L., Ricci M., Berardi R., Zannoni C. Core charge distribution and self assembly of columnar phases: the case of triphenylenes and azatriphenylenes. *Chemistry Central Journal*, 2007;01(15):1–13.

[7] Eme F. Dielectric measurements (Dielektricheskie izmereniya). Moscow: Himiya Publ., 1967, 224 p. (in Russ.).

[8] Programmable Automatic RCL Meter PM 6306. User manual. FLUKE. 1996. Available on: <http://www.download-service-manuals.com/en/manual.php?file=Fluke-4810.pdf> (05.09.2016).

[9] Nowik A.S., Berry B.S. Anelastic Relaxation in Crystalline Solids (Relaksacionnye yavleniya v

kristallah). New York-London, Academic Press, 1972, 683 p. (in Russ.).

[10] Torgova S., Sreenilayam S.P., Panarin Y.P., Franciscangeli O., Vita F., Vij J., Pozhidaev E.P., Minchenko M., Ferrero C., Strigazzi A. Short Bent–Core Molecules: X-Rays, Polarization, Dielectricity, Texture and Electro-optics Investigations. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, DOI: 10.1039/C7CP03561F.

[11] Yano S., Hayashi Y., Aoki K. Dielectric relaxations in a few binary mixtures of p-methoxybenzylidene-p-nbutylaniline and a nematogenic or nonmesogenic compound. *J. Chem. Phys.*, 1978;68:5214–5218.

[12] Martin A.J., Meier G., Saupe A. Extended Debye Theory for Dielectric Relaxations in Nematic Liquid Crystals. *Symp. Far. Soc.*, 1971;5:P. 119–133.

[13] Belyaev V.V. Vyazkost' nematicheskikh zhidkikh kristallov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 224 p. (in Russ.).

[14] Blait Je.R., Blur D. Elektricheskie svoystva polimerov. Moscow, Fizmatlit, 2008, 376 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI



III Международная конференция «Индустриальные масла и СОЖ в металлургии, металлообработке и машиностроении - 2018»

15 мая 2018 г.

Конференция «Индустриальные масла и СОЖ в металлургии, металлообработке и машиностроении - 2018» является уникальной площадкой для встречи и обмена мнениями, совместной работы и обсуждения перспектив разработчиков и поставщиков индустриальных масел и СОЖ с представителями конечных потребителей из металлургии, металлообработки и машиностроения.

Соорганизатор конференции – компания «РН-Смазочные материалы».

Конференция состоится **15 мая 2018 г.** в рамках Международной специализированной выставки «МЕТАЛЛООБРАБОТКА – 2018» (14-18 мая 2018, Москва, ЦВК «Экспоцентр»).

Организаторами выставки выступают АО «Экспоцентр» и Российская Ассоциация производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент».

Выставка проводится при поддержке Совета Федерации Федерального Собрания РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Союза машиностроителей России, под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ.

Аудитория конференции:

- разработчики рецептур смазочно-охлаждающих жидкостей, всех видов масел промышленного назначения, рабочие-консервационных и специальных продуктов (закалочных, пропиточных и т.д.);
- технологи в области металлообработки черных и цветных металлов;
- эксплуатанты станочного парка и оборудования из самых разных отраслей отечественной промышленности;
- специалисты по эксплуатации и обслуживанию энергетического и компрессорного оборудования;
- главные инженеры и главные механики, сотрудники служб главного инженера и главного механика российских предприятий;
- представители профильных научно-технических и проектных институтов России;
- поставщики отечественных и импортных СОЖ, масел и смежных продуктов;
- специалисты предприятий-потребителей по закупкам МТР.

<http://www.rpi-conferences.com/oils-and-coolants>

01-01. – Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2001, 61 p. (in Russ.).

[5] Elnikova L.V. Infrared absorption spectra for cooper(II) carboxylates of homologs 4 ... 21 (Infrakrasnye spektry pogloshheniia karboksilatov medi(II) gomologov 4...21). Moscow, Preprint ITP, 2016, No. 5–16 (in Russ.).

[6] Orlandi S., Muccioli L., Ricci M., Berardi R., Zannoni C. Core charge distribution and self assembly of columnar phases: the case of triphenylenes and azatriphenylenes. *Chemistry Central Journal*, 2007;01(15):1–13.

[7] Eme F. Dielectric measurements (Dielektricheskie izmereniya). Moscow: Himiya Publ., 1967, 224 p. (in Russ.).

[8] Programmable Automatic RCL Meter PM 6306. User manual. FLUKE. 1996. Available on: <http://www.download-service-manuals.com/en/manual.php?file=Fluke-4810.pdf> (05.09.2016).

[9] Nowik A.S., Berry B.S. Anelastic Relaxation in Crystalline Solids (Relaksacionnye yavleniya v

kristallah). New York-London, Academic Press, 1972, 683 p. (in Russ.).

[10] Torgova S., Sreenilayam S.P., Panarin Y.P., Franciscangeli O., Vita F., Vij J., Pozhidaev E.P., Minchenko M., Ferrero C., Strigazzi A. Short Bent-Core Molecules: X-Rays, Polarization, Dielectricity, Texture and Electro-optics Investigations. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, DOI: 10.1039/C7CP03561F.

[11] Yano S., Hayashi Y., Aoki K. Dielectric relaxations in a few binary mixtures of p-methoxybenzylidene-p-nbutylaniline and a nematogenic or nonmesogenic compound. *J. Chem. Phys.*, 1978;68:5214–5218.

[12] Martin A.J., Meier G., Saupe A. Extended Debye Theory for Dielectric Relaxations in Nematic Liquid Crystals. *Symp. Far. Soc.*, 1971;5:P. 119–133.

[13] Belyaev V.V. Vyazkost' nematicheskikh zhidkikh kristallov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 224 p. (in Russ.).

[14] Blait Je.R., Blur D. Elektricheskie svoystva polimerov. Moscow, Fizmatlit, 2008, 376 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI



III Международная конференция «Индустриальные масла и СОЖ в металлургии, металлообработке и машиностроении - 2018»

15 мая 2018 г.

Конференция «Индустриальные масла и СОЖ в металлургии, металлообработке и машиностроении - 2018» является уникальной площадкой для встречи и обмена мнениями, совместной работы и обсуждения перспектив разработчиков и поставщиков индустриальных масел и СОЖ с представителями конечных потребителей из металлургии, металлообработки и машиностроения.

Соорганизатор конференции – компания «РН-Смазочные материалы».

Конференция состоится **15 мая 2018 г.** в рамках Международной специализированной выставки «МЕТАЛЛООБРАБОТКА – 2018» (14-18 мая 2018, Москва, ЦВК «Экспоцентр»).

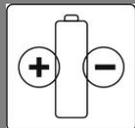
Организаторами выставки выступают АО «Экспоцентр» и Российская Ассоциация производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент».

Выставка проводится при поддержке Совета Федерации Федерального Собрания РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Союза машиностроителей России, под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ.

Аудитория конференции:

- разработчики рецептур смазочно-охлаждающих жидкостей, всех видов масел промышленного назначения, рабочие консервационных и специальных продуктов (закалочных, пропиточных и т.д.);
- технологи в области металлообработки черных и цветных металлов;
- эксплуатанты станочного парка и оборудования из самых разных отраслей отечественной промышленности;
- специалисты по эксплуатации и обслуживанию энергетического и компрессорного оборудования;
- главные инженеры и главные механики, сотрудники служб главного инженера и главного механика российских предприятий;
- представители профильных научно-технических и проектных институтов России;
- поставщики отечественных и импортных СОЖ, масел и смежных продуктов;
- специалисты предприятий-потребителей по закупкам МТР.

<http://www.rpi-conferences.com/oils-and-coolants>



ЛИТИЙ-ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА И СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ

LITHIUM-ION CURRENT SOURCES AND SUPERCAPACITOR

Статья поступила в редакцию 21.03.18. Ред. рег. № 2654

The article has entered in publishing office 21.03.18. Ed. reg. No. 2654

УДК 546.34+553.044

**ЛИТИЙ: РЕСУРСЫ, ДОБЫЧА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МИРОВОГО РЫНКА***

П.Г. Кудрявцев, Н.П. Кудрявцев

Polymate Ltd – Израильский исследовательский центр
п/я 73, Migdal HaEmek, 2310001, Израиль
тел.: +972(52)726-56-47; факс: +972(4)604-21-75; email: pgkudr89@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.070-081

Заключение совета рецензентов: 28.03.18 Заключение совета экспертов: 06.04.18 Принято к публикации: 10.04.18

В настоящее время литий характеризуется одними из самых быстрых темпов роста цены, потребления и объемов добычи. Проведена оценка темпов потребления, роста объемов добычи и разведанных объемов литиевых минеральных ресурсов. Дан прогноз развития мирового литиевого рынка, роста добычи лития и динамики цен. Так, увеличение мировых объемов добычи лития к 2020 г. должно превысить 12 000 тонн в год. Показано, что рост потребления лития стимулировал рост геологической разведки его минеральных ресурсов и привёл к резкому росту разведанных запасов лития. Предпринята попытка оценить другие минеральные ресурсы, в том числе с низким содержанием лития. Анализ продемонстрировал, что в соответствии с существующими технологиями и скоростью роста производства лития литиевые руды закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, истощатся примерно через 50 лет. В статье предложено несколько путей решения этой проблемы. Первый – увеличение степени извлечения лития из существующих сырьевых источников, то есть применение более эффективных методов. Второй – использование бедных по литию ресурсов, таких как подземные рассолы и попутные нефтяные воды, которые могут стать самым перспективным источником лития (были показаны возможные направления и перспективы добычи). Третий – использование вторичных литиевых ресурсов и переработка отработанных литиевых батарей.

Ключевые слова: литий; рынок лития; мировые запасы лития; добыча лития; подземные рассолы; попутные нефтяные воды.

**LITHIUM: RESOURCES, PRODUCTION AND PROSPECTS
OF WORLD MARKET DEVELOPMENT**

P.G. Kudryavtsev, N.P. Kudryavtsev

Polymate Ltd – Israel Nanotechnology Research Center
POBox 73, Migdal HaEmek 2310001, Israel
tel.: +972 (52) 726-56-47, fax: +972 (4) 604-21-75, e-mail: pgkudr89@gmail.com

*Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Литий: ресурсы, добыча и перспективы развития мирового рынка // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):70-81.

The paper deals with lithium which is currently characterized by one of the fastest growth rates in terms of price, consumption and production volumes. We have estimated the rates of consumption, the growth in production volumes and the growth of the explored volumes of lithium mineral resources and have given forecast of development of the world lithium market, growth of lithium production and price dynamics. Thus, the increase in world production of lithium by 2020 should exceed 12,000 tons per year. The increase in the consumption of lithium is shown to stimulate the growth of geological exploration of its mineral resources and to lead to a sharp increase in the explored lithium reserves. Moreover, we have attempted to evaluate other lithium mineral resources including those with a low content of lithium. The analysis demonstrate that, in accordance with existing technologies and speed of the lithium production growth, lithium ore will run out in about 25 years, and lithium reserves of proven resources associated with salt lakes will be depleted in about 50 years.

The paper suggests several ways of solving this problem. The first one is an increase in the extraction of lithium from existing sources of raw materials, that is, the use of more effective methods. The second one is the use of lean lithium resources, such as underground brines and associated oil waters which can become the most promising source of lithium (the possible directions and prospects of extraction have been shown). The third way is the use of secondary lithium resources and the processing of spent lithium batteries.

Keywords: lithium; lithium market; world reserves of lithium; lithium mining; underground brines; associated oil waters.



Павел Геннадьевич
Кудрявцев
Pavel Kudryavtsev

Сведения об авторе: канд. хим. наук, профессор, старший научный сотрудник, академик МАНЭБ, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник Polymate – Israel Nanotechnology Research Center (Израиль); член редакционных коллегий журналов: Scientific Israel – Technological Advantages (Израиль), Innovations in Corrosion and Materials Science (США).

Награды: медаль им. М.В. Ломоносова; кавалер ордена «Звезда Ученого»; почетное звание «Заслуженный деятель науки»; медаль П.А. Столыпина и почетный бриллиантовый знак Торгово-промышленной палаты РФ.

Образование: Пермский политехнический институт (1977 г.).

Область научных интересов: разработка золь-гель технологии получения неорганических нанокomпозитов с регулируемым комплексом физико-химических свойств; извлечение редких и рассеянных элементов из сложных по составу природных и технологических растворов; разработка технологии получения и создание опытно-промышленных и малотоннажных промышленных установок для производства элементоорганических соединений.

Публикации: более 240, в том числе 4 монографии, 35 патента.

ORCID: 0000-0002-0729-0958

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Professor, Senior Researcher, Academician of IAELPS, Academician of RANS, Leading Researcher of Polymate – Israel Nanotechnology Research Center (Israel); a member of the Editorial Boards of journals: Scientific Israel – Technological Advantages (Israel), Innovations in Corrosion and Materials Science (USA).

Awards: the M.V. Lomonosov medal; Commander of the Order “The Star of the Scientist”; the honorary title “Honored Worker of Science”; the medal of P.A. Stolypin, and honorable diamond sign of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation.

Education: Perm Polytechnic Institute, 1977.

Research interests: development of sol-gel technology for inorganic nanocomposite materials with a controlled complex for physical and chemical properties; extraction of rare and trace elements from the complex composition of natural and technological solutions; development of technology for new materials, and creation of pilot and small-tonnage industrial plants for the production of organoelement compounds.

Publications: 240 including 4 books, and 35 patents.



Николай Павлович
Кудрявцев
Nikolai Kudryavtsev

Сведения об авторе: инженер-исследователь Polymate LTD, Хайфа, Израиль.

Образование: Пермский государственный технический университет.

Область научных интересов: разработка технологии получения и создание опытно-промышленных и малотоннажных промышленных установок для производства органических и неорганических солей, сложных эфиров и проч.

Публикации: 5.

Information about the author: Research Engineer in Polymate LTD, Israel, Holon.

Education: Perm State Technical University.

Research interests: development of technology for new materials and creation of pilot and small-tonnage industrial plants for the production of organic and inorganic salts, esters and etc.

Publications: 5.

1. Введение

Литий – элемент XXI века. В работах [1, 2] были рассмотрены наиболее важные области применения лития и его соединений, большинство которых относится к энергетике, в первую очередь системам хранения энергии. В статье [3] были показаны основные методы добычи этого минерала из различных видов сырья. Задачи данного исследования заключаются в анализе динамики рынка, оценки общих запасов и перспектив добычи и потребления лития, а также рециркуляции и добычи лития из вторичных источников, поскольку рост потребления литиевых батарей неуклонно возрастает.

Исторически литий добывается из двух разных источников – континентальных рассолов и минералов твердых пород. В Чили, являющихся ведущими мировыми производителями карбоната лития, литий добывается из двух рассольных озер на Салар-де-Атакама (Salar de Atacama) в Андах. Концентрированные рассолы транспортируются в Антофагасту, на побережье Чили, и перерабатываются на двух заводах в карбонат лития: на одном заводе производится металлический литий, а на другом – гидроксид лития. Литий добывают и в других странах. Так, в Аргентине в Андах карбонат лития и хлорид лития также получают из рассолов – Salar del Hombre Muerto. Следует отметить, что большая доля карбоната лития, произведенного в Южной Америке, экспортируется в Соединенные Штаты. Австралия является ведущим производителем литиевых минеральных концентратов. Бразилия, Китай, Португалия и Зимбабве также производят значительное количество этих концентратов, большинство которых используется непосредственно в производстве керамики и стекла. При этом Китай – единственная страна, которая производит большое количество карбоната лития и гидроксида лития из минеральных концентратов, главным образом из сподумена, импортируемого из Австралии. Кроме того, в Китае карбонат лития получают из рассолов соленого озера Забаю (Zabayu) в Тибетском автономном районе Сичзан, а

также из солей озера Дунтай (Dongtai) и Соляного озера Ситаи-Хиньяер (Xitai Jinaier Salt Lake) в провинции Цинхай [1, 2].

Спрос на литий продолжит расти по мере того, как транспортные средства будут становиться более «зелеными», а электричество – экологичным. Это подтвердили аналитики одного из крупнейших в мире инвестиционных банков Goldman Sachs в декабре прошлого года, заявив, что литий («новый бензин») – это выгодный товар, который легко хранить и который станет «ключевым фактором революции в электромобилестроении» [4–6]. В настоящее время мировые продажи литиевых солей составляют около 1 млрд долларов в год – этот элемент стал важнейшим компонентом литий-ионных батарей, которые теперь питают все: от электромобилей до электроинструментов и смартфонов. По прогнозам в течение следующих восьми лет спрос на литий вырастет более чем на 300 % [7], потому, в частности, что все крупные электротехнические компании расширяют мощности по производству солнечной энергии, для хранения которой требуются литий-ионные батареи с высокой плотностью энергии. Например, Duke Energy недавно остановила работы по строительству атомной электростанции во Флориде и вместо этого планирует инвестировать в солнечную энергетику и аккумуляторы 6 млрд долларов [8]. Растущий спрос на аккумуляторные батареи и необходимость хранения энергии с высокой плотностью создают серьезную зависимость многих отраслей мировой промышленности от лития, что в свою очередь вызывает глобальный поиск новых литиевых источников.

2. Анализ цен на литий

Наиболее важной характеристикой рынка лития является цена на основной литиевый продукт – карбонат лития Li_2CO_3 , имеющий основное хождение на мировых рынках. Динамика этой цены представлена на рис. 1.



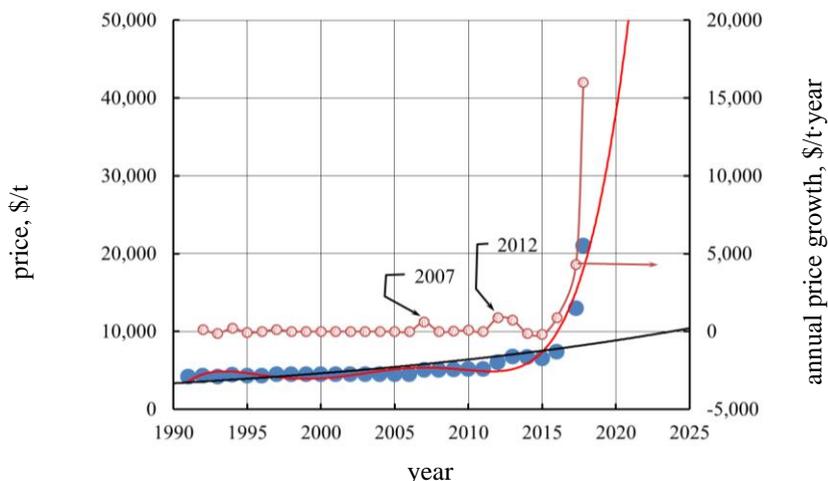


Рис. 1 – Динамика и прогноз средней мировой цены на карбонат лития батарейного сорта и ее ежегодный прирост [9]: точки – данные; черная прямая – линейная аппроксимация; красная кривая – полиномиальная аппроксимация
Fig. 1 – Dynamics and forecast of the average world price for lithium carbonate of battery qualification and its annual increase [9]: points are data; black line – linear approximation; the red curve – a polynomial approximation



После падения цен на литий в начале 2016 г. уже в конце того же года наблюдался резкий скачок цен. Так, в Китае на условиях спотовой цены (Spot Price) карбонат лития торговался по 14 500 US\$ за тонну [10]. Согласно официальным источникам, минимальная цена на карбонат лития в начале 2017 г. была зафиксирована в районе 13 400 ÷ 14 500 US\$ за тонну. Однако, по некоторым неподтвержденным сведениям, трейдеры Китая и Индии продавали карбонат лития в пределах 24 ÷ 28 US\$ за килограмм.

При этом в качестве примера можно привести следующие данные:

- 1) май 2017 г. – 15 500 US\$/т [11];
- 2) конец 1 квартала 2016 г. – на карбонат лития (99 % чистоты) более 7 000 US\$/т (Китай), а в июле 2016 г. – более 20 000 US\$/т [12];
- 3) ноябрь 2016 г. – 16,3 US\$/кг, 16 000 US\$/т (Индия) [13];
- 4) апрель 2017 г. – 15 500 US\$/т [14];
- 5) к концу 2017 г. примерно 24 700 US\$/т (Китай) [15].

Поскольку цена на карбонат лития может меняться в различных пределах, в зависимости от договоренностей между продавцом и покупателем, в некоторых случаях цена может быть и выше.

В соответствии с этими данными авторы настоящей статьи сделали прогноз цен на карбонат лития до 2020 г. (см. рис. 1), который составил 40 000 ÷ 45 000 US\$ за тонну. С учётом колебаний рынка и с помощью статистических методов можно примерно оценить минимальную и максимальную цену на карбонат лития к 2020 г.: минимальная – 30 000 US\$/тонна; максимальная – 50 000 US\$/тонна. В дальнейших расчетах будем опираться на базовую цену 2016 г. и минимальную цену карбоната лития к 2020 г.

3. Мировые ресурсы и добыча лития

Результаты анализа изменений мировых запасов лития за последние 20 лет получены на основе официальных государственных источников стран, которые имеют литиевые запасы (рис. 2). Здесь следует особо оговорить, что рудные запасы лития представлены следующими минералами: сподумен, амблигонит, эвкрипит, лепидолит и петалит, – которые составляют литиевых ресурсы следующих стран: США, Австралия, Бразилия, Канада, Намибия, Португалия, Россия и Зимбабве. Однако в итоговый результат не включены сведения по литиевым ресурсам России и Намибии и по гидроминеральным ресурсам США и России ввиду отсутствия официальных данных.

На рис. 2 наглядно показано, что объемы резервов лития растут вместе со спросом. Так, первый скачок объема ресурсов в 1998 г. был обусловлен появлением дополнительного спроса на литий из-за необходимости обеспечить рост производства аккумуляторов для телефонов и других мобильных устройств и изменения оценки литиевых ресурсов в Чили. Затем в 2000 г. Австралия увеличила оценку своих запасов сподумена, что привело к росту доли минеральной составляющей общих резервов лития. После этого ситуация оставалась неизменной до 2009 г. включительно.

Рост объема запасов в 2010–2012 г. определялся резким ростом мировой потребности в автомобильных литиевых аккумуляторах. Кроме того, в это время наблюдался некоторый рост цены на литий (см. рис. 1), что также явилось поводом для активизации работ по геологоразведке литиевых месторождений. Основной вклад в этот рост внесли две страны Чили и Китай; небольшой в 2016 г. – Аргентина; а Бразилия, напротив, сократила оценку своих резервов в 4 раза.



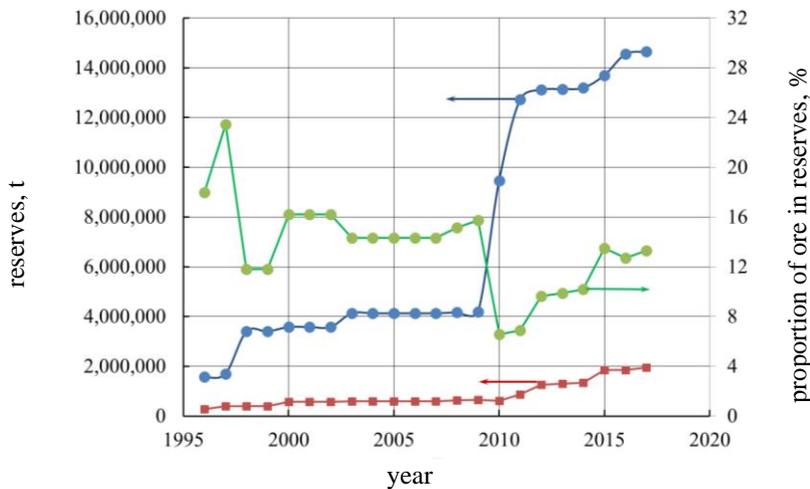


Рис. 2 – Объем запасов литиевого сырья в мире: синяя кривая – общие данные всех литиевых сырьевых источников; коричневая кривая – запасы литиевых руд (сподумена, амблигонита, эвкриптита, лепидолита и петалита); зеленая кривая – доля литиевых руд в мировых запасах литиевого сырья
Fig. 2 – The volume of reserves of lithium resources in the world: blue curve – General Data of lithium raw material sources; brown curve – reserves of lithium ore (spodumene, ambligonite, eucryptite, lepidolite and petalite); green curve – the share of lithium ores in the world's reserves of lithium raw materials

При этом следует учитывать, что если рост резервов происходит скачками, то рост добычи лития меняется плавно. Данные по мировой добыче лития представлены на рис. 3. Анализ этих данных свидетельствует о том, что рост добычи лития изменяется

по экспоненциальному закону. Некоторое падение добычи в 2009 г. было обусловлено мировым кризисом, начавшимся в 2008 г. Это падение носило локальный характер и было с избытком компенсировано дополнительным ростом добычи к 2011 г.

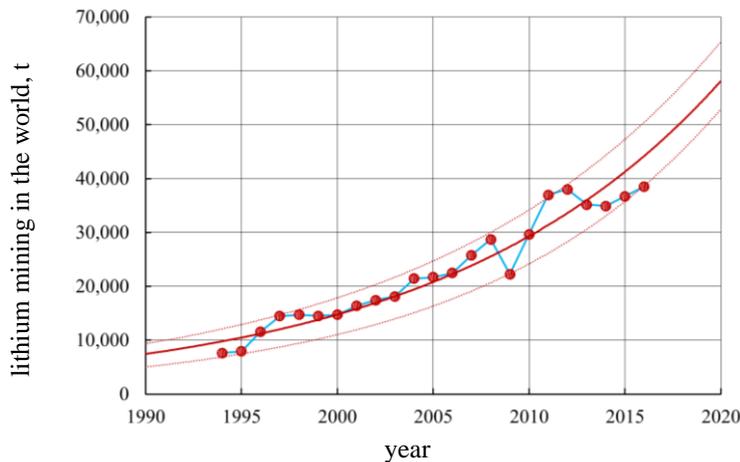


Рис. 3 – Объем и прогноз мировой добычи лития к 2020 г.: точки – фактические данные; пунктирные кривые – доверительный интервал с 95 % вероятностью
Fig. 3 – Worldwide lithium production and forecast by 2020: points – actual data; dotted curves – a confidence interval with a 95% probability

Исходя из темпов роста добычи лития, можно спрогнозировать уровень мировых объемов производства лития к 2020 г. По средним оценкам уровень добычи составит 58 000 тонн лития в год, по пессимистичным – 52 тонн. Таким образом, увеличение мировых объемов добычи лития к 2020 г. должно превысить 12 000 тонн в год. На основе данных, представленных на рис. 2 и 3, и с учетом полиномов 2-й степени, аппроксимирующих эти зависимости, можно примерно рассчитать время истощения имеющихся и перспективных разведанных запасов лития. Расчеты, проведенные в соответствии с существующими технологиями и скоростью роста производства лития, показывают, что литиевые руды закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы

разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, закончатся примерно через 50 лет. Отсюда перспективными становятся запасы лития, сосредоточенные в подземных водах, в том числе попутных нефтяных. Кроме того, несмотря на то что сегодня не существует технологий, способных обеспечить экономически рентабельное извлечение лития из морской воды, в отдаленной перспективе его можно будет добывать из вод Мирового океана.

3.1. Добыча и переработка лития и его соединений в США

В США литий добывают только на рассоле в штате Невада. Две американские компании (Albemarle Co и FMC Co) производят большое коли-



чество литиевых соединений из отечественного и импортного сырья. В качестве сырья используются карбонат лития, хлорид лития и гидроксид лития. Геологическая служба США не публикует сведений по внутреннему производству лития и его соединений, обосновывая это защитой запатентованных данных. Однако авторы настоящей статьи на базе данных по объемам экспорта и импорта лития и его соединений в США (рис. 4), опубликованных Геологической службой США, попытались восстановить информацию по добыче и внутреннему потреблению лития всеми отраслями промышленности США.

Временные изменения экспорта и импорта лития и его соединений в США имеют следующий вид: с одной стороны, отличаются достаточно сильной волатильностью, а с другой – четко выраженной тенденцией. Волатильность этих показателей обусловлена изменениями на мировом рынке лития, в частности, мировыми кризисными явлениями 2008–2009 гг. и появлением растущего спроса на этот минерал. В течение последних 20 лет импорт и экспорт имеют разнонаправленную тенденцию («эффект ножниц») – импорт превышает экспорт.

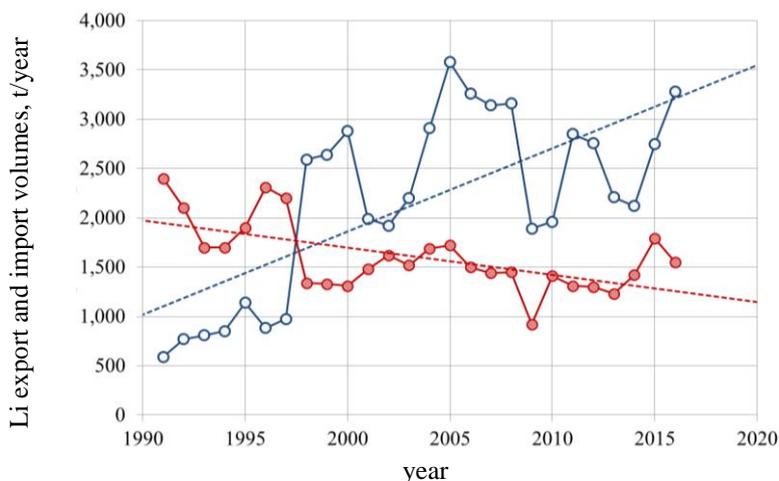


Рис. 4 – Объемы экспорта (красная линия) и импорта (синяя линия) лития и его соединений в США: точки – данные U.S. Geological Survey [9]; пунктирные линии – расчетный тренд
Fig. 4 – The lithium and its compounds volumes of export (red line) and import (blue line) in the US: points – data of U.S. Geological Survey [9]; dotted lines – the calculated trend

Этот эффект указывает на то, что промышленность США стала в первую очередь ориентироваться на импортное сырье. В работе [1] отмечено, что основные американские компании, производящие литий и его соединения, ориентируются в большей степени на латиноамериканское литиевое сырье. Для того чтобы проанализировать уровень добычи и внутреннего потребления лития в США, была

предпринята попытка рассчитать зависимости на основе данных по экспорту и импорту (см. рис. 4) и показателю доли чистого импорта в объеме видимого потребления [9]. По расчетам авторов этой работы, средний показатель доли чистого импорта в объеме видимого потребления лития промышленностью США в последние годы колеблется в пределах 84 %.

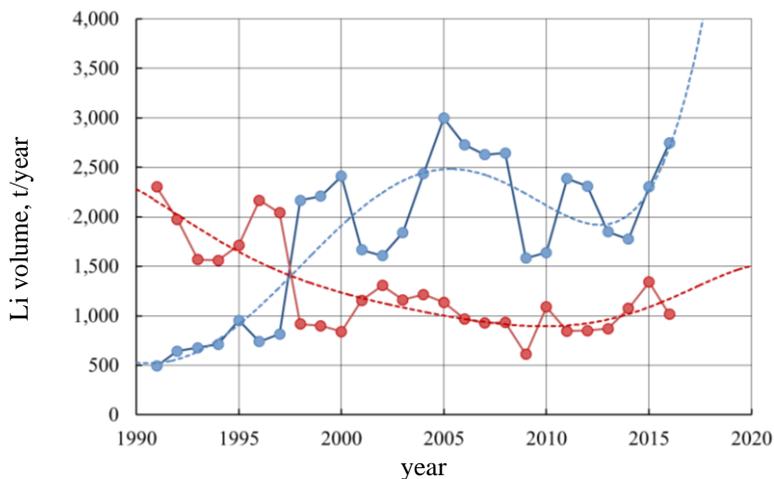


Рис. 5 – Объем добычи лития в США (красная линия) и объем внутреннего потребления лития всеми отраслями промышленности США (синяя линия): пунктирные линии – расчетный тренд
Fig. 5 – The volume of lithium production in the US (red line) and the volume of domestic consumption of lithium by all US industries (blue line): dotted lines – the calculated trend

Представленные на рис. 5 расчетные данные не претендуют на абсолютную достоверность, но при этом позволяют оценить тенденции производства и потребления лития промышленностью США. Так, до 2014 г. объем добычи лития в США имел стабильную тенденцию к снижению, и только с 2014 г. начинает проявляться некоторая не совсем стабильная тенденция к росту, которая с большой вероятностью не превысит 1 500 тонн в год в ближайшем будущем. При этом видно, что кривая внутреннего потребления лития в США (см. рис. 5) очень похожа на кривую импорта лития и его соединений (см. рис. 4). Этот фактор указывает на то, что в США сложилась тенденция использования в первую очередь импортного литиевого сырья для обеспечения своих потребностей.

Тенденция изменения объема внутреннего потребления, судя по данным (см. рис. 5), указывает на возможность резкого скачка этих объемов в самое ближайшее время. По нашей оценке, уже в 2018 г. этот показатель превысит отметку в 4 000 тонн в год. Кроме того, можно также предположить, что США, несмотря на определенные запасы литиевых минералов и наличие нескольких озер с весьма богатой по литию рапой, ориентируются в первую очередь на импорт сырья. Этот факт можно по аналогии связать с подходом США к нефтедобыче – стараться не разрабатывать свои месторождения нефти. Это подтверждают данные Геологической службы США по идентифицированным литиевым ресурсам, которые недавно были пересмотрены до 6,7 млн. тонн, что существенно отличается от официально утвержденных запасов (всего 38 000 тонн) [9].

Литиевый рынок США является зеркальным отражением мировых рынков с точки зрения конечного потребления, которое оценивается следующим образом: батареи – 35 %; керамика и стекло – 32 %; смазочные материалы – 9 %; вещества для очистки воздуха и порошковые флюсы для непрерывного литья – по 5 %; производство полимеров – 4 %; первичное производство алюминия – 1 %; другие виды использования – 9 %. За последние годы потребление литиевых батарей значительно выросло, поскольку перезаряжаемые литиевые батареи широко применяются в портативных электронных устройствах и, все чаще, в электроинструментах, автомобилях и сетевых хранилищах информации. Следует отметить, что в США, как и по всему миру, для изготовления стекла и керамики литиевые минералы используются непосредственно в виде рудных концентратов.

4. Результаты оценки дополнительных мировых запасов лития

Как уже отмечалось, в 2010–2012 гг. произошел резкий скачок в оценке размеров мировых резервов лития (см. рис. 2), который был обеспечен такими странами, как Чили, Аргентина и Китай и сопровождался ростом мировой добычи (см. рис. 3). В работах [1, 2] отмечалось, что резервы составляют всего 30 % от объемов лития, содержащегося в подземной рапе и попутных нефтяных водах. Таким образом, можно грубо оценить разведанные, но не утвержденные запасы лития в этих источниках – примерно 50 млн. тонн.

Подземные рассолы и попутные нефтяные воды образуются в результате растворения солевых минеральных отложений соленосных осадочных бассейнов в земной коре водами, поступающими в недра Земли с поверхности. Соответственно, соленосные осадочные бассейны – это бассейны с осадочной породой, содержащие соляные и в большинстве своем галогенные толщи, часто одну или более галогенных формаций. Среди крупных осадочных бассейнов мира около половины (более 110) содержат соляные (галогенные) толщи, то есть являются соленосными (рис. 6). Соленосные бассейны широко распространены по всей планете: в пределах всех континентов, морей, океанических окраин, кроме абиссальных пространств самих океанов. На суше и в акваториях соли, с которыми связаны чрезвычайно высокие концентрации и запасы бора, лития, иногда калия, рубидия и др., вскрыты на всех ныне доступных бурению глубинах земных недр. Эти отложения образовывались в историческом промежутке от 600 млн лет до н.э. вплоть до настоящего времени.

Повышенное содержание лития наблюдается, прежде всего, в хлоридно-натриевых, хлоридно-сульфатно-калиевых образованиях. Объемы этих образований определены достаточно точно [17]. Для оценки глобальных литиевых ресурсов в данной статье используется информация о запасах хлоридно-калиевых солей, так как литий склонен накапливаться именно в таких отложениях. По данным [17], объем отложений хлоридно-калиевых солей составляет примерно 77 млн км³. С учётом плотности этих солей, равной около 2,1 г/см³, получаем массу этих залежей – приблизительно $1,6 \cdot 10^{17}$ тонн. Поскольку содержание лития в таких породах обычно ниже суммарного содержания калия и натрия примерно в 5 500÷11 000 раз, а породы представляют собой в основном хлориды, можно оценить запасы лития в этих породах – около $7,4 \cdot 10^{12}$ тонн. Отсюда можно сделать вывод, что бедные по литию подземные воды являются неисчерпаемым в локальном периоде и возобновляемым источником лития.



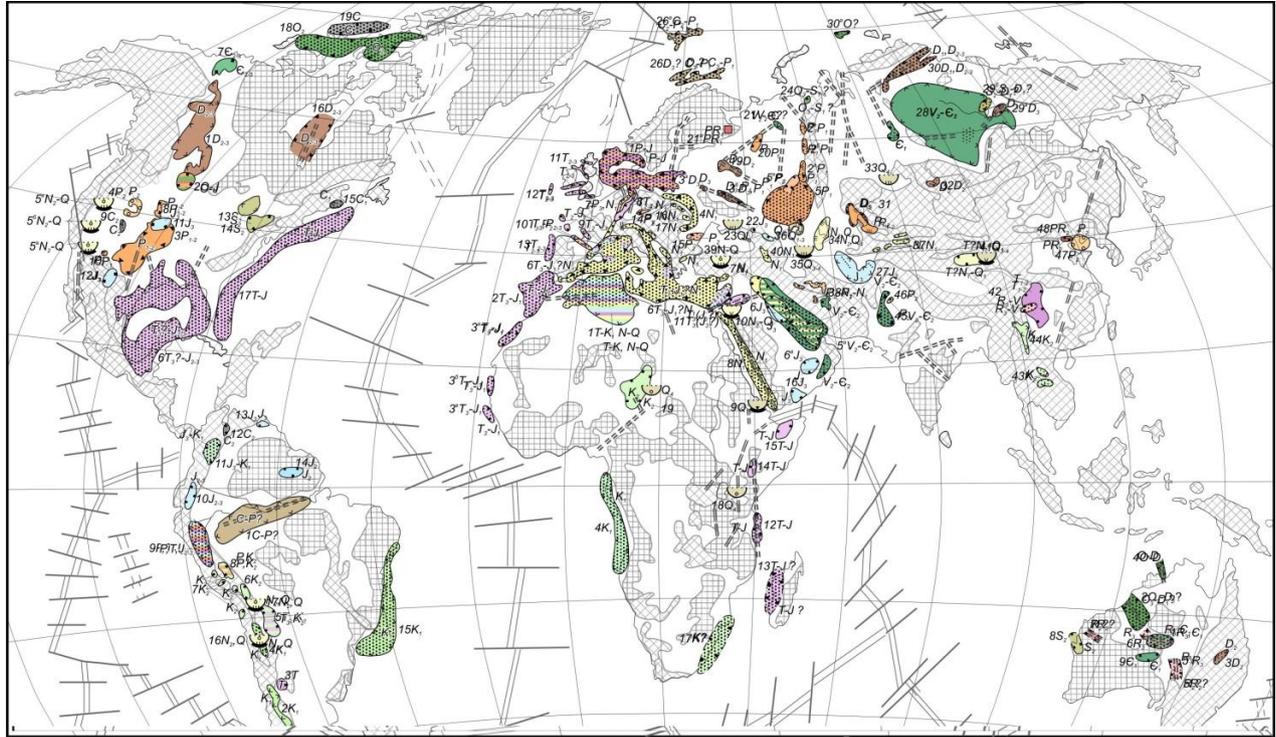


Рис. 6 – Соленосные бассейны мира [16–18] (бассейны сульфатно-кальциевого типа, не содержащие солей других типов, а также имеющие ограниченное распространение, на карте не показаны):

Возрастные группы соленосных бассейнов		Вещественно-геохимические типы солей*					Стратиграфический возраст				
		хлоридно-натриевый	хлоридно-калиевый	сульфатно-калийный	сульфатно-натриевый	карбонатно-натриевый (содовый)	Q	J ₁	C _{1,2}	Є _{2,3}	
Палеобассейны											
Современные бассейны (озерные, лагунные)	Рапа и современные осадки	—	—	—			—	—	—		
	Рапа, осадки и погребенные залежи	—					—	—	—		

* Для палеобассейнов - границы распространения (а - локальные), пунктир - предполагаемые; для современных бассейнов - внемасштабные знаки. Смешанные типы показаны сочетанием значков. Прочерк в легенде - типы на карте отсутствуют. Цвет заливки поля отвечает стратиграфическому возрасту, при наличии в разрезе солей двух-трех возрастов дана либо полосатая закразка, либо показаны только доминирующие.

Площади проявления солонюполюстной тектоники
 Складчатые области
 Рифты внутриконтинентальные
 Рифты внутриокеанические
 18 D, Номер соленосного осадочного бассейна и возраст солей
 Выступы фундамента в пределах древних платформ
 Рифты неогейдинамические
 Рифты докейнозойские, погребенные

Fig. 6 – Saline basins of the world [16–18] (pools of sulphate-calcium type which do not contain salts of other types, and have limited distribution are not shown on the map):

Age groups of saline basins		Chemical and geochemical types of salts *					Stratigraphic age				
		Sodium chloride	Potassium Chloride	Potassium sulphate	Sodium sulfate	Sodium carbonate	Q	J ₁	C _{1,2}	Є _{2,3}	
Paleobasins											
Modern basins (lake lagoons)	Рапа and modern sedimentary rocks	—	—	—			—	—	—		
	Рапа, sediments and funeral deposits	—					—	—	—		

* For paleo basins - the boundaries of propagation (a - local), dotted lines - prepolar; for modern basins - use of scale symbols. Modern types are shown by a combination of icons. A dash in the legend - there are no types on the map. The color of the field filling corresponds to the stratigraphic age, if there are two or three ages in the profile, either striped shading is shown or only dominant ones are shown

Squares manifestations of salt dome tectonics
 Folded areas
 Rifts inland
 Rifts inside the ocean
 18 D, Number of salt sedimentary basin and age of salts
 The projections of the foundation within the ancient platforms
 Rifts non-geodynamic
 before Cenozoic, funerary

5. Перспективы увеличения объемов добычи лития в мире

На сегодняшний день мировой объем добычи лития составляет 40 тыс. тонн в год. По нашим расчетам, объемы его добычи к 2020 г. могут достигнуть 52÷65 тыс. тонн. Таким образом, прирост может составить 12÷25 тыс. тонн лития в год. Приняв за точку отсчета цену на карбонат лития в размере 13 400 \$ за тонну, получим возможный прирост объемов рынка лития – 850÷1 750 млн \$ в год. С учетом того, что цены на карбонат лития в Китае выросли более чем в 2 раза по сравнению с базовой ценой и продолжают расти, прирост объемов рынка лития может также вырасти в 2 раза и составить от 1,5 млрд \$ в год до 3,5 млрд \$ в год.

Это может произойти за счёт экстенсивного пути, связанного с увеличением мощностей действующих производств и ростом добычи лития из существующих источников. Однако этот путь ограничивается существующими и разведанными запасами лития и будет приводить к постепенному снижению темпов роста добычи ввиду исчерпания ресурсов, что уже фактически произошло с добычей литиевых минералов, доля которых в существующих резервах за последние 20 лет имеет тенденцию к снижению (см. рис. 2).

Прогнозируемый прирост добычи лития может быть обеспечен тремя интенсивными путями:

- 1) повышение эффективности добычи лития из существующих сырьевых источников;
- 2) привлечение в качестве ресурсов бедных литиевых источников, таких как подземные рассолы, попутные нефтяные воды и воды озер с низким содержанием лития;
- 3) переработка вышедших из строя литиевых батарей.

При повышении эффективности добычи лития следует обратить внимание на следующий факт. Существующие схемы переработки рассолов озер с высоким содержанием лития основываются на галургическом переделе, который позволяет извлекать в среднем не более 75 % лития, содержащегося в исходном растворе. Таким образом, 25 % лития остается в хвостах (отходы процессов обогащения полезных ископаемых). Учитывая то, что средний объем добычи лития составляет примерно 40 тыс. тонн в год, объем потерь – около 10 000 тонн в год. Опираясь на принятую авторами данной статьи базовую цену карбоната лития, получим объем недополученного карбоната лития в размере примерно 700÷1 500 млн. \$ в год, в зависимости от возможной цены.

Одним из высокотехнологичных методов является технология извлечения лития с помощью неорганических композиционных высокоселективных к

литию сорбентов, которые были разработаны в статьях [1, 19]. Эти сорбенты можно применять, как для доизвлечения лития на существующих производствах, так и для создания новых производств по его извлечению из бедных по литию природных растворов, таких как подземные воды и попутные воды нефтяных месторождений.

Попутной водой называют воду любого происхождения, добываемую из продуктивного пласта с нефтью или газом [20, 21]. Проблема исключения негативного действия промежуточных водных слоев на процесс отстоя добытой нефти касается всех нефтяных регионов мира. Так, средняя обводненность добываемой нефти, по нефтедобывающей отрасли России, составляет более 75 % [22]. Объем нефтедобычи в России является одним из крупнейших в мире, потому это значение можно с определенной вероятностью распространить на всю добываемую в мире нефть. По данным на 2016 г. объем мировой добычи нефти составлял 4382,4 млн тонн в год, соответственно, объем попутных нефтяных вод – примерно 3 300 млн. м³ в год. Поскольку обычно содержание лития в этих водах колеблется в пределах 5÷50 г/м³, для расчета содержание лития примем равным 10 г/м³ (ниже добыча нерентабельна), тогда потенциальный объем лития, который может быть добыт из попутных нефтяных вод, составит примерно 33 000 тонн в год. Таким образом, может быть получено около 176 тыс. тонн карбоната лития, что эквивалентно объему рынка карбоната лития от 2,4 млрд \$/год до 5,3 млрд \$/год в зависимости от цены.

Проблему утилизации литиевых батарей необходимо рассматривать как перспективную задачу, которая осложнена организационной проблемой сбора отработанных батарей. Исторически рециркуляция лития была незначительной, но неуклонно возрастала из-за роста потребления литиевых батарей. Например, компания Albemarle Co из США перерабатывает литиевые металлы и литий-ионные батареи с 1992 г. на своем объекте в Британской Колумбии, Канада. В 2009 г. министерство энергетики США выделило этой компании грант в размере 9,5 млн. \$ США на строительство (завершилось в 2015 г.) первой установки по переработке литий-ионных аккумуляторных батарей [1, 9].

Можно оценить потенциальный объем рынка вторичного лития из отработанных батарей. В 2017 г. число электромобилей в мире подошло к отметке 2 млн, по оценкам Международного энергетического агентства, если страны будут следовать Парижскому климатическому соглашению, к 2030 г. в мире будет функционировать 140 млн электромобилей. Это может привести к появлению 11 млн тонн отработанных литий-ионных батарей, нуждающихся в утилизации в период между сегодняшним днем и 2030 г. [23]. Однако в ЕС перерабатывается всего 5 % литий-ионных батарей, что имеет



экологические издержки [24]: выделение токсичных газов; разрушение аккумуляторов может привести к загрязнению воды и проявлению других экологических последствий [25, 26].

Как отмечалось ранее, 35 % объема добываемого лития идет на изготовление литиевых батарей. Поскольку объем добычи лития составляет примерно 40 тыс. тонн в год, количество лития, пошедшее на изготовление батарей, составляет примерно 14 тыс. тонн в год. Можно предположить, что весь этот объем идет на обновление имеющегося парка батарей, так как малые батареи служат от одного до двух месяцев, а срок службы больших батарей не превышает 3 лет. Поэтому полученная оценка дает верхнюю границу объема рынка лития для батарей – от 1,0 млрд \$ в год до 2,2 млрд \$ в год в зависимости от цены на карбонат лития.

6. Заключение

Проведенный анализ мировых литиевых ресурсов и тенденций изменения объемов добычи и потребления лития показал, что используемые в настоящее время ресурсы и технологии добычи имеют существенные ограничения – богатые литиевые ресурсы могут истощиться достаточно быстро. Проведенные расчеты показали, что литиевые руды в мире закончатся примерно через 25 лет, а литиевые запасы разведанных ресурсов, связанные с соляными озерами, – примерно через 50 лет. Это в свою очередь может привести к резкому росту цен на литий и, следовательно, к снижению рентабельности его применения в литиевых батареях. На основе анализа колебаний рынка лития статистическими методами была оценена минимально и максимально возможная цена на карбонат лития к 2020 г. – 30 000 US\$ и 50 000 US\$ за тонну соответственно.

В связи с этим перспективными становятся запасы лития, сосредоточенные в подземных водах, в том числе попутных нефтяных.

Наиболее типичный пример существующей структуры добычи, потребления и экспорта и импорта литиевого сырья дают США. На базе данных по объемам экспорта и импорта лития и его соединений в США удалось с определенной долей вероятности восстановить информацию по добыче и внутреннему потреблению лития всеми отраслями промышленности США. Эти данные позволили также предположить, что США ориентируются в первую очередь на импорт литиевого сырья. В будущем эта тенденция может измениться.

Проведенный анализ литературных данных по объемам отложений хлоридно-калиевых солей позволил оценить массу этих залежей – приблизительно $1,6 \cdot 10^{17}$ тонн и, соответственно, запасы лития в

этих породах – около $7,4 \cdot 10^{12}$ тонн. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что бедные по литию подземные воды одновременно являются неисчерпаемым, а в локальном периоде и возобновляемым источником лития.

Проведенные исследования показали, что для обеспечения прогнозируемого авторами данной статьи прироста добычи лития необходимо проводить интенсивные исследования по трем основным направлениям (см. главу 5).

Список литературы

[1] Kudryavtsev, P.G. Lithium In Nature, Application, Methods of Extraction (Review) [Text] / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel-Technological Advantages. – 2016. – Vol. 18. – No 3. – P. 63–83. ISSN: 1565-1532

[2] Кудрявцев, П.Г. Литий: Мировые запасы и перспективы применения [Текст] / П.Г. Кудрявцев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 13–14. – С. 72–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>.

[3] Кудрявцев, П.Г. Сравнение эффективности способов извлечения лития и его соединений из природного сырья [Текст] / П.Г. Кудрявцев, Н.П. Кудрявцев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 28–30. – С. 82–105.

[4] WEALTHDAILY. Special Report: Lithium: The Oil of the 21st Century [E-resource]. – Available on: <https://www.wealthdaily.com/report/lithium-the-oil-of-the-21st-century/1449> 2018 – (Дата обращения: 14.03.18.).

[5] Lithium: A Bubble Waiting to Burst? [E-resource]. – Available on: <https://themarketmogul.com/lithium-next-oil-next-bubble/> – (Дата обращения: 01.03.17.).

[6] Литий — это новая нефть? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.insider.pro/investment/2017-03-02/litij-eto-novaya-neft/> – (Дата обращения: 02.03.17.).

[7] The Global Scramble for Lithium – MarketWatch, Published: Oct 5, 2017 8:30 a.m. ET [E-resource]. – Available on: <http://www.marketwatch.com/story/the-global-scramble-for-lithium-2017-10-05/print> – (05.10.17.).

[8] Power company kills nuclear plant, plans \$6 billion in solar, battery investment [E-resource]. – Available on: <http://nnw.fm/gp4RD> 8/31/2017. – (31.08.17.).

[9] Mineral Commodity Summaries U.S. Geological Survey [E-resource]. – Available on: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> – (Дата обращения: 09.02.18.).

[10] Lithium Market Update: Q1 2018 in Review [E-resource]. – Available on: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy->



investing/lithium-investing/lithium-market-update/ – (Дата обращения: 17.02.18.).

[11] Galaxy Resources Limited, Investor Presentation [E-resource]. – Available on: <http://www.asx.com.au/asxpdf/20170504/pdf/43j0x935853c09.pdf> – (Дата обращения: 01.05.17.).

[12] Trends in lithium project transactions [E-resource]. – Available on: <https://snowdengroup.com/news/trends-lithium-project-transactions/> – (Дата обращения: 16.08.16.).

[13] Search Import Export Data of India [E-resource]. – Available on: <https://www.zauba.com/import-lithium-carbonate-hs-code.html> – (Дата обращения: 18.02.18.).

[14] Lithium Miner News For The Month Of May 2017 [E-resource]. – Available on: <https://seekingalpha.com/article/4077382-lithium-miner-news-month-may-2017> – (Дата обращения: 15.05.17.).

[15] Latest Minor Metals News [E-resource]. – Available on: <https://price.metal.com/prices/other-minor-metals#> – (Дата обращения: 31.10.17.).

[16] Беленицкая, Г.А. Тектонические аспекты пространственного и временного распределения соленосных бассейнов мира / Г.А. Беленицкая // Электронное научное издание Альманах «Пространство и время». Специальный выпуск СИСТЕМА ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ. – 2013. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 1–31.

[17] Беленицкая, Г.А. Соленосные осадочные бассейны. Литолого-фациальный, геодинамический и минерагенический анализ [Текст] / Г.А. Беленицкая. – Осадочные бассейны России. Вып. 4. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 72 с.

[18] Wang, S. Distribution of Cambrian Salt-Bearing Basins in China and Its Significance for Halite and Potash Finding / S. Wang [et al.] // *Journal of Earth Science*. – Vol. 24. – No. 2. – P. 212–233. DOI: 10.1007/s12583-013-0319-0.

[19] Kudryavtsev, P. Alkoxides of chemical elements - Promising class of chemical compounds which are raw materials for HI-TECH industries / P. Kudryavtsev // *Scientific Israel – Technological Advantages*. – 2014. – Vol. 16. – No. 2. – P.147–170.

[20] Зорькин, Л.М. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: Справочник / Л.М. Зорькин. М.: Недра. 1989. – 382 с. ISBN 5-247-00425-6

[21] Water Issues Dominate Oil and Gas Production, Oil & Natural Gas Program Newsletter, Fall 2013 [E-resource]. – Available on: <https://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/epnews-2013-fall.pdf> – (Дата обращения: 20.01.18.).

[22] Зарипов, А.Г. Комплексная подготовка продукции нефтегазодобывающих скважин: Т. 1 / А.Г.

Зарипов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 1996.

[23] The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem, *The Guardian* [E-resource]. – Available on:

<https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling> – (Дата обращения: 10.08.17.).

[24] Lithium [E-resource]. – Available on: http://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf – (Дата обращения: 16.02.18.).

[25] European Battery Recycling Association, EBRA welcomes the publication of the Commission Regulation on the calculation of recycling efficiencies for the recycling of waste batteries and accumulators, press release, [E-resource]. – Available on: http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf – (22.06.12.).

[26] Ekermo V., Recycling opportunities for Li-ion batteries from hybrid electric vehicles: Master of Science Thesis in Chemical Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering Industrial Materials Recycling Göteborg, Sweden, 2009. See the table on page 4 for the comparison of voltage and charge densities for common battery chemistries [E-resource]. – Available on: http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile_f0/Recycling_opportunities_for_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31 – (16.12.2017).

References

[1] Kudryavtsev P.G. Lithium in Nature, Application, Methods of Extraction (Review). *Scientific Israel-Technological Advantages*, 2016;18(3)63–83; ISSN: 1565-1532.

[2] Kudryavtsev P.G. Lithium: World reserves and prospects of application (Litii: Mirovye zapasy I perspektivy primeneniya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;13–14:72–88; DOI: <http://dx.doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088> (in Russ.).

[3] Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Сравнение эффективности способов извлечения лития и его соединений из природного сырья *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;28–30:82–105 (in Russ.).

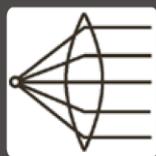
[4] WEALTHDAILY. Special Report: Lithium: The Oil of the 21st Century [E-resource]. Available on: <https://www.wealthdaily.com/report/lithium-the-oil-of-the-21st-century/1449> 2018 (14.03.18.).



- [5] Lithium: A Bubble Waiting to Burst? [E-resource]. Available on: <https://themarketmogul.com/lithium-next-oil-next-bubble/> (01.03.17.).
- [6] Is Lithium a New Oil? (Litii – novaya neft'?) [E-resource]. Available on: <https://ru.insider.pro/investment/2017-03-02/litij-eto-novaya-neft/> 2017-03-02 (02.03.17.) (in Russ.).
- [7] The Global Scramble for Lithium – MarketWatch, Published: Oct 5, 2017 8:30 a.m. ET, [E-resource]. Available on: <http://www.marketwatch.com/story/the-global-scramble-for-lithium-2017-10-05/print> (05.10.17.).
- [8] Power company kills nuclear plant, plans \$6 billion in solar, battery investment [E-resource]. Available on: <http://nnw.fm/gp4RD> (31.08.17.).
- [9] Mineral Commodity Summaries U.S. Geological Survey [E-resource]. Available on: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> (09.02.18.).
- [10] Lithium Market Update: Q1 2018 in Review [E-resource]. Available on: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy-investing/lithium-investing/lithium-market-update/> (17.02.18.).
- [11] Galaxy Resources Limited, Investor Presentation [E-resource]. Available on: <http://www.asx.com.au/asxpdf/20170504/pdf/43j0x935853c09.pdf> (01.05.17.).
- [12] Trends in lithium project transactions [E-resource]. Available on: <https://snowdengroup.com/news/trends-lithium-project-transactions/> (16.08.16.).
- [13] Search Import Export Data of India [E-resource]. Available on: <https://www.zauba.com/import-lithium-carbonate-hs-code.html> (18.02.18.).
- [14] Lithium Miner News for the Month of May 2017 [E-resource]. Available on: <https://seekingalpha.com/article/4077382-lithium-miner-news-month-may-2017> (15.05.17.).
- [15] Latest Minor Metals News [E-resource]. Available on: <https://price.metal.com/prices/other-minor-metals#> (31.10.17.).
- [16] Belenitskaya G.A. Tectonic aspects of spatial and temporal distribution of saline basins of the world (Tectonicheskie aspekty prostranstvennogo i vremennogo raspredeleniya solenosnyh basseinov mira). Electronic Scientific Edition Almanah "Prostranstvo i vremya". Special issue "Sistema Planeta Zemlya", 2013;4(1):1–31 (in Russ.).
- [17] Belenitskaya G.A. Saline sedimentary basins. Lithologic and facies, geodynamic and mineralogical analysis. Sedimentary basins of Russia (Solenosnye osadochnye basseiny. Litologo-fatsialnyi, geodinamicheskii i mineragenicheskii analiz. Osadochnye basseiny Rossii). Iss. 4. SPb: Vsegei Publ., 2000 (in Russ.).
- [18] Wang S., Zheng M., Liu X., Niu X., Chen W., Su K. Distribution of Cambrian Salt-Bearing Basins in China and Its Significance for Halite and Potash Finding. *Journal of Earth Science*, 24(2):212–233. DOI: 10.1007/s12583-013-0319-0.
- [19] Kudryavtsev P. Alkoxides of chemical elements – Promising class of chemical compounds which are raw materials for HI-TECH industries. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 2014;16(2):147–170.
- [20] Zorkin L.M. Waters of oil and gas deposits of the USSR, Handbook (Vody neftnykh i gazovykh mestorozhdenii SSSR). Moscow: Nedra Publ., 1989, ISBN 5-247-00425-6
- [21] Water Issues Dominate Oil and Gas Production, Oil & Natural Gas Program Newsletter, Fall 2013, [E-resource]. Available on: <https://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/epnews-2013-fall.pdf> (20.01.18.).
- [22] Zaripov A.G. Complex preparation of oil and gas production wells (Kompleksnaya podgotovka produktivnykh neftegazodobyvaushchikh skvazhin), vol 1. Издательство Московского Государственного Горного Университета, Moscow: izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1996
- [23] The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem, The Guardian [E-resource]. Available on: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling> (10.08.17.).
- [24] Lithium [E-resource]. Available on: http://www.foeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf (16.02.18.).
- [25] European Battery Recycling Association, EBRA welcomes the publication of the Commission Regulation on the calculation of recycling efficiencies for the recycling of waste batteries and accumulators, press release [E-resource]. Available on: http://www.ebra-recycling.org/sites/default/files/20120629_PR%20EBRA-Welcoming%20REG%20on%20RE.pdf (22.06.12.).
- [26] Ekermo V., Recycling opportunities for Li-ion batteries from hybrid electric vehicles: Master of Science Thesis in Chemical Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering Industrial Materials Recycling Göteborg, Sweden, 2009. See the table on page 4 for the comparison of voltage and charge densities for common battery chemistries [E-resource]. Available on: http://www.chalmers.se/chem/EN/divisions/industrial-recycling/finished-projects/recycling-opportunities/downloadFile/attachedFile_f0/Recycling_opportunities_for_Li-ion.pdf?nocache=1294145371.31 (16.12.17.).

Транслитерация по BSI





Статья поступила в редакцию 27.02.18. Ред. рег. № 2644

The article has entered in publishing office 27.02.18. Ed. reg. No. 2644

УДК 621.9.044, 621.373.8

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ*

С.А. Котов¹, Н.А. Лябин², М.А. Казарян³, В.И. Сачков⁴

¹ООО «НТО ИРЭ-Полус»

стр. 3, д. 1, пл. Академика Введенского, Фрязино, Московская область, 141190, Россия
тел.: +7 (495) 702-95-89; e-mail: skotov@ntoire-polus.ru

²АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина»

д. 2а, ул. Вокзальная, Фрязино, Московская область, 141190, Россия
тел.: +7 (495) 465-86-66; e-mail: lilt@istokmw.ru

³Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
д. 53, Ленинский проспект, Москва, 119991, Россия
тел.: +7 (499) 135-42-64; e-mail: postmaster@lebedev.ru

⁴Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова, Томский государственный университет
д. 1, Новособорная пл., Томск, 634050, Россия
тел.: +7 (3822) 53-35-77; e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104

Заключение совета рецензентов: 05.03.18 Заключение совета экспертов: 15.03.18 Принято к публикации: 23.03.18

Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в таких ключевых отраслях современной промышленности, как ветро- и гидроэнергетика, авиа- и машиностроение и др., благодаря высокому уровню их упругопрочностных свойств, многофункциональности, экологичности и возможности обеспечения минимальной массы изделий, ставит проблему эффективной обработки этих материалов. Традиционные методы обработки (механическая и гидроабразивная) обладают рядом существенных недостатков: сильный износ режущего инструмента; расслоение материала из-за вибрационных и ударных нагрузок; ограничения на контур раскроя и т.д. В статье рассматривалась лазерная обработка ПКМ, которая в настоящее время считается наиболее перспективным бесконтактным, гибким в управлении, производительным и не требующим расходных материалов способом обработки. В ходе анализа теоретических и экспериментальных отечественных и зарубежных работ установлено, что перспективным направлением для качественной и производительной обработки ПКМ является применение промышленных волоконных иттербиевых лазеров. Результаты исследований с помощью экспериментальных технологических установок на базе наносекундных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров с мощностью излучения до 1 кВт и оптических двухосевых гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой со скоростью перемещения луча до 20 м/с показали, что метод лазерной многопроходной обработки ПКМ с послойным удалением (абляцией) материала за счет механизма испарения позволяет осуществлять высококачественную прецизионную резку и сверление стекло- и углепластиков толщиной 1–3 мм.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; углепластики; стеклопластики; волоконный иттербиевый лазер; лазерная обработка; зона термического влияния.

*Котов С.А., Лябин Н.А., Казарян М.А., Сачков В.И. Современные полимерные композиционные материалы и возможности их лазерной обработки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):82-104.

MODERN POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND POSSIBILITIES OF THEIR LASER MACHINING

S.A. Kotov¹, N.A. Lyabin², M. A. Kazarian³, V.I. Sachkov⁴

¹IRE-Polus Co.

1 Academician Vvedenskii Sq., Fryazino, Moscow reg., 141190, Russia
tel.: +7 (495) 702 95 89, e-mail: skotov@ntoire-polus.ru

²JSC RPE "ISTOK" n. a. Shokin

2a Vokzalnaya St., Fryazino, Moscow region, 141190, Russia
tel.: +7 (495) 465 86 66, e-mail: lilt@istokmw.ru

³The P. N. Lebedev Physical Institute

53 Leninskiy Av., Moscow, 119991, Russia
tel.: +7 (499) 135 42 64, e-mail: postmaster@lebedev.ru

⁴SFTI, Tomsk State University

1 Novosobornaya Sq., Tomsk, 634050, Russia
tel.: +7 (3822) 53 35 77, e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104

Referred 5 March 2018 Received in revised form 15 March 2018 Accepted 23 March 2018



The widespread introduction of polymer composite materials in key sectors of modern industry such as wind and hydropower engineering, aircraft and machinery ones, etc. due to the high level of their strength properties, versatility and ability to provide the lowest weight of parts of products raises the problem of their processing. Traditional processing methods (mechanical and abrasive water jet machining) have some significant shortcomings: high tool wear, delamination due to vibration and shock loadings, limitations on the cutting contour and others. The paper deals with the polymer composites laser machining which is considered to be one of the promising solutions for elimination of conventional methods disadvantages due to a contact-free, flexible and high-performance processing method. As a result of analysis of theoretical and experimental domestic and foreign works, the use of industrial ytterbium fiber lasers are found to be a promising direction for high-quality and productive processing of polymer composite materials. The results of studies using the experimental technological setups on the basis of nanosecond pulsed and continuous ytterbium fiber lasers with a radiation power up to 1 kW and optical scanning systems based on the biaxial galvo scanners and focusing F-Theta lenses with beam travel speeds up to 20 m / s have shown that the laser multi-pass machining of polymer composite materials with layer-by-layer removal (ablation) of the material due to the evaporation mechanism allows for precise and high quality cutting and drilling of carbon and glass fiber reinforced plastics and carbon plastics with a thickness 1–3 mm.

Keywords: polymer composite materials, glass fiber reinforced plastics, carbon fiber reinforced plastics, ytterbium fiber laser, laser machining, heat affected zone.



Николай Александрович
Лябин
Nikolay Lyabin

Сведения об авторе: д-р техн. наук, начальник лаборатории АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина».

Образование: Мордовский государственный университет (1972 г.).

Область научных интересов: лазеры; лазерные системы и их применение в науке, технике, медицине; физическая оптика; лазерное технологическое оборудование и технология обработки материалов.

Публикации: 150.
h-index: 8

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Head of Laboratory, Joint-Stock Company Research & Production Corporation "ISTOK" named after A.I. Shokin.

Education: Mordovia State University, 1972.

Research interests: lasers; laser systems and their applications in science, technology, medicine; physical optics; laser processing equipment and material processing technology.

Publications: 150.



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: 12

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

Publications: 600.



Виктор Иванович Сачков
Viktor Sachkov

Сведения об авторе: д-р хим. наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет.

Образование: Томский государственный университет (1995 г.).

Область научных интересов: лазерная технология; нанотехнологии; химическая кинетика.

Публикации: 120.
h-index: 4

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Head of Laboratory, Tomsk State University.

Education: Tomsk State University, 1995.

Research interests: laser technology; nanotechnology; chemical kinetics.

Publications: 120.



Сергей Александрович Котов
Sergey Kotov

Сведения об авторе: инженер, ООО «НТО ИРЭ-Полус».

Образование: Московский энергетический институт (2011 г.).

Область научных интересов: лазерная обработка композиционных материалов.

Публикации: 8.

Information about the author: Engineer, IRE-Polus.

Education: MPEI, 2011.

Research interests: laser machining of composite materials.

Publications: 8.

1. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря уникальному комплексу технологических и эксплуатационных свойств являются классом материалов, определяющим развитие современных ветро- и гидроэнергетических установок, экологически чистого транспорта на электротяге, авиакосмических аппаратов и др. [1, 2]. Наиболее перспективным типом ПКМ, обладающим высокой технологичностью и регулируемыми конструкционными свойствами, являются волокнистые ПКМ. Требуемый уровень конструкционных свойств этих ПКМ обеспечивается сочетанием высокопрочных волокон (нити, ленты, ткани различной текстуры) с термореактивными и

термопластичными связующими матрицами на основе эпоксидных, винилэфирных, фенолоальдегидных, имидных и других смол. Химическая природа волокнистых наполнителей определяет основной ассортимент ПКМ: стекло-, органо- и углепластики [3].

Применение ПКМ в современной технике позволяет снизить вес, трудоемкость изготовления и увеличить износостойкость конструкций, что значительно повышает экономическую эффективность конечного изделия [4, 5]. В известных зарубежных компаниях, таких как Gamesa, Vesta Wind Systems и Enercon, производящих ветрогенераторы, ПКМ широко применяются при производстве лопастей турбин длиной до 60 м. Внешний вид лопастей для ветроэнергетических установок представлен на рис. 1 [1].



Рис. 1 – Лопасти ветроэнергетических установок из углепластиков
Fig. 1 – Blades of wind power plants from carbon fiber reinforced plastics



Среди ПКМ, лидирующие позиции занимают углепластики, существенно превосходящие традиционные стали, алюминиевые и титановые сплавы по удельной прочности и жесткости, усталостной и длительной прочности, возможностям регулировки анизотропии свойств, широкому комплексу тепло- и электрофизических характеристик, многофункциональности применения [6]. В большинстве конструкций ветро- и гидроэнергетических установок и электрического транспорта из ПКМ используют угле- и стеклопластики на основе модифицированных эпоксидных матриц с оптимизированными параметрами теплостойкости, огнестойкости, трещиностойкости и водопоглощения. Производство элементов конструкций из углепластика и других типов ПКМ в значительной степени ориентируется на препреговую технологию, которая предполагает применение высококачественных полуфабрикатов для изделий, получаемых с помощью технологий прессования, вакуумного и автоклавного формования и др.

Отечественная и зарубежная практика [6–11] показала, что использование углепластиков целесообразно в энергетике – для лопастей и опор ветро- и гидроэнергетических установок; в автомобилестроении – для деталей и корпусов грузовых и легковых автомашин с электрической силовой установкой, цистерн, дверей, бамперов и корпусов агрегатов; в судостроительной промышленности – для деталей и корпусов морских и речных судов, гребных винтов, в панелях и надстройках; в строительстве – для изготовления панелей жилых домов, балок, пролетов мостов, кранов; в электротехнике – для изготовления опор линий электропередач, деталей электродвигателей и высоковольтных изоляторов; в железнодорожном транспорте – для изготовления вагонов, контейнеров и узлов подвески; в нефтяной и газовой промышленности – для бурения скважин и при постройке трубопроводов.

На финальном этапе производства изделий из ПКМ требуется прецизионная размерная обработка по внутренним и внешним контурам формованных заготовок. Одной из часто встречающихся и в то же время наиболее трудоемкой операцией при обработке ПКМ является формирование отверстий различного назначения: крепежных, технологических, базовых, контрольных и др. Для выполнения этих операций применяются механический, гидроабразивный и лазерный способы обработки. Проблемы при обработке ПКМ определяются их сложным строением: слоистой структурой, неоднородностью состава и высокой анизотропией механических и теплофизических свойств. Каждый способ обработки обладает определенными преимуществами и недостатками [12–15]. При механической обработке волокнистых ПКМ 90 % теплоты уходит в инструмент, 5 % в стружку и 5 % в обрабатываемую деталь. Такие тепловые условия обработки требуют охлаждения инструмента эмульсиями, что может ухудшить физико-

механические свойства детали, или сжатым воздухом, что требует установки фильтровентиляционной системы для уменьшения концентрации вредных веществ. Технологический процесс механической обработки ПКМ характеризуется образованием макротрещины в материале перед рабочей кромкой режущего инструмента с формированием стружки. Однако, наряду с главной трещиной, образуется сетка мелких трещин, направленных вглубь материала, которые формируют дефектную область. Анизотропия механических свойств определяет различия режимов обработки ПКМ в разных направлениях и необходимость разработки особых технологических приемов для достижения высокого качества. Целый ряд проблем возникает ввиду высокой твердости армирующих наполнителей ПКМ – в первую очередь это необходимость применять дорогостоящие сверхтвердые инструментальные материалы, например, при обработке углепластиков.

Одним из основных видов механической обработки ПКМ является сверление качественных отверстий для заклепочных и болтовых соединений. Такие характеристики отверстий, как точность, шероховатость и отклонение оси от перпендикуляра к поверхности могут быть причиной повышения концентрации напряжений в зоне механического крепления, ведущей к его преждевременному разрушению. Типовыми дефектами при механическом сверлении отверстий в ПКМ являются: термодеструкция полимерной матрицы из-за высокой интенсивности обработки; вырывание волокон и фрагментов матрицы вследствие износа инструмента; расслоение и сколы материала на входе и выходе сверла по причине склонности некоторых типов ПКМ, в частности углепластиков, к межслоевому разрушению. При этом свойства волокнистого наполнителя, тип и схема армирования оказывают большее влияние на обрабатываемость режущим инструментом по сравнению с материалом полимерной матрицы. Для устранения указанных дефектов используют ряд технологических приемов: проводят сверление в несколько этапов с предварительным выполнением “пилотного” отверстия диаметром не более 0,5 от заданного; применяют алмазный инструмент, ресурс которого может достигать 300 отверстий; используют специальные подпоры, прижимы и приводы с регулируемой подачей для снижения расслаивающих усилий на материал. Следует учитывать, что точность сверления отверстий в ПКМ находится в пределах 11 ÷ 12 квалитетов.

Технологии гидроабразивного резания (ГАР) наряду с другими высокотехнологичными способами также используются при обработке ПКМ. ГАР основано на сжатии рабочей жидкости до сверхвысоких давлений (до 400 МПа) с последующим продавливанием через специальное сопло диаметром около 250 мкм. В зоне обработки кинетическая энергия высокоскоростной струи жидкости с частицами абразива (800 ÷ 900 м/с) преобразуется в механиче-



скую работу – резание. При ГАР ПКМ обеспечивает возможность обработки по сложному контуру с отсутствием зоны термического влияния (ЗТВ), пыли и токсичных испарений. На установках портального типа ведущих мировых производителей, например RESATO (Голландия), для прецизионной обработки точность составляет порядка ± 100 мкм, а конусность канала реза не превышает 100 мкм. При этом существует ряд недостатков, снижающих возможности использования данного способа:

1) высокие эксплуатационные затраты вследствие большого количества расходных материалов: абразивный песок, сопло, фокусирующие трубки, уплотнители помпы и др.;

2) необходимость гашения энергии режущей струи в ванне с толщиной слоя воды порядка 700 мм;

3) преимущественное использование ГАР для резки листовых заготовок вследствие существенных ограничений при обработке деталей сложной формы;

4) опасность изменения физико-механических свойств материала, обусловленная сорбцией (поглощением) влаги, что в особенности критично при обработке углепластиков ввиду снижения их упругопрочностных свойств из-за пластикации и микрорастрескивания матрицы в приграничном слое;

5) значительное растрескивание и расслоение вследствие возникновения и распространения волн напряжения в области, окружающей начальную точку проникновения струи в заготовку, что затрудняет обработку по внутренним контурам, например: для формирования сквозных отверстий необходимо изготовление предварительного отверстия меньшего диаметра механическим или иным способом;

6) повышенный уровень шума.

Лазерная обработка ПКМ представляет собой бесконтактный термический процесс, результат которого зависит от технических параметров лазера, фокусирующей оптической системы, технологических свойств материала и метода обработки. При сопоставлении с рассмотренными способами лазерной обработки имеет ряд преимуществ:

1) отсутствие износа инструмента и потребности в его замене;

2) отсутствие механического воздействия на материал, а значит, необходимости в зажимной оснастке;

3) возможность обработки деталей сложной формы с высокой скоростью, точностью и воспроизводимостью;

4) возможность создания узких щелей, тонких стенок, малых радиусов, отверстий с малым диаметром под заданным наклоном к поверхности;

5) высокая производственная гибкость благодаря автоматическому управлению технологическим процессом;

6) высокая универсальность применения для обработки различных типов ПКМ;

7) высокая экономическая эффективность.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что лазерная обработка ПКМ является перспективным технологическим направлением в качестве альтернативы традиционным способам. Вместе с тем при обработке лазерным излучением возникает термодеструкция полимерного связующего, что приводит к нарушению прочности сцепления армирующего волокнистого наполнителя (АВН) с полимерной матрицей и, следовательно, к снижению эксплуатационных свойств материала, в первую очередь упругопрочностных. Наибольшие сложности возникают при лазерной обработке волокнистых ПКМ с высокой неоднородностью и анизотропией теплофизических свойств. В работе [16] показано, что углепластики с термореактивной матрицей характеризуются высокой температурой испарения углеродного волокна – $\approx 4\ 000$ К – при температуре устойчивости материала полимерной матрицы не более 500 К. С учетом высокой энергоемкости процесса разрушения в испарительном режиме и высокой теплопроводности углеродного волокна задача по качественной лазерной обработке углепластиков с минимальной ЗТВ является одной из наиболее сложных по сравнению с другими типами ПКМ. В связи с этим экспериментальные и теоретические исследования, направленные на разработку технологии качественной лазерной обработки волокнистых ПКМ, являются актуальными.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
κ	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
λ	Длина волны излучения, мкм
τ	Длительность импульса излучения, нс
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Спектральный коэффициент поглощения излучения, %
a	Коэффициент температуропроводности, м ² /с
D	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм
E	Энергия, Дж
F	Фокусное расстояние линзы, мм
f	Частота следования, Гц
h	Толщина образца, мм
L	Ширина/расстояние, мм
n	Количество проходов
P	Мощность лазера, Вт

Продолжение списка обозначений

R_a	Среднеарифметическое отклонение профиля, мкм
R_z	Высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм
T	Температура, К
u	Конусность, мкм
V	Скорость, м/с
W	Плотность мощности, Вт/см ²
Индексы нижние	
имп	Импульсный
исп	Испарения
н	Начальная
непр	Непрерывный
паузы	Паузы
Пор	Пороговая
резки	Резки
скан	Сканирования
ср	Средний
штрих	Параллельные треки-линии
Аббревиатуры	
АВН	Армирующий волокнистый наполнитель
ГАР	Гидроабразивное резание
ЗТВ	Зона термического влияния
ПКМ	Полимерные композиционные материалы

2. Теоретическая часть. Состояние и перспективы развития лазерной технологии по обработке ПКМ

Лазерная обработка армированных ПКМ – это сложный многофакторный технологический процесс, в котором значительное влияние на результат оказывают неоднородность и анизотропия теплофизических свойств и чувствительность материала к концентрации напряжений. Основными факторами и параметрами, определяющими режимы технологического процесса и влияющими на качество лазерной обработки, являются: характеристики лазера, параметры фокусирующей оптической системы, технологические свойства материала, тип технологического газа и скорость перемещения лазерного луча в поле обработки. Базовые основы технологического процесса лазерной обработки ПКМ впервые были заложены в известных работах А.Г. Григорьянца [15, 17, 18]. Согласно этим работам, при лазерной обработке в импульсно-периодическом и непрерывном режимах наиболее характерным и реализуемым на практике механизмом удаления материала является испарение, которое ввиду сложного химического строения неметаллических материалов характеризуется процессом термодеструкции за счет последовательного разложения отдельных составляющих (возгонки вещества). При этом достижение высокого качества с минимальной ЗТВ при обработке углепластиков с терморезактивной матрицей представляется наиболее сложной задачей по сравнению с другими типами ПКМ по следующим причинам:

1. Высокая температура испарения углеродных волокон и коксового остатка ($\approx 4\ 000\ K$), образующегося в результате термодеструкции полимерной матрицы, в совокупности с отводом тепла в опреде-

ленном направлении из-за анизотропии теплофизических свойств материала приводит к тому, что связующая полимерная матрица, стабильная только до температур $200 \div 300\ ^\circ C$, начинает разрушаться, и формируется ЗТВ с ее частичной и полной термодеструкцией.

2. Низкая трещиностойкость и остаточная прочность терморезактивных углепластиков при наличии дефектов и, как следствие, их большая чувствительность к концентрации напряжений и склонность к преждевременному разрушению.

Удаление продуктов эрозии (разрушения) из канала реза происходит в виде пароконденсатной фазы с околозвуковыми скоростями. Данный процесс вместе с формированием значительного температурного градиента приводит к возникновению волн давления и термомеханических напряжений, которые могут привести к растрескиванию материала [19, 20]. Ввиду того что механизмы поглощения излучения в металлах достаточно сложны и могут существенно отличаться в разных спектральных диапазонах, а также зависят от температуры, состояния и структуры материала, достаточно сложно рассчитать их коэффициенты отражения и поглощения. Так, по существующим данным, на длине волны излучения CO₂-лазера ($\lambda = 10,6\ \mu m$) полимерная матрица и основные виды армирующих волокнистых наполнителей характеризуются высокими коэффициентами поглощения излучения [17, 18, 21], поэтому установки на данном типе лазеров широко применяются для обработки ПКМ, в частности углепластиков. Армирующий углеродный наполнитель имеет высокий коэффициент поглощения не только в инфракрасной, но и в видимой и ультрафиолетовой областях спектра ($A \approx 0,8$). Связующая поли-



мерная матрица характеризуется низким поглощением в ближнем ИК-диапазоне и видимой области спектра ($A \approx 0,1$), а в ультрафиолетовой области спектра, напротив, имеет высокий коэффициент поглощения ($A = 0,8 \div 0,9$) [17, 22–24].

В отечественных и зарубежных работах [12, 15, 17, 18, 21, 25–29] на базе исследований по лазерной обработке ПКМ излучением импульсных и непрерывных лазеров инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра, проведенных различными коллективами авторов за последние годы, рассмотрены основные подходы к оценке качества детали. Основные показатели качества обработки определяются дефектами макро- и микрогеометрии канала лазерного реза: ЗТВ, конусность и шероховатость, расслоение, растрескивание.

На основе оценки ЗТВ вводят три класса качества деталей [26–28]:

1. Класс А – хорошее качество: длина АВН без полимерной матрицы (зона полной термодеструкции) $L_{зтв} \leq 50$ мкм, отсутствие видимого теплового повреждения материала матрицы (зоны с частичной термодеструкцией).

2. Класс Б – удовлетворительное качество: $50 \leq L_{зтв} \leq 150$ мкм, допускается видимое тепловое повреждение материала матрицы.

3. Класс С – неудовлетворительное качество: $L_{зтв} \geq 150$ мкм, значительное видимое тепловое повреждение материала матрицы.

Класс точности изготавливаемых деталей, в частности сквозных отверстий различного назначения, определяется конусностью (клиновидностью) канала реза, которая характеризуется максимальным отклонением от нормали его поверхности. Для каждой конкретной детали максимально возможное отклонение размеров определяется ее функциональным назначением и указывается в конструкторской документации. Для практического применения лазерной резки ПКМ в промышленности ее точность не должна уступать традиционным способам. Так, при обработке по сложным контурам гидроабразивная резка обеспечивает конусность канала реза не более 100 мкм [12, 15, 30–32]. При сверлении отверстий различного назначения, в том числе крепежных, в деталях из ПКМ экономически целесообразным считается выполнение обработки по качеству Н12, что соответствует классу точности «Точный» по ГОСТу 30893.1-2003. Шероховатость поверхности канала лазерного реза оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства детали и устанавливается исходя из ее функционального назначения. Степень шероховатости, согласно ГОСТу 2789-73, характеризуется следующими основными параметрами: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам. Экономически целесообразные значения шероховатости, соответствующие заданной точности изготовления, приведены в справочниках [33–35]. Например, при обработке отверстий с точностью по качеству Н12

рекомендуемая шероховатость поверхности не должна быть хуже $R_z = 40$ мкм. Все дефекты микро- и макрогеометрии канала реза, вносимые способом обработки, приводят к повышению концентрации напряжений и способствуют снижению упругопрочностных свойств материала. Поэтому при разработке технологий качественной лазерной обработки ПКМ крайне важным представляется проведение сравнительных механических испытаний конструктивно-подобных образцов, изготовленных различными способами обработки: механическим, гидроабразивным и лазерным.

В отечественных и зарубежных работах [15, 21, 36–52] основная часть исследований по разработке технологии лазерной обработки ПКМ носит комплексный или экспериментальный характер. Лазерная обработка используется для удаления материала при резке формованных заготовок по заданному контуру, для создания отверстий, пазов и других элементов. В качестве исследуемых ПКМ, как правило, выступают широко применяемые в современной промышленности угле- и стеклопластики толщиной от 1 мм до 3 мм. Основным методом лазерной обработки является газолазерная резка ПКМ в присутствии неактивных и инертных технологических газов. Схематичное изображение технологического процесса газолазерной резки показано на рис. 2 [17, 18].

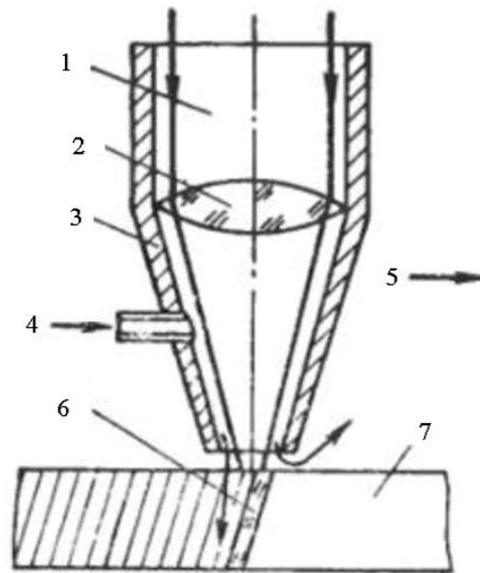


Рис. 2 – Схематичное изображение метода газолазерной резки ПКМ с использованием неактивных и инертных технологических газов: 1 – коллимированный лазерный луч; 2 – фокусирующая линза; 3 – формирующее сопло; 4 – технологический газ; 5 – направление резки; 6 – вынос продуктов разрушения газовой струей; 7 – образец
Fig. 2 – Schematic representation of the method of gas laser cutting polymer composites with inactive and inert process gases: 1 – collimated laser beam; 2 – focusing lens; 3 – nozzle; 4 – process gas; 5 – cutting direction; 6 – removal of destruction products by a gas jet; 7 – sample

Газолазерная резка производится на 3-х и 5-ти координатных технологических комплексах на основе

импульсных и непрерывных газовых и твердотельных лазеров в однопроводном режиме и характеризуется скоростью перемещения луча $1 \div 20$ м / мин. Несмотря на высокую точность и производительность такой метод лазерной резки ПКМ имеет ограничения в промышленности. В первую очередь это связано с необходимостью обеспечения высокого качества обработки, которое позволит рассматривать лазерную обработку как альтернативу механической и гидроабразивной. По представленным в указанных работах результатам лазерной обработки угле- и стеклопластиков основным недостатком такого метода является формирование канала реза с ЗТВ шириной от 1 мм до 8 мм, высокой конусностью – 200 мкм и более и шероховатостью $R_z \geq 160$ мкм. Кроме того, в области входа луча в рабочий канал реза формируется дефектный кратер диаметром до 10 мм, что ограничивает возможности по формированию сквозных отверстий меньшего и сопоставимого диаметра.

Для уменьшения ЗТВ в соответствии с требованиями классов А и Б целесообразно увеличение скорости обработки за счет повышения плотности мощности излучения в сфокусированном световом пятне. Решение данной задачи определяется параметрами ключевых компонентов технологической установки: лазера, фокусирующей оптической системы и механизма перемещения луча в рабочем поле. При выборе этих компонентов необходимо также учитывать особенности применения в промышленности, где важными аспектами являются высокая экономическая эффективность, ресурс, стабильность технических характеристик, повторяемость результатов и удобство интеграции.

Вследствие распространения в промышленности технологического оборудования на основе газовых CO₂-лазеров и высокого коэффициента поглощения полимерной матрицы и АВН на длине волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм, они широко применяются для обработки угле- и стеклопластиков. Однако средние показатели качества обработки, отсутствие возможности обеспечения плотности мощности в рабочем пятне излучения $\geq 10^9$ Вт / см² и передачи излучения с высоким КПД по оптическому волокну, а также высокие затраты на сервисное обслуживание по сравнению с современными твердотельными волоконными и дисковыми промышленными лазерами стали основными факторами, определившими необходимость поиска новых решений.

Современный этап развития технологии лазерной обработки ПКМ связан с разработкой эффективных импульсных и непрерывных лазерных источников инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазона и высокоскоростных гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой, обеспечивающих плоское рабочее поле размером до 500x500 мм² [53]. Схематичное изображение такого метода лазерной обработки ПКМ представлено на рис. 3 [53].

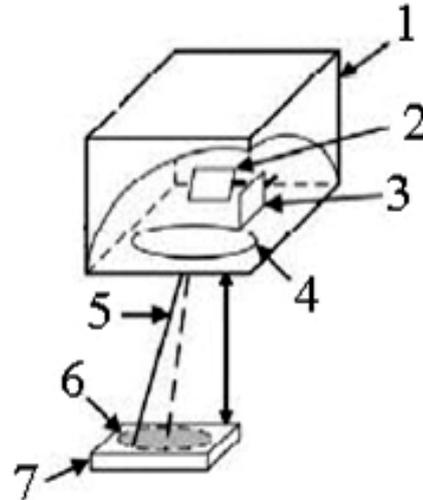


Рис. 3 – Схематичное изображение метода лазерной обработки ПКМ с использованием гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой: 1 – сканирующая оптическая система; 2 – зеркало оси X; 3 – зеркало оси Y; 4 – фокусирующая F-Theta линза; 5 – лазерный луч; 6 – рабочее поле; 7 – образец

Fig. 3 – Schematic depiction of the method of polymer composites laser processing using an optical scanning system based on galvanic drives with a focusing F-Theta lens: 1 – scanning optical system; 2 – mirror of the X axis; 3 – mirror of the Y axis; 4 – focusing F-Theta lens; 5 – laser beam; 6 – working field; 7 – sample

Промышленные пико- и наносекундные импульсные лазеры с частотой повторения импульсов в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц успешно применяются для прецизионной микрообработки широкого класса материалов. Средняя мощность излучения таких лазеров, как правило, не превышает нескольких десятков Вт, а импульсная достигает десятков кВт. Широкая номенклатура отечественных и зарубежных оптических сканирующих систем с F-Theta линзами позволяет обеспечить плотность мощности в сфокусированном световом пятне на уровне 10^9 Вт / см² и скорости перемещения луча в рабочем поле до 20 м / с. На основании данных, представленных в работах ряда зарубежных авторов [37–51], можно отметить некоторые особенности данного метода лазерной обработки ПКМ:

1. При рациональном выборе ключевых компонентов технологической установки и параметров режима обработки обеспечивается ЗТВ в соответствии с классом А – ≤ 50 мкм.

2. Для повышения эффективности выноса продуктов эрозии из канала реза рациональным направлением является послыное удаление материала за несколько проходов по нескольким параллельным трекам-линиям.

Наряду с импульсными лазерами перспективным направлением представляется применение непрерывных твердотельных лазеров с мощностью излучения 1 кВт и более. В настоящее время благодаря

высоким технико-эксплуатационным свойствам наибольшее распространение получили дисковые и волоконные лазеры. Существенные отличия параметров непрерывного излучения по сравнению с импульсным обуславливают необходимость применения специальных оптических сканирующих систем с увеличенной входной апертурой зеркал и фокусирующей F-Theta линзой и нанесение специальных отражающих и просветляющих покрытий со стабильными характеристиками при уровне мощности излучения 1 кВт и более. Только в последние годы ведущие мировые производители лазерного технологического оборудования, такие как TRUMPF (Германия) и AMADA MIYACHI (США), разработали подобные установки на основе высокомошных дисковых и волоконных лазеров. Среди оборудования отечественного производства следует отметить импульсные и непрерывные волоконные итербиевые лазеры с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм. Этот класс лазеров обладает уникальной совокупностью технико-эксплуатационных свойств: КПД более 50 %, высокие плотность мощности излучения и стабильность выходных параметров, отсутствие расходных материалов и необходимости в сервисном обслуживании, ресурс работы до 100 000 часов, удобство волоконной доставки излучения и компактные размеры [54]. Проведенный анализ показал, что применение импульсных и непрерывных волоконных итербиевых лазеров, обладающих высокими технико-эксплуатационными свойствами, и современных оптических сканирующих систем позволяет достигать высоких плотностей мощности в сфокусированном световом пятне и скоростей обработки. Следовательно, эти лазеры являются рациональным выбором в качестве базовых компонентов для внедрения методов лазерной обработки ПКМ в промышленности как альтернативы механической и гидроабразивной обработке.

3. Экспериментальное оборудование для обработки ПКМ излучением волоконных итербиевых лазеров

Выбор ключевых компонентов технологической установки для обработки ПКМ обусловлен необходимостью обеспечения высокой плотности мощности в сфокусированном световом пятне и высокоскоростного перемещения луча в рабочем поле. Так, для удаления углепластика излучением импульсных и непрерывных лазеров за счет механизма испарения требуется, чтобы плотность мощности в сфокусированном световом пятне превышала пороговые значе-

ния, рассчитанные по известным формулам (1) и (2) [55, 56]:

$$W_{\text{пор.имп.}} = \frac{(T_{\text{исп}} - T_{\text{н}}) \kappa \sqrt{\pi}}{2A \sqrt{a \tau}} \approx 10^8 \text{ (Вт/см}^2\text{)}, \quad (1)$$

$$W_{\text{пор.непр.}} = \frac{(T_{\text{исп}} - T_{\text{н}}) \kappa}{A \frac{D}{2}} \approx 10^6 \text{ (Вт/см}^2\text{)}, \quad (2)$$

где $T_{\text{н}} = 293$ К – начальная температура материала; $T_{\text{исп}} = 4\,000$ К – температура испарения углеродного волокна; $\kappa = 50$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности; $A = 0,8$ – коэффициент поглощения излучения; $a = 4 \cdot 10^{-5}$ м²/с – коэффициент температуропроводности; $\tau = 1$ нс – длительность импульса излучения; $D = 100$ мкм – типовой диаметр сфокусированного светового пятна. Расчеты показали, что при использовании наносекундных импульсных лазеров уровень пороговой плотности мощности составляет 10^8 Вт/см², а для непрерывных лазеров при типовом диаметре сфокусированного светового пятна на уровне 100 мкм – 10^6 Вт/см². Для достижения высоких качества и производительности лазерной обработки ПКМ необходимо соблюсти и ряд дополнительных условий: локальность области воздействия (нагрева); длину перетяжки (глубину фокуса), сопоставимую с толщиной образца; высокую скорость перемещения луча в рабочем поле. Выполнение этих условий требует поиска компромиссного решения, основанного на анализе технических параметров ключевых компонентов технологической установки: лазеров, оптических сканирующих систем, фокусирующих F-Theta линз, – и учета особенностей практического применения в производственных условиях. Рациональным решением представляется использование следующих серийно выпускаемых компонентов:

- 1) волоконный итербиевый лазер YLPP-1-150-30-M с $\lambda = 1,06$ мкм с наносекундной длительностью импульсов и $P_{\text{ср}} = 30$ Вт;
- 2) волоконный итербиевый лазер ЛК-1000-ОМ с $\lambda = 1,06$ мкм, непрерывный с мощностью $P = 1$ кВт;
- 3) двухосевые гальваносканеры с входной апертурой 10 мм и 12 мм;
- 4) F-Theta линзы с фокусным расстоянием $F = 254$ мм и 330 мм.

Основные компоненты лазерной технологической установки на базе волоконного итербиевого лазера для обработки ПКМ представлены на рис. 4.



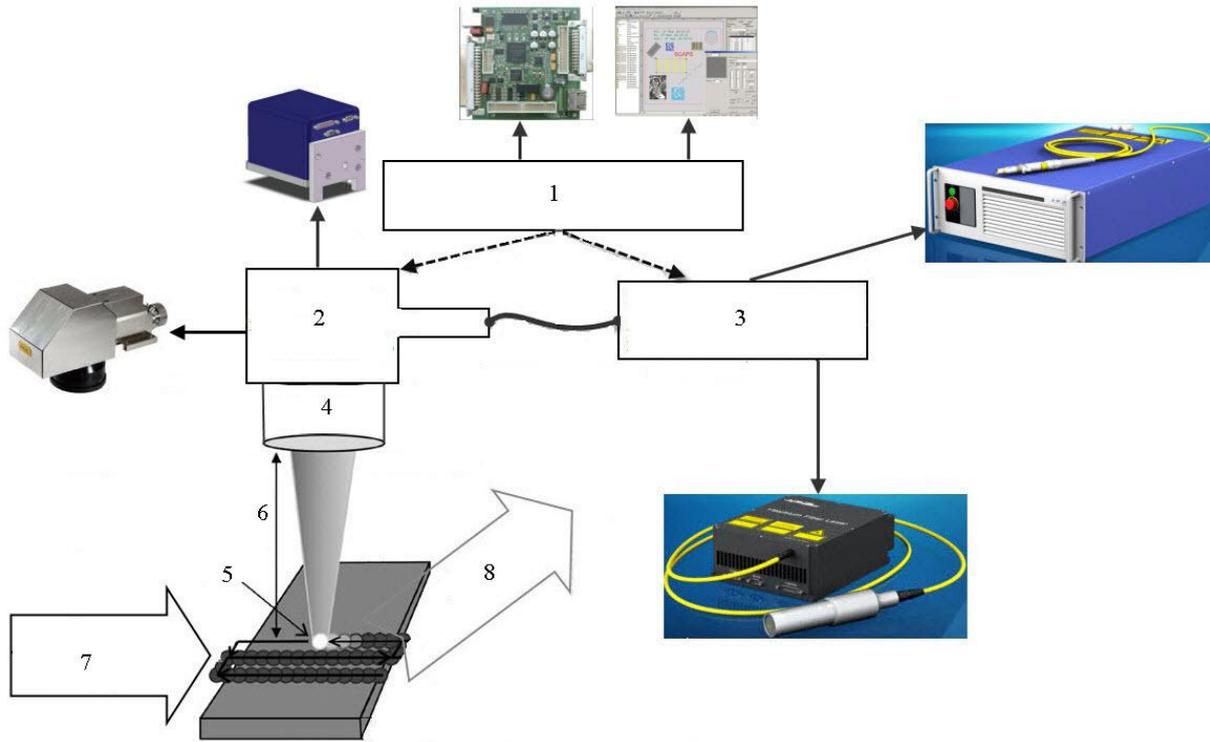


Рис. 4 – Основные компоненты лазерной технологической установки для обработки ПКМ: 1 – управляющий контроллер; 2 – двухосевой гальваносканер; 3 – импульсный или непрерывный волоконный иттербиевый лазер; 4 – фокусирующая F-Theta линза; 5 – сфокусированное световое пятно; 6 – фокусное расстояние; 7 – подача технологического газа; 8 – фильтровентиляционная система

Fig. 4 – The main components of the experimental laser processing technological setup for polymer composites machining: 1 – main controller; 2 – two-axis galvo scanner; 3 – pulsed or continuous ytterbium fiber laser; 4 – focusing F-Theta lens; 5 – focused light spot; 6 – focal length; 7 – supply of process gas; 8 – filtration system

Результаты расчета основных параметров сфокусированного обрабатывающего светового пятна по известным формулам [55, 56] для типовых исполне-

ний экспериментальной технологической установки представлены в табл. 1.

Таблица 1
Основные параметры сфокусированного обрабатывающего светового пятна типовых исполнений технологической установки

Table 1
The main parameters of the focused processing light spot of the technological setup typical versions

Тип лазера	Фокусное расстояние F-Theta линзы, мм	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм	Глубина фокуса, мм	Импульсная мощность кВт	Плотность мощности излучения, Вт/см ²
YLPP-1-150-30-M	330	100	14	200 (30 Вт, 30 кГц, 5 нс)	$2 \cdot 10^9$
ЛК-1000-ОМ	254	70	7,5	–	$2,5 \cdot 10^7$

Исследования показателей качества обработки проводились с использованием современного метрологического оборудования. ЗТВ на поверхности образца со стороны входа и выхода луча, дефекты внутренней структуры на микрошлифе поперечного сечения и ширина канала лазерного реза оценивались при помощи оптического микроскопа с увеличением $5 \div 1\,000$ крат. Конусность и шероховатость канала лазерного реза измерялись на контактных

контурографе и профилометре. Дефекты внутренней структуры на поверхности канала лазерного реза, такие как: расслоение, растрескивание и области с термодеструкцией материала полимерной матрицы – исследовались с применением электронных сканирующих микроскопов с разрешением до 1 нм, непрерывным увеличением от 2 крат до 2 000 000 крат и ускоряющим напряжением до 30 кВ.

4. Структура и технологические свойства ПКМ

В современной промышленности широкое применение находят тонколистовые ПКМ, в частности, углепластики толщиной от 1 мм до 3 мм, изготов-

ленные методами прямого прессования, вакуумного и автоклавного формования. В табл. 2 представлены основные технологические свойства распространенных отечественных и зарубежных марок углепластиков.

Таблица 2
Технологические свойства отечественных и зарубежных марок углепластиков
Table 2
Technological properties of domestic and foreign brands of CFRP

Марка ПКМ	Схема укладки слоев (армирования)	Массовое содержание АВН, %	Толщина слоя, мм
M21/35%/T700 (однонаправленный препрег)	Продольно-поперечная (ортотропная), комбинированная	65	0,13
ВКУ (однонаправленный препрег)			
5320-1/T650/3K (тканый препрег)	Однонаправленная	67	0,2

В качестве армирующего волокнистого наполнителя в указанных углепластиках применяется углеродное волокно на основе полиакрилонитрила с объемным содержанием углерода 92 % и температурой тепловой обработки $\approx 2\ 000\ ^\circ\text{C}$, а связующая полимерная матрица является реактопластом на основе эпоксидных смол. Типовые теплофизические и оптические параметры таких материалов представлены в работах [16, 21, 57–63].

5. Результаты экспериментальных исследований по лазерной резке углепластиков

В работах [64–71] по лазерной резке и сверлению углепластиков исследования проводились на экспериментальной технологической установке с помощью импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров и высокоскоростных оптических сканирующих систем с фокусирующей F-Theta линзой и скоростью перемещения луча до 17 м/с. Обработка проводилась с применением лазеров моделей YLPP-1-150-30-M с $P_{\text{ср}} = 30\ \text{Вт}$ и плотностью импульсной мощности в сфокусированном световом пятне излучения диаметром 100 мкм – $2 \cdot 10^9\ \text{Вт/см}^2$ и ЛК-1000-OM с $P = 1\ \text{кВт}$, $D = 70\ \text{мкм}$, $W = 2,5 \cdot 10^9\ \text{Вт/см}^2$ (см. рис. 8 и табл. 1) и алгоритма многопроходной обработки по нескольким параллельным трекам-линиям, который увеличивает ширину канала реза и способствует достижению высокого качества. Схематично применяемый алгоритм многопроходной обработки представлен на рис. 5 [70].

Лазерная резка образцов излучением импульсного лазера модели YLPP-1-150-30-M проводилась путем послойного удаления материала с перемещением луча в соответствии с алгоритмом на рис. 5 и максимальной средней мощностью излучения $P_{\text{ср}} = 30\ \text{Вт}$ в многопроходном режиме без пауз между последова-

тельными проходами и в среде воздуха (без подачи технологического газа).

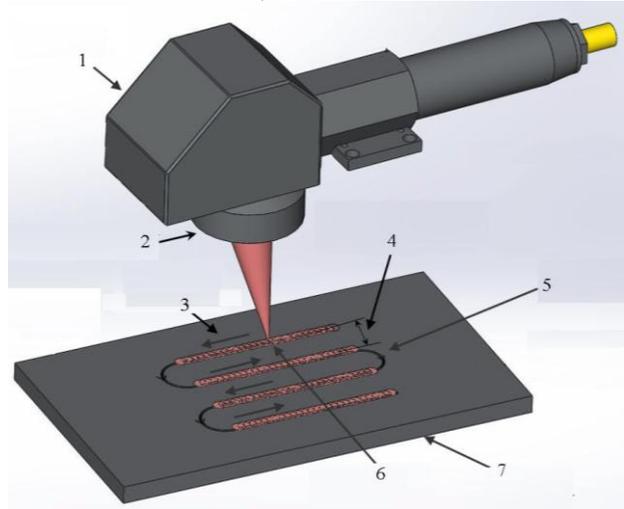


Рис. 5 – Алгоритм лазерной многопроходной обработки углепластика по нескольким параллельным трекам-линиям: 1 – гальваносканер; 2 – фокусирующая F-Theta линза; 3 – трек перемещения лазерного луча; 4 – расстояние между параллельными треками; 5 – переходы без излучения; 6 – сфокусированное световое пятно; 7 – образец

Fig. 5 – Algorithm of laser multi-pass processing of CFRP on several parallel tracks-lines: 1 – galvo scanner; 2 – focusing F-Theta lens; 3 – track of moving the laser beam; 4 – the distance between the parallel tracks; 5 – transitions without laser radiation; 6 – focused light spot; 7 – sample

Положение плоскости фокусировки излучения устанавливалось на поверхности образца со стороны входа луча и не смещалось в процессе обработки. В результате большого объема экспериментов были определены оптимальные технологические параметры: $V_{\text{скан}} = 1\ \text{м/с}$; $\tau_{\text{имп}} = 5\ \text{нс}$; $f_{\text{имп}} = 30\ \text{кГц}$; $E_{\text{имп}} = 1\ \text{мДж}$; $L_{\text{штрих}} = 50\ \text{мкм}$; $N = 5$; $n = 200$. Результаты многопроходной обработки при таких технологических параметрах представлены на рис. 6 [64, 67].

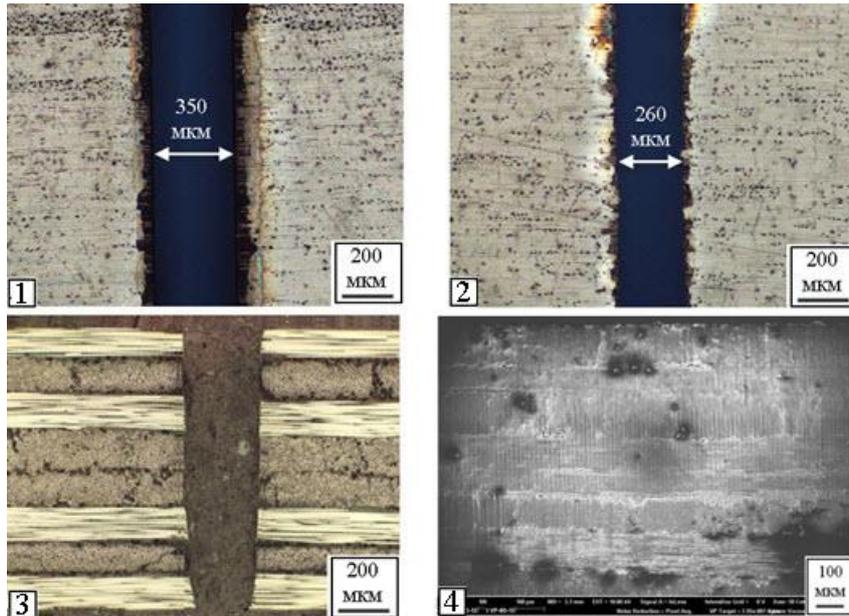


Рис. 6 – Изображения поверхности образцов из углепластика толщиной 1 мм: 1 – со стороны входа и 2 – выхода луча; 3 – в поперечном сечении канала реза; 4 – поверхности канала реза на электронном микроскопе при обработке излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M ($V_{\text{скан}} = 1$ м/с; $T_{\text{имп}} = 5$ нс; $f_{\text{имп}} = 30$ кГц; $E_{\text{имп}} = 1$ мДж; $L_{\text{штрих}} = 50$ мкм; $N = 5$; $n = 200$)
Fig. 6 – Images of the surface of CFRP samples with a thickness of 1 mm: 1 – from the entrance and 2 – the exit of the beam; 3 – in the cross section of the cut channel; 4 – the surface of the cut channel on an electron microscope when laser radiation is processed by the YLPP-1-150-30-M model ($V_{\text{скан}} = 1$ m/s; $T_{\text{имп}} = 5$ ns; $f_{\text{имп}} = 30$ kHz; $E_{\text{имп}} = 1$ mJ; $L_{\text{штрих}} = 50$ μm ; $N = 5$, $n = 200$)

Оптимальные технологические параметры режима обработки, указанные на рис. 6, обеспечивают полный канал реза за $n = 200$ проходов с высоким качеством детали: ЗТВ соответствует классу А; конусность $u < 50$ мкм; шероховатость $R_z \approx 25$ мкм. При этом в поперечном сечении и на поверхности канала реза такие дефекты, как расслоение, растрескивание и термодеструкция материала матрицы отсутствуют. Скорость резки, рассчитываемая по формуле (3), составила:

$$V_{\text{резки}} = \frac{V_{\text{скан}}}{Nn} = 60 \text{ (мм/мин)} \quad (3)$$

Для качественной обработки углепластиков толщиной более 1 мм в [64–71] были разработаны новые методы многопроходной лазерной резки с количественной и пространственной регулировкой вводимой лазером энергии путем изменения скорости перемещения луча ($V_{\text{скан}}$) и количества параллельных треков-линий (N). Результаты, полученные с помощью разработанных методов, показаны на примере обработки углепластика марки М21/35%/Г700 с ортотропной схемой армирования, изготовленного методом прямого прессования, толщиной 2 мм при оптимальных технологических параметрах: $\tau_{\text{имп}} = 5$ нс; $f_{\text{имп}} = 30$ кГц; $E_{\text{имп}} = 1$ мДж; $L_{\text{штрих}} = 50$ мкм; $n = 400$; снижение $V_{\text{скан}}$ от 1 до 0,5 м/с и N от 8 до 5 через каждые 100 проходов (рис. 7) [67, 70].

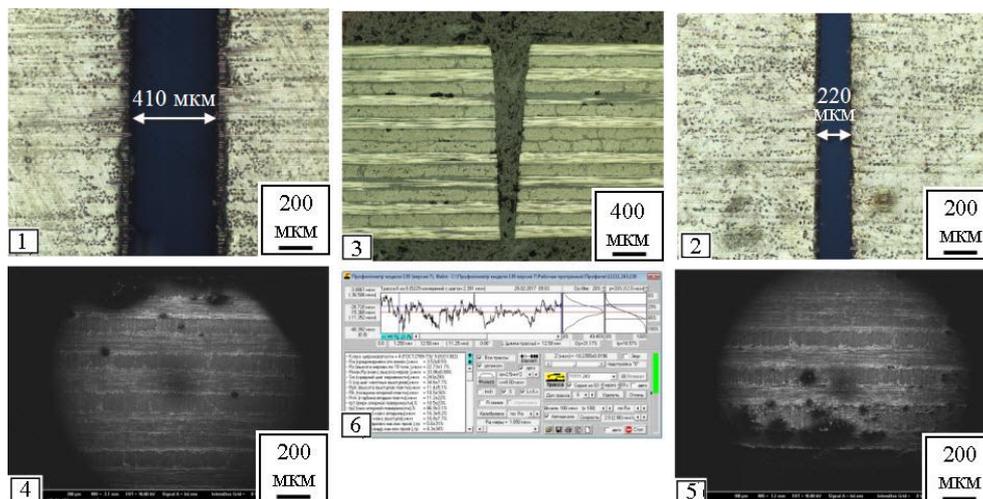


Рис. 7 – Результаты обработки углепластика толщиной 2 мм излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M: 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 и 5 – поверхность канала реза на электронном микроскопе; результаты измерений: 6 – шероховатости и 7 – контура канала реза
Fig. 7 – The results of CFRP processing with a thickness of 2 mm by YLPP-1-150-30-M laser radiation: 1 and 2 – images of the sample surface from the entrance and the exit of the beam; 3 – micro sections of the cross-section of the cut channel; 4 and 5 – the surface of the cut channel on an electron microscope; measurement results: 6 – roughness and 7 – cutting channel contour



Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм этим же лазером при оптимальных технологических параметрах: $\tau_{\text{имп}} = 5$ нс; $f_{\text{имп}} = 30$ кГц; $E_{\text{имп}} = 1$ мДж;

$L_{\text{штрих}} = 50$ мкм; $n = 600$; $N = 5$; снижение $V_{\text{скан}}$ от 1 м/с до 0,5 м/с через каждые 100 проходов – показаны на рис. 8 [67, 70].

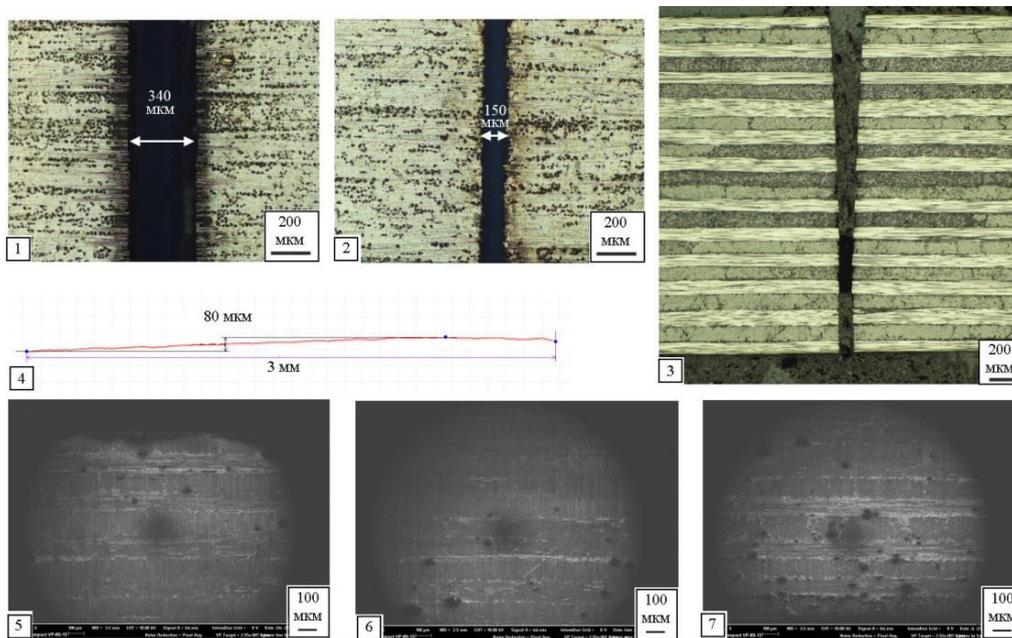


Рис. 8 – Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M: 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 – контур канала реза; 5, 6 и 7 – изображения поверхности канала реза на электронном микроскопе

Fig. 8 – The results of CFRP processing a thickness of 3 mm by YLPP-1-150-30-M laser radiation: 1 and 2 – images of the sample surface from the entrance and the exit of the beam; 3 – micro sections of the cross-section of the cut channel; 4 – the contour of the cut channel; 5, 6, and 7 – images of the surface of the cut channel on an electron microscope

Представленные на рис. 7 и 8 данные свидетельствуют о том, что предложенные авторами методы многопроходной обработки углепластиков толщиной 2 мм и 3 мм излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера позволяют обеспечить высокое качество детали: ЗТВ соответствует классу А; конусность $u \leq 100$ мкм; шероховатость $R_z \leq 40$ мкм; такие дефекты, как расслоение и растрескивание отсутствуют; скорость резки $V_{\text{резки}}$ до 30 мм/мин при толщине 2 мм и до 20 мм/мин при 3 мм. В результате проведенных исследований установлено, что наносекундные импульсные лазеры обеспечивают высокое качество детали из тонколистовых углепластиков, однако, скорость резки не превышает 60 мм/мин, что на порядок ниже, чем при механической и гидроабразивной обработке. Это ставит задачу увеличения скорости лазерной обработки с сохранением качества детали, для решения которой целесообразно применение непрерывных лазеров с мощностью излучения ≥ 1 кВт.

Лазерная резка образцов излучением непрерывного лазера модели ЛК-1000-ОМ в работах [64–71] проводилась по прямой линии с максимальной средней мощностью излучения $P = 1$ кВт в многопроходном режиме с паузами между последовательными проходами и подачей в зону обработки сжатого воздуха с давлением 8 атм для охлаждения заготовки с

целью уменьшения ЗТВ вследствие эффекта накопления тепла в материале. Положение плоскости фокусировки излучения устанавливалось на поверхности и в середине образца со стороны входа луча и не смещалось в процессе обработки. В результате большого объема экспериментов были определены оптимальные технологические параметры: $N = 2$; $L_{\text{штрих}} = 200$ мкм; $n = 30$; $T_{\text{паузы}} = 0,5$ с; $V_{\text{скан}}$ изменяется от 1 м/с до 0,5 м/с на 250 мм/с через каждые 10 проходов. Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм при таких технологических параметрах показаны на рис. 9 [71].

Данные, представленные на рис. 9, свидетельствуют о том, что многопроходная обработка углепластика толщиной 3 мм излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера при оптимальных технологических параметрах обеспечивает высокое качество детали, сопоставимое с результатами обработки излучением импульсных лазеров, а именно: ЗТВ характеризуется термоследом на поверхности материала шириной менее 150 мкм, что соответствует промежуточному положению между классами А и Б; конусность канала не превышает 100 мкм; шероховатость $R_z \approx 40$ мкм; такие дефекты, как расслоение и растрескивание отсутствуют.

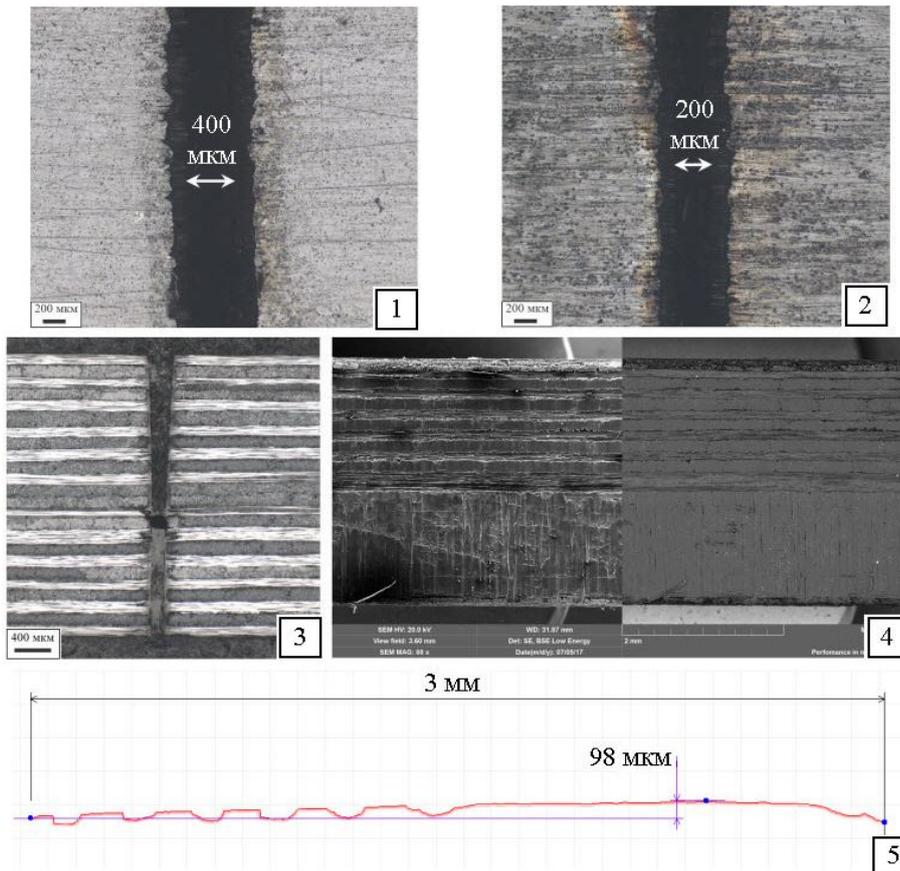


Рис. 9 – Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели ЛК-1000-ОМ:
 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 – поверхности канала реза на электронном микроскопе; 5 – контур поверхности канала реза

Максимально достижимая скорость резки углепластика толщиной 3 мм, рассчитываемая по формуле (3), составляет 1 м/мин, что на два порядка превосходит результаты импульсных лазеров.

6. Результаты экспериментальных исследований по лазерному сверлению углепластиков

Одной из наиболее часто встречающихся и в то же время наиболее трудоемких операций при обработке ПКМ является операция сверления. Трудоемкость сверлильных операций на некоторых изделиях достигает 80 % от общей трудоемкости процесса обработки, поэтому задачи по формированию качественных сквозных отверстий различного назначения в деталях из углепластиков представляют большой практический интерес. На основании результатов исследований по резке углепластиков толщиной 1 ÷ 3 мм излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров были определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество детали: ЗТВ в соответствии с классом А и Б; конусность менее 100 мкм; шероховатость $R_z \leq 40$ мкм при скоростях резки до 3 м/мин. Применяемый для обработки по прямой линии алгоритм (см. рис. 5) был модифицирован в соответствии с поставленной задачей. Так, при формировании отверстий послойное удаление материала в каждом проходе осуществлялось по нескольким

концентрическим трекам-окружностям или трекам-спиралям. Пример такого алгоритма схематично представлен на рис. 10 [66, 69].

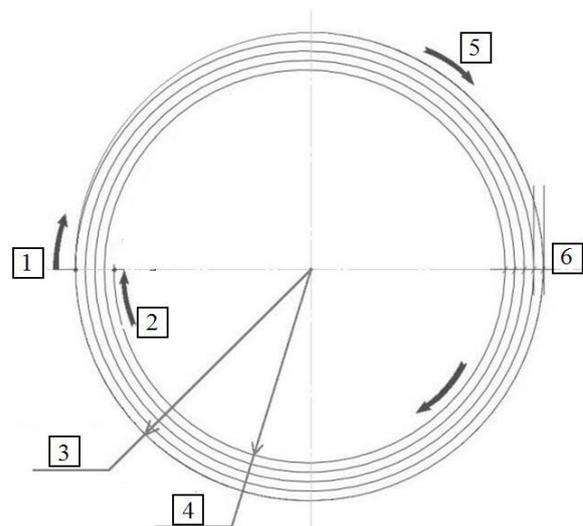


Рис. 10 – Алгоритм лазерной многопроходной обработки углепластика по треку в форме спирали: 1 – старт обхода; 2 – завершение обхода; 3 – внешний радиус; 4 – внутренний радиус; 5 – направление развертки спирали; 6 – шаг спирали

Fig. 10 – Algorithm of laser multi-pass CFRP processing on the track in the form of a spiral:
 1 – pass start; 2 – pass finish; 3 – outer radius; 4 – inner radius; 5 – spiral scan direction; 6 – helical pitch



В ходе экспериментов было установлено, что выполнение прохода с разверткой луча по спирали предпочтительнее по сравнению с алгоритмом обработки по нескольким концентрическим окружностям, поскольку позволяет минимизировать дефекты формирования канала реза в точке старта обхода вследствие погрешностей синхронизации включения и выключения излучения лазера с перемещением

зеркал оптической сканирующей системы. На экспериментальной технологической установке с применением разработанных алгоритмов лазерного сверления отверстий при оптимальных технологических параметрах были получены сквозные отверстия диаметром от 2 мм до 16 мм в образцах из углепластика толщиной от 1 мм до 3 мм. Результаты представлены на рис. 11–14.

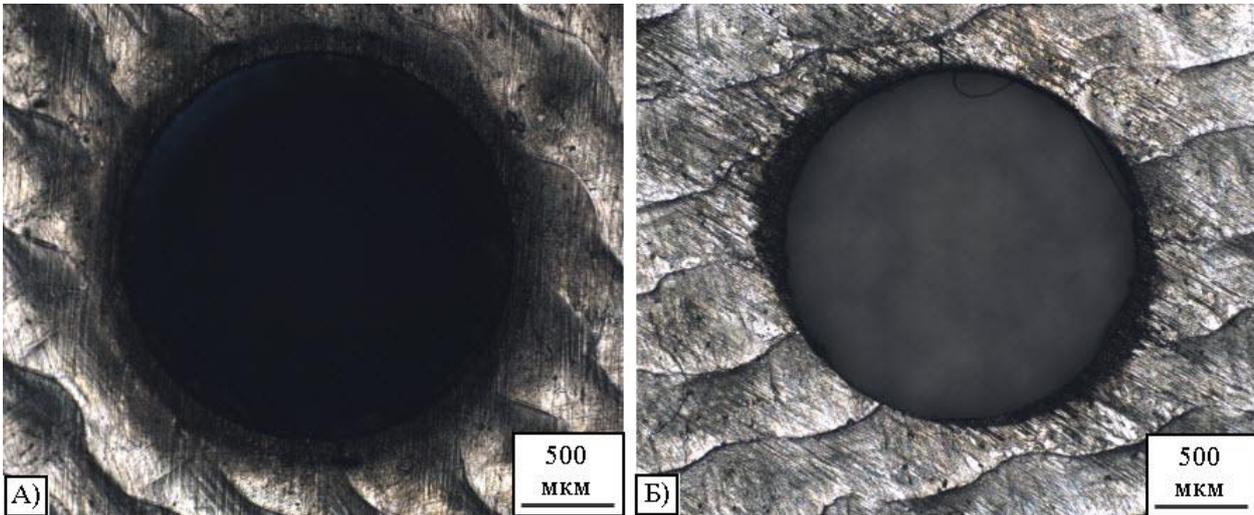


Рис. 11 – Изображение поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 2 мм из углепластика толщиной 1,5 мм со стороны входа (А) и выхода луча (Б) при обработке излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера модели YLPP-1-150-30-M

Fig. 11 – The image CFRP sample surface with 1.5 mm thickness and through hole 2 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the YLPP-1-150-30-M pulsed ytterbium fiber laser is processed

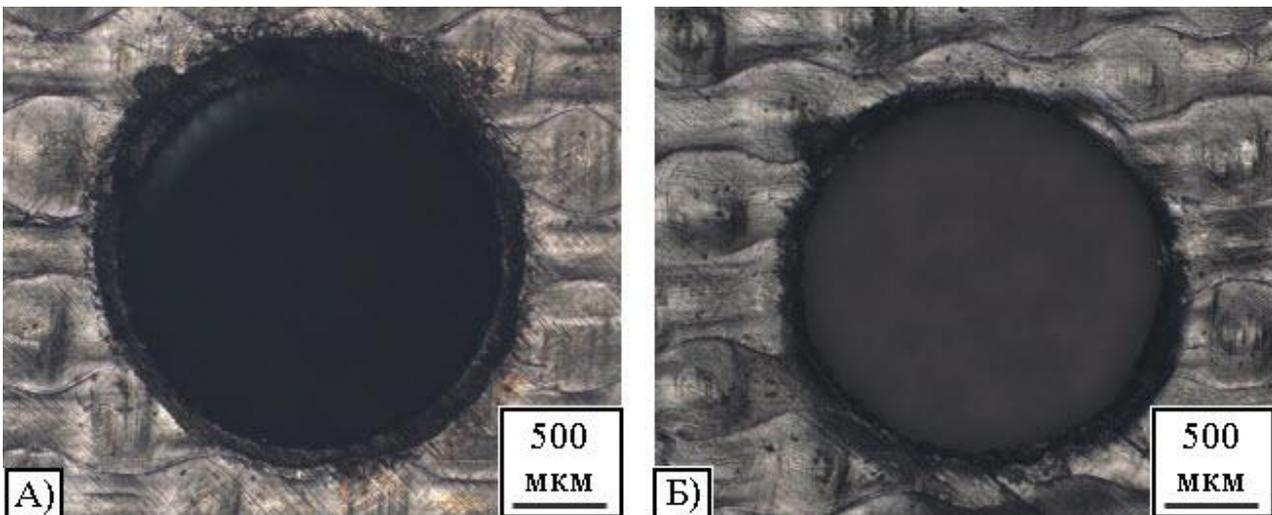


Рис. 12 – Изображение поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 2 мм из углепластика толщиной 1,5 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера модели ЛК-1000-ОМ

Fig. 12 – The image CFRP sample surface with 1.5 mm thickness and through hole 2 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the LK-1000-OM CW ytterbium fiber laser is processed

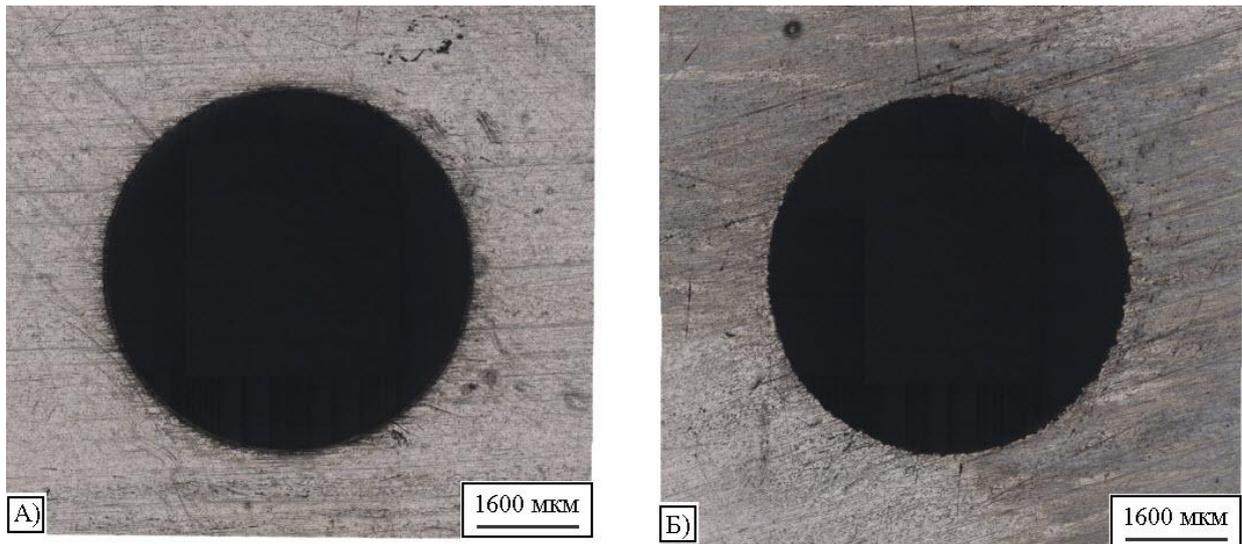


Рис. 13 – Изображения поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 6 мм из углепластика толщиной 3 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера модели YLPP-1-150-30-M

Fig. 13 – The image CFRP sample surface with 3 mm thickness and through hole 6 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the YLPP-1-150-30-M pulsed ytterbium fiber laser is processed

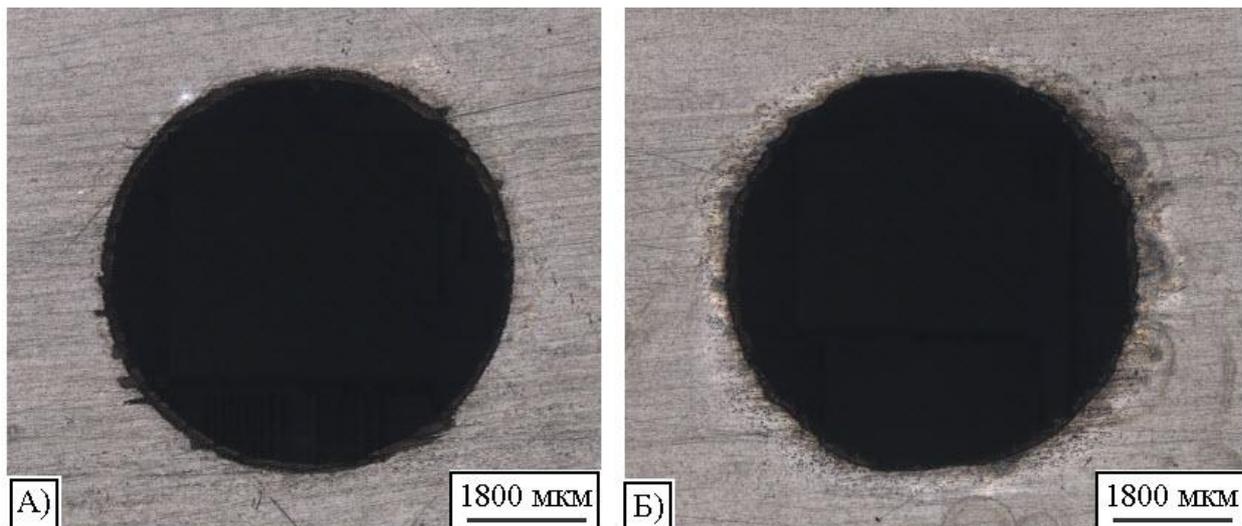


Рис. 14 – Изображения поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 6 мм из углепластика толщиной 3 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера модели ЛК-1000-ОМ

Fig. 14 – The image CFRP sample surface with 3 mm thickness and through hole 6 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the LK-1000-OM CW ytterbium fiber laser is processed

Точность выполнения отверстий контролировалась с помощью гладких калибров производства ЗАО ТД «ИТО-ТУЛМАШ». В табл. 3 приведены основные результаты по лазерному сверлению сквозных отверстий излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров в углепластиках толщиной 1 ÷ 3 мм.

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о возможности лазерного сверления качественных сквозных отверстий излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров в

углепластиках толщиной до 3 мм с высокой производительностью. Непрерывный волоконный иттербиевый лазер модели ЛК-1000-ОМ обеспечивает до 5 раз более высокую производительность по сравнению с импульсным лазером при обработке образцов толщиной 2 мм и более с сохранением высокого качества. Существенно повысить производительность лазерного сверления возможно при обработке массива отверстий за счет оптимизации алгоритма обработки с минимизацией длительности пауз и повышением коэффициента использования лазера.

Таблица 3

Качество и производительность лазерного сверления сквозных отверстий в углепластике толщиной 1–3 мм

Table 3

Quality and productivity of laser drilling through holes in CFRP with 1–3 mm thickness

Толщина образца, мм	Модель лазера	Диаметр отверстия, мм	ЗТВ	Точность (калитет)	Время цикла обработки отверстия, с
1	YLPM-1-4x200-20-20	6	Класс А	H11/H12	12
		8		H11	15
		16			30
1.5	YLPP-1-150-30-M	2	Класс А	H12	10
	ЛК-1000-ОМ		Класс Б		10
2	YLPP-1-150-30-M	6	Класс А	H11/H12	140
		8			150
		16			180
	ЛК-1000-ОМ	Класс Б	6	H11/H12	30
			8	55	
			16	60	
3	YLPP-1-150-30-M	6	Класс А	H11/H12	350
		8			360
		16			400
	ЛК-1000-ОМ	Класс Б	6	H11/H12	45
			8	85	
			16	90	

Известно, что углепластики характеризуются наибольшей среди ПКМ чувствительностью к концентрации напряжений [2], а распространенным типом концентраторов напряжений являются сквозные отверстия, выполняемые механической, гидроабразивной и лазерной обработкой. В связи с этим были проведены механические испытания на прочность при растяжении образцов со сквозным отверстием толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм из углепластика марки M21/35%/T700 с ортотропной схемой армирования, формованного методом прямого прессования, в соответствии со стандартом ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766). Механическая обработка была проведена на специализированном обрабатывающем центре сверлами с алмазным покрытием серии Sandvik CoroDrill 854, гидроабразивная резка осуществлялась на установке фирмы RESATOR серии АСМ, а лазерная обработка проводилась импульсным и непрерывным волоконными итербиевыми лазерами моделей YLPP-1-150-30-M и ЛК-1000-ОМ. Каждым способом обработки было изготовлено по 5 конструктивно-подобных образцов из исследуемого углепластика с диаметром сквозных отверстий 6 мм, 8 мм и 16 мм. Испытания проводились на разрывной машине Tinius Olsen H1000KU при скорости движения траверсы 5 мм/мин.

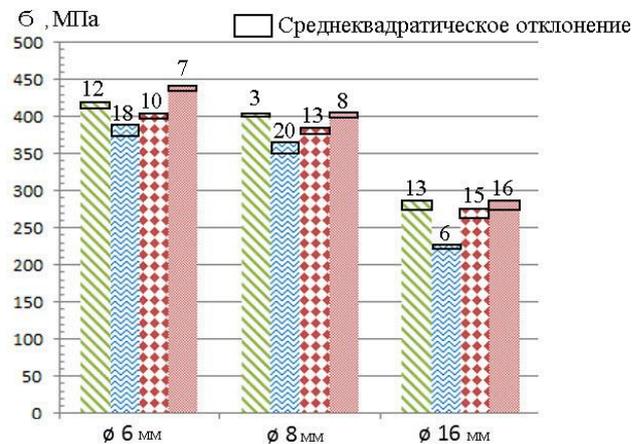


Рис. 15 – Диаграммы механических испытаний образцов из углепластика толщиной 3 мм при: механической (//), гидроабразивной (~~~~) и лазерной обработке (••••• – импульсный лазер модели YLPP-1-150-30-M и ■■■■■ – непрерывный лазер модели ЛК-1000-ОМ)

Fig. 15 –Diagrams of mechanical testing of samples made of carbon fiber reinforced plastic with a thickness of 3 mm with: mechanical (//), waterjet (~~~~) and laser processing (••••• –YLPP-1-150-30-M pulsed laser и ■■■■■ –ЛК-1000-ОМ continuous-wave laser)

Результаты испытаний, показали, что обработка углепластиков излучением импульсного и непрерывного волоконного иттербиевого лазера обеспечивает результат, по прочности сопоставимый с механической обработкой алмазным инструментом и до 15 % выше, чем гидроабразивная резка (рис. 15). Данные результаты были представлены в работах [66, 69].

7. Заключение

Конструкционные ПКМ (угле- и стеклопластики) находят все более широкое применение в ключевых отраслях современной промышленности, что ставит задачу их эффективной обработки. Лазерная обработка ПКМ является альтернативой традиционным способам – механической обработке режущим инструментом и гидроабразивной резке. Основными показателями качества детали служат дефекты макрогеометрии (ЗТВ, конусность) и микрогеометрии (шероховатость, расслоение, растрескивание) канала лазерного реза. Качественная и производительная лазерная обработка ПКМ является сложной технологической задачей вследствие высоких неоднородности и анизотропии теплофизических свойств и чувствительности материала к концентрации напряжений, вызванных дефектами обработки.

Для практического применения в промышленности лазерной резки ПКМ необходимо обеспечить следующее качество обработки: ЗТВ < 150 мкм; конусность $u < 100$ мкм; шероховатость $R_z \leq 40$ мкм; отсутствие таких дефектов, как расслоение и растрескивание; скорость резки ≥ 100 мм/мин.

Традиционный метод однопроходной газолазерной резки с использованием неактивных и инертных технологических газов характеризуется высокими точностью и производительностью, но применительно к ПКМ имеет существенный недостаток – ЗТВ ≥ 1 мм, что неприемлемо для практического внедрения.

На современном этапе развития технологии к перспективным методам лазерной обработки ПКМ относятся многопроходная резка и сверление с помощью промышленных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров и высокоскоростных гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой. Такое оборудование обеспечивает плотность мощности излучения в сфокусированном световом пятне до 10^9 Вт/см² и скорость перемещения луча до 20 м/с с точностью позиционирования до ± 5 мкм, что позволяет осуществлять послойное удаление материала в испарительном режиме за несколько проходов по внутренним и внешним контурам любой сложности с высокими качеством, точностью, производительностью и минимальными затратами.

Экспериментальные исследования по многопроходной лазерной резке и сверлению конструкционных углепластиков толщиной 1 ÷ 3 мм, проведенные на экспериментальной технологической установке на базе серийных наносекундных импульсных и непре-

рывных волоконных иттербиевых лазеров с длиной волны 1,06 мкм и мощностью излучения до 1 кВт, показывают, что при оптимальных технологических параметрах режима обработки достигается требуемое (максимальное) качество: ЗТВ < 150 мкм; конусность $u < 100$ мкм; шероховатость $R_z \leq 40$ мкм; отсутствие таких дефектов, как расслоение и растрескивание. Скорость резки составляет 20 ÷ 60 мм/мин при обработке импульсным излучением и 1 ÷ 3 м/мин при непрерывном. Лазерное сверление сквозных отверстий диаметром от 2 мм до 16 мм в углепластиках толщиной 1 ÷ 3 мм характеризуется высокой точностью (допуск на диаметр в соответствии с качествами Н11 и Н12), качеством: ЗТВ < 150 мкм; шероховатость $R_z \leq 40$ мкм; расслоение и растрескивание отсутствуют, – и производительностью, сопоставимой с традиционными способами обработки.

Сравнительные механические испытания образцов из углепластика толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм с концентратором напряжений в виде сквозного отверстия диаметром 6 мм, 8 мм или 16 мм в соответствии со стандартом ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766) показали, что обработка излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров обеспечивает результат, по прочности сопоставимый с механической обработкой алмазным инструментом и на ≈ 15 % выше, чем гидроабразивная резка. Представленные результаты подтверждают возможность производительной прецизионной лазерной обработки ПКМ в промышленности как альтернативы традиционным способам.

Список литературы

- [1] Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 720 с.
- [2] Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты [Текст] / К.Е. Перепелкин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 380 стр.
- [3] Находкин, П.А. «Черные крылья» готовятся к полетам [Текст] / П.А. Находкин // Авиаиндустрия. – 2011. – № 2. – С. 42–47.
- [4] Савин, С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 [Текст] / С.П. Савин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 686–693.
- [5] Irving, P.E. Polymer Composites in the Aerospace Industry [Text] / P.E Irving, C. Soutis. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. – 520 p.
- [6] Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Ми



хайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.

[7] Средне-Невский судостроительный завод [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://snsz.ru>. – СНСЗ. – (Дата обращения 13.03.2018)

[8] Композитное кораблестроение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compositeshipbuilding.ru>. – Композитное кораблестроение. – (Дата обращения 13.03.2018)

[9] АПАТЕК-Прикладные и перспективные технологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.apatech.ru>. – АПАТЕК. – (Дата обращения 13.03.2018)

[10] АВАНГАРД. Проектирование и производство изделий из стеклопластика, полимерных и композиционных материалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.авангард-пластик.рф>. – АВАНГАРД. – (Дата обращения 13.03.2018)

[11] ОНПП Технология им. А.Г. Ромашина [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://technologiya.ru>. – Государственный научный центр РФ. – (Дата обращения 13.03.2018)

[12] Раскутин, А.Е. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций [Текст] / А.Е. Раскутин, А.В. Хрульков, Р.И. Гирш // Труды ВИ-АМ. – 2016. – № 9. – С. 106–118.

[13] Jamal Y., Sheikh-Ahmad Machining of Polymer Composites [Text] / Sheikh-Ahmad Jamal Y. – Berlin: Springer, 2009. – 315 p.

[14] Панов, Д.В. Композиты и станки для их обработки [Текст] / Д.В. Панов, А.Н. Коротков, Б.П. Саушкин // РИТМ. – 2014. – № 7. – С. 32–36.

[15] Комаров, Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов [Текст] / Г.В. Комаров. – СПб.: Профессия, 2006. – 592 с.

[16] Григорьянц, А.Г. Особенности лазерной резки углепластиков [Текст] / А.Г. Григорьянц [и др.] // Сварочное производство. – 1991. – № 5. – С. 4–6.

[17] Григорьянц, А.Г. Лазерная обработка неметаллических материалов [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – М.: Высшая школа, 1988. – 191 с.

[18] Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.

[19] Emmelmann, C. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength / C. Emmelman [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – Part A. – P. 565–571.

[20] Stock, J. Remote laser cutting of CFRP: Improvements in the cut surface [Text] / J. Stock, M. Zaeh, M. Conrad // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 161–170.

[21] Гуреев, Д.М. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов [Текст] / Д.М. Гуреев, С.И. Кузнецов, А.Л. Петров // Известия Самарского

научного центра Российской академии наук. – 1999. – № 2. – С. 255–264.

[22] Herzog, D. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP [Text] / D. Herzog [et. al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 1464–1473.

[23] Wolynski, A. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR [Text] / A. Wolynski [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 292–301.

[24] Takahashi, K. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light [Text] / K. Takahashi [et. al.] // Composites: Part A applied science and manufacturing. – 2016. – Vol. 84. – P. 114–122.

[25] Caprino, G. Maximum cutting speed in laser cutting of fiber reinforced plastics [Text] / G. Caprino, V. Tagliaferri // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1988. – Vol. 48. – No. 4. – P. 389–398.

[26] Cenna, A.A. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics – a review [Text] / A. A. Cenna, P. Methew // Int. J. Mach. Tools Manufacture. – 1997. – Vol. 37 (6). – P. 723–736.

[27] Negarestani, R. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials / R. Negarestani // Negarestani R. Machining Technology for Composite Materials [Text] / R. Negarestani, L. Li. – Cambridge, 2012. – P. 288–308.

[28] Laser machining of carbon fibre-reinforced plastic composites // Advances in laser materials processing [Text] / Z. L. Li [et al.]. – Cambridge, 2010. – P. 136–177.

[29] Chryssolouris, G. Fundamentals of laser machining of composites / G. Chryssolouris // Chryssolouris, G. Machining Technology for Composite Materials [Text] / G. Chryssolouris, K. Salonitis. – Cambridge, 2012. – P. 266–287.

[30] Тарасов, В.А. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике [Текст] / В.А. Тарасов, А.Л. Галиновский // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3. – С. 1–12.

[31] Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 6. – С. 11–17.

[32] Степанов, Ю.С. Раскрой листовых неметаллических материалов водоледяной струей высокого давления [Текст] / Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 8. – С. 23–28.

[33] Матюшев, И.И. Справочник конструктора / И.И. Матюшев. – СПб.: Политехника, 2006. – 1027 с.

[34] Серебrenицкий, П.П. Краткий справочник технолога-машиностроителя / П.П. Серебrenицкий. – СПб.: Политехника, 2007. – 951 с.



- [35] Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев. – Т.1. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
- [36] Wu, C. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes [Text] / C. Wu, X. Wu, C. Huang // Optics and laser technology. – 2015. – Vol. 73. – P. 23–28.
- [37] Ushida, K. Characteristic analysis of CFRP cutting with nanosecond pulsed laser [Text] / K. Ushida [et al.] // Journal of advanced research in physics. – 2012. – Vol. 3. – No. 1. – P. 1–3.
- [38] Bluemel, S. Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources [Text] / S. Bluemel [et al.] // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1143–1152.
- [39] Riveiro, A. Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite [Text] / A. Riveiro [et al.] // Composite Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2012. – Vol. 43. – P. 1400–1409.
- [40] Leone, C. Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique [Text] / C. Leone, S. Genna, V. Tagliaferri // Optics and lasers in engineering. – 2014. – Vol. 53. – P. 43–50.
- [41] Voisey, K.T. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites [Text] / K.T. Voisey [et al.] // Optics and lasers in engineering. – 2006. – Vol. 44. – Iss. 11. – P. 1185–1197.
- [42] Schneider, F. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers [Text] / F. Schneider, N. Wolf, D. Petring // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 415–420.
- [43] Goeke, A. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality [Text] / A. Goeke, C. Emmelmann // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – Part B. – P. 253–258.
- [44] Takahashi, K. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser [Text] / K. Takahashi [et al.] // Journal of materials processing technology. – 2015. – Vol. 222. – P. 110–121.
- [45] Leone, C. Investigation of CFRP laser milling using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser: Effect of process parameters on removal mechanisms and HAZ formation [Text] / C. Leone [et al.] // Composite Part A: Applied science and manufacturing. – 2013. – Vol. 55. – P. 129–142.
- [46] Klotzbach, A. Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources [Text] / A. Klotzbach, M. Hauser, E. Beyer // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. Part A. – P. 572–577.
- [47] Niino, H. Laser cutting of carbon fiber reinforced thermos-plastic (CFRTP) by IR laser Irradiation [Text] / H. Niino [et al.] // Journal of laser Micro/Nanoengineering. – 2014. – Vol. 9. – No. 2. – P. 180–186.
- [48] Lima, M. Laser processing of carbon fiber reinforced polymer composite for optical fiber guidelines [Text] / M. Lima [et al.] // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 572–580.
- [49] Akshay, H. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling [Text] / H. Akshay [et al.] // Composite Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Vol. 82. – P. 42–52.
- [50] Furst, A. Remote laser processing of composite materials with different opto-thermic properties [Text] / A. Furst [et al.] // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 389–398.
- [51] Dittmar, H. UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses [Text] / H. Dittmar, F. Gabler, U. Stute // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 266–275.
- [52] Технологические рекомендации «Лазерная резка полимерных композиционных материалов и металлокомпозиционных материалов». №1.4.2272-2012. – Введен. 2012-07-01. – Национальный Институт Авиационных Технологий, 2012. – 21 с.
- [53] Zaeh, M. Material processing with remote technology – revolution or Evolution / M. Zaeh [et al.] // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – Part A. – P. 19–33.
- [54] Промышленные волоконные иттербиевые лазеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ipgphotonics.com/ru>. – Лазеры. – (Дата обращения: 13.03.2018).
- [55] Вейко, В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение [Текст] / В.П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.
- [56] Вакс, Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки [Текст] / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
- [57] Weber, R. Minimum damage in CFRP laser processing [Text] / R. Weber [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – Part B. – P. 302–307.
- [58] Weber, R. Short-pulse laser processing of CFRP [Text] / R. Weber [et al.] // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 137–146.
- [59] Mucha, P. Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP [Text] / P. Mucha [et al.] // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1208–1217.
- [60] Ohkubo, T. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics [Text] / T. Ohkubo, M. Tsukamoto, Y. Sato // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1165–1170.
- [61] Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf. – (Дата обращения: 14.03.2018).
- [62] Xu, H. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing [Text] / H. Xu, J. Hu // Physics Procedia. – 2017. – Vol. 45. – P. 354–364.
- [63] Okhubo, T. Three-dimensional numerical simulation during laser processing of CFRP [Text] / T. Okhubo [et al.] // Applied surface science. – 2017. – Vol. 417. – P. 104–107.
- [64] Котов, С.А. Экспериментальная оценка режимов размерной обработки углепластиков им-



пульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / С.А. Котов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – № 1. – С. 73–85.

[65] Экспериментальное исследование влияния технологического газа на качество обработки углепластиков наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] // Лазеры в науке, технике, медицине / С.А. Котов; под ред. В.А. Петрова. – М., 2016. – Т. 27. – С. 27–31.

[66] Котов, С.А. Зависимость качества детали из терморезистивного углепластика от вида обработки [Текст] / С.А. Котов, В.В. Блинков, Д.И. Кондратюк // Авиационная промышленность. – 2016. – № 4. – С. 43–47.

[67] Котов, С.А. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / С.А. Котов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 1. – С. 30–36.

[68] Котов, С.А. Экспериментальное исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффективность размерной обработки углепластика [Текст] / С.А. Котов, Н.А. Лябин // Вестник НИЯУ «МИФИ». – 2017. – Т. 6. – № 5. – С. 396–404.

[69] Котов, С.А. Качество и оценка эффективности размерной обработки углепластиков излучением волоконных лазеров [Текст] / С.А. Котов [и др.] // Авиационная промышленность. – 2017. – № 3. – С. 42–47.

[70] Технология многопроходной обработки углепластика импульсным наносекундным волоконным иттербиевым лазером // Лазеры в науке, технике, медицине [Текст] / С.А. Котов [и др.]; под ред. В.А. Петрова. – М., 2017. – Т. 28. – С. 33–37.

[71] Григорьянц, А.Г. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / А.Г. Григорьянц [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 11. – С. 33–39.

References

[1] Mikhailin Yu. A. Fibrous Polymer Composite Materials in Technology (Volknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2015 (in Russ.).

[2] Perepelkin K.E. Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites (Armiruyushchie volokna i volknistyie polimernye kompozity). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2015 (in Russ.).

[3] Nakhodkin P.A. “Black wings” are preparing for flights (“Chernye kryl'ya” gotovyatsya k poletam). *Aviaindustriya*, 2013;2:42–47 (in Russ.).

[4] Savin S.P. The use of modern polymer composite materials in the design of the airframe of the MS-21 air-

craft (Primenenie sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov v konstruksii planera samoletov semeistva MS-21). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012;14(4):686–693 (in Russ.).

[5] Irving P.E., Soutis C. Polymer Composites in the Aerospace Industry. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.

[6] Mikhailin Yu.A. Structural polymer composite materials (Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2010 (in Russ.).

[7] Sredne-Neviskii sudostroitel'nyi zavod [E-recourse]. Available on: <http://snsz.ru>. – SNSZ (13.03.2018)

[8] Kompozitnoe korablestroenie [E-recourse]. Available on: <http://compositeshipbuilding.ru>. – Kompozitnoe korablestroenie (13.03.2018)

[9] APATEK-Prikladnye i perspektivnye tekhnologii [E-recourse]. Available on: <http://www.apatech.ru>. – APATEK (13.03.2018)

[10] AVANGARD. Proektirovanie i proizvodstvo izdelii iz stekloplastika, polimernykh i kompozitsionnykh materialov [E-recourse]. Available on: <http://www.avangard-plastik.rf>. – AVANGARD (13.03.2018)

[11] ONPP Tekhnologiya im. A.G. Romashina [E-recourse]. Available on: <https://tehnologiya.ru>. – Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr RF (13.03.2018)

[12] Raskutin A.E. Technological features of machining of composite materials in the manufacture of structural parts (Tekhnologicheskie osobennosti mekhanooobrabotki kompozitsionnykh materialov pri izgotovlenii detalei konstruksii). *Trudy VIAM*, 2016;9:106–118 (in Russ.).

[13] Jamal Y., Sheikh-Ahmad. Machining of Polymer Composites. Berlin: Springer, 2009

[14] Panov D.V., Korotkov A. N., Saushkin B. P. Composites and machines for their processing (Kompozity i stanki dlya ikh obrabotki). *RITM*, 2014;7:32–36 (in Russ.).

[15] Komarov G.V. Connecting parts from polymer materials (Soedinenie detalei iz polimernykh materialov). SPb.: Professiya Publ., 2006 (in Russ.).

[16] Grigor'yants A.G., Kryukov V.G., Savchuk A.N., Budanov A.D., Trubitsyn A.V. Features of laser cutting of carbon plastics (Osobennosti lazernoi rezki ugleplastikov). *Svarochnoe proizvodstvo*, 1991;5:4–6 (in Russ.).

[17] Grigor'yants A.G., Sokolov A. A. Laser processing of nonmetallic materials (Lazernaya obrabotka nemetallicheskih materialov). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988 (in Russ.).

[18] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing (Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki). Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2008 (in Russ.).



- [19] Emmelmann C. [et al.]. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength. *Physics Procedia*, 2011;12(A):565–571.
- [20] Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote laser cutting of CFRP: Improvements in the cut surface. *Physics Procedia*, 2012;39:161–170.
- [21] Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Laser cutting of carbon composite materials (Lazernyi raskroi ugleirodnykh kompozitsionnykh materialov). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 1999;2:255–264 (in Russ.).
- [22] Herzog D. [et al.]. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008;48:1464–1473.
- [23] Wolynski A. [et al.]. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia*, 2011;12:292–301.
- [24] Takahashi K. [et al.]. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light. *Composites: Part A applied science and manufacturing*, 2016;84:114–122.
- [25] Caprino G., Tagliaferri V. Maximum cutting speed in laser cutting of fiber reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1988;48(4):389–398.
- [26] Cenna A.A., Methew P. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics—a review. *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, 1997;37(6):723–736.
- [27] Negarestani R., Li L. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials / R. Negarestani // Negarestani R. *Machining Technology for Composite Materials*. Cambridge, 2012, pp. 288–308.
- [28] Li Z.L. [et al.]. Laser machining of carbon fibre-reinforced plastic composites // *Advances in laser materials processing* / Cambridge, 2010, pp. 136–177.
- [29] Chryssolouris G., Salonitis K. *Fundamentals of laser machining of composites*. Machining Technology for Composite Materials. – Cambridge, 2012, pp. 266–287.
- [30] Tarasov V.A., Galinovskii A.L. Problems and prospects for the development of hydrojet technologies in rocket and space technology (Problemy i perspektivy razvitiya gidrostruinykh tekhnologii v raketno-kosmicheskoi tekhnike). *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013;3:1–12 (in Russ.).
- [31] Stepanov Yu.S., Barsukov G.V., Alyushin E.G. Modern technologies of hydro- and hydroabrasive processing of blanks (Sovremennye tekhnologii gidro- i gidroabrazivnoi obrabotki zagotovok). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2012;6:11–17 (in Russ.).
- [32] Stepanov Yu.S., Burnashov M.A. Cutting sheet nonmetallic materials with a high-pressure water jet (Raskroi listovykh nemetallicheskiikh materialov vodoleyanoi struei vysokogo davleniya). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2014;8:23–28 (in Russ.).
- [33] Matyushev I.I. Reference book of the designer (Spravochnik konstruktora). SPb.: Politehnika Publ, 2006, 1027 p. (in Russ.).
- [34] Serebrenitskii P.P. A brief reference book of the technologist-machine builder (Kratkii spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya). SPb.: Politehnika Publ., 2007 (in Russ.).
- [35] Anur'ev V.I. Handbook of the designer-machine builder (Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001 (in Russ.).
- [36] Wu C., Wu X., Huang C. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes. *Optics and laser technology*, 2015;73:23–28.
- [37] Ushida K. [et al.]. Characteristic analysis of CFRP cutting with nanosecond pulsed laser. *Journal of advanced research in physics*, 2012;3(1):1–3.
- [38] Bluemel S. [et al.]. Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources. *Physics Procedia*, 2014;56:1143–1152.
- [39] Riveiro A. [et al.]. Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012;43:1400–1409.
- [40] Leone C., Genna S., Tagliaferri V. Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and lasers in engineering*, 2014;53:43–50.
- [41] Voisey K.T. [et al.]. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites. *Optics and lasers in engineering*, 2006;44(11):1185–1197.
- [42] Schneider F., Wolf N., Petring D. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers. *Physics Procedia*, 2013;41:415–420.
- [43] Goeke A., Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*, 2010;5(B):253–258.
- [44] Takahashi K. [et al.]. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser. *Journal of materials processing technology*, 2015;222:110–121.
- [45] Leone C. [et al.]. Investigation of CFRP laser milling using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser: Effect of process parameters on removal mechanisms and HAZ formation. *Composite Part A: Applied science and manufacturing*, 2013;55:129–142.
- [46] Klotzbach A., Hauser M., Beyer E. Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources. *Physics Procedia*, 2011;12(A):572–577.
- [47] Niino H. [et al.]. Laser cutting of carbon fiber reinforced thermos-plastic (CFRTP) by IR laser Irradiation. *Journal of laser Micro/Nanoengineering*, 2014;9(2):180–186.
- [48] Lima M. [et al.]. Laser processing of carbon fiber reinforced polymer composite for optical fiber guidelines. *Physics Procedia*, 2013;41:572–580.
- [49] Akshay H. [et al.]. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016;82:42–52.



[50] Furst A. [et al.]. Remote laser processing of composite materials with different opto-thermic properties. *Physics Procedia*, 2013;41:P389–398.

[51] Dittmar H., Gabler F., Stute U. UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses. *Physics Procedia*, 2013;41:266–275.

[52] Tekhnologicheskie rekomendatsii “Lazernaya rezka polimernykh kompozitsionnykh materialov i metallokompozitsionnykh materialov”. No. 1.4.2272-2012. – Vveden. 2012-07-01. Natsional'nyi Institut Aviatsonnykh Tekhnologii Publ., 2012.

[53] Zaeh M. [et al.]. Material processing with remote technology—revolution or Evolution. *Physics Procedia*, 2010;5(part A):19–33.

[54] Promyshlennye volokonnye itterbievye lazery [E-recourse]. Available on: <http://www.ipgphotonics.com/ru>. – Lazery (13.03.2018).

[55] Veiko V.P. Technological lasers and laser radiation (Tekhnologicheskie lazery i lazernoe izluchenie). SPb: SPbGU ITMO Publ., 2007. (in Russ.).

[56] Vaks E.D., Milen'kii M.N., Saprykin L.G. The practice of precision laser processing (Praktika pretsizionnoi lazernoi obrabotki). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2013 (in Russ.).

[57] Weber R. [et al.]. Minimum damage in CFRP laser processing. *Physics Procedia*, 2011;12(B):302–307.

[58] Weber R. [et al.]. Short-pulse laser processing of CFRP. *Physics Procedia*, 2012;39:137–146.

[59] Mucha P. [et al.] Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP. *Physics Procedia*, 2014;56:1208–1217.

[60] Ohkubo T., Tsukamoto M., Sato Y. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics. *Physics Procedia*, 2014;56:1165–1170.

[61] Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics [E-recourse]. Available on: http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf (14.03.2018).

[62] Xu H., Hu J. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing. *Physics Procedia*, 2017;45:354–364.

[63] Okhubo T. [et al.]. Three-dimensional numerical simulation during laser processing of CFRP. *Applied surface science*, 2017;417:104–107.

[64] Kotov S.A., Lyabin N.A., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I., Bibik O.B., Popov D.S. Experimental evaluation of the regimes of dimensional processing of carbon plastics by pulsed nanosecond radiation of an ytterbium fiber laser (Eksperimental'naya otsenka rezhimov razmernoi obrabotki ugleplastikov impul'snym nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo

lazera). *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya “Mashinostroenie”*, 2017;1:73–85 (in Russ.).

[65] Kotov S. A. Experimental study of the effect of process gas on the quality of processing of carbon plastics by nanosecond radiation from a fiber ytterbium laser (Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo gaza na kachestvo obrabotki ugleplastikov nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera). *Lazery v Nauke, Tekhnike, Meditsine*, 2016;27:27–31 (in Russ.).

[66] Kotov S.A., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I. Dependence of the quality of the part from thermosetting carbon fiber reinforced plastic on the type of processing (Zavisimost' kachestva detali iz termoreaktivnogo ugleplastika ot vida obrabotki). *Aviatsonnaya promyshlennost'*, 2016;4:43–47 (in Russ.).

[67] Kotov S.A. High technology of increasing the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by pulsed nanosecond radiation from a fiber ytterbium laser (Naukoemkaya tekhnologiya povysheniya effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov impul'snym nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii*, 2017;1:30–36 (in Russ.).

[68] Kotov S.A., Lyabin N.A. Experimental study of the influence of the wavelength of laser radiation on the efficiency of dimensional processing of CFRP (Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya dliny volny lazernogo izlucheniya na effektivnost' razmernoi obrabotki ugleplastika). *Vestnik NIYaU “MIFI”*, 2017;6(5):396–404 (in Russ.).

[69] Kotov S.A., Popov D.S., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I. Quality and evaluation of the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by radiation from fiber lasers (Kachestvo i otsenka effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov izlucheniem volokonnykh lazerov). *Aviatsonnaya promyshlennost'*, 2017;3:42–47 (in Russ.).

[70] Kotov S.A., Antonenko V.I., Popov D.S. Technology of multi-pass processing of CFRP by a pulsed nanosecond fiber ytterbium laser (Tekhnologiya mnogoprokhodnoi obrabotki ugleplastika impul'snym nanosekundnym volokonnyim itterbievym lazerom). *Lazery v Nauke, Tekhnike, Meditsine*, 2017;28:33–37 (in Russ.).

[71] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Infimovskii Yu.Yu., Blinkov V.V., Kotov S.A. High technology of increasing the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by the continuous emission of a fiber ytterbium laser (Naukoemkaya tekhnologiya povysheniya effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov nepreryvnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera), *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii*. 2017;11:33–39 (in Russ.).

Транслитерация по BSI



ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ КОМПОНЕНТОВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ*

*А.В. Крайский¹, В.А. Постников², Т.В. Миронова¹, А.А. Крайский¹,
М.А. Шевченко¹, М.А. Казарян¹*

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
д. 53, Ленинский проспект, Москва, 119991, Россия
тел.: +7(499)132-68-21; e-mail: kraiski@sci.lebedev.ru

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН
д. 31, Ленинский проспект, Москва, 119071, Россия
+7(916)716-90-18; e-mail: vladpostnikov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.105-124

Заключение совета рецензентов: 15.03.18 Заключение совета экспертов: 23.03.18 Принято к публикации: 05.04.18

В обзоре кратко перечислены основные моменты современного и мирового, и отечественного состояния разработки голографических сенсоров – нового класса диагностических устройств, представляющих собой толстослойные голограммы, записанные в специальной среде – гидрогеле, реагирующем на присутствие определенных веществ в жидких и газовых смесях. Под действием тестируемого компонента смеси, на который настроены шивки гидрогелевой матрицы, чувствительный слой сенсора сжимается или разбухает – тем больше, чем больше концентрация, что дает возможность количественно оценивать концентрацию конкретного вещества. Описаны основные свойства, достоинства, измерительные возможности и возможные области применения голографических сенсоров. Весьма перспективными представляются исследования качества воды в городских системах водоснабжения, а также экосистем природных водоемов. С помощью голографических сенсоров можно измерять жесткость и кислотность воды, а также загрязненность ионами тяжелых металлов, бактериями и их спорами и т.д. Для мониторинга атмосферы существуют голографические сенсоры, позволяющие определять содержание горючих углеводородных газов в воздухе, его влажность и температуру. Показано, что сенсоры могут найти применение в медицине для определения концентраций широкого спектра соединений, содержащихся в биологических жидкостях. В обзоре более подробно обсуждались проблемы, возникающие при анализе содержания глюкозы в плазме и сыворотке крови. Проведено сопоставление голографических сенсоров с существующими диагностическими средствами. Рассматривались возможности применения цифровой техники обработки изображений, в том числе смартфонов, в качестве альтернативы спектрометрическим регистраторам отклика сенсоров, поскольку широко распространенная цифровая фототехника значительно снижает стоимость и упрощает измерения. Это имеет существенное значение для оперативного мониторинга экологических параметров, особенно в полевых условиях. Подробно описаны проблемы измерения длины волны отраженного от сенсора света для различных типов данных, доступных в цифровых камерах (форматов изображений). Приводятся известные в литературе обоснования важности разработки голографических сенсоров для возрастающего рынка экспресс-диагностики в практической медицине.

Ключевые слова: голографические сенсоры; глюкоза; точность определения; колориметрия; жесткость воды; кислотность; мониторинг; экосистема.

HOLOGRAPHIC SENSORS FOR DIAGNOSTICS OF COMPONENTS IN AQUEOUS SOLUTIONS AND BIOLOGICAL FLUIDS

*A. V. Kraiski¹, V. A. Postnikov², T. V. Mironova¹, A. A. Kraiski¹,
M. A. Shevchenko¹, M. A. Kazaryan¹*

*Крайский А.В., Постников В.А., Миронова Т.В., Крайский А.А., Шевченко М.А., Казарян М.А. Голографические сенсоры компонентов водных растворов и биологических жидкостей // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):105-124.

¹P.N. Lebedev Physical Institute of RAS

53 Leninskiy Av., Moscow, 119991, Russia

tel.: +7(499)132 68 21, e-mail: kraiski@sci.lebedev.ru

²Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS

31 Leninsky Av., Moscow, 119071, Russia

tel.: +7(916)716 90 18, e-mail: vladpostnikov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.105-124

Referred 15 March 2018 Received in revised form 23 March 2018 Accepted 5 April 2018

The review gives the main points of the current state of holographic sensors development based both on researches of foreign scientists and on the results of the only group in Russia dealing with this problem. Holographic sensors are a new class of diagnostic devices that are thick-layered holograms recorded instead of gelatin in a special hydrogel that reacts to the presence of certain substances in liquid and gas mixtures. The cross-links of the hydrogel matrix are tuned to the test component of the mixture, and the more the hydrogel layer of the sensor shrinks or swells, the higher the component concentration is. This mechanism makes it possible to quantify the concentration of a particular substance. The paper describes the main properties, advantages, measuring capabilities, and possible applications of the holographic sensors. In this case, water quality studies are very promising, both in urban water supply systems and for monitoring ecosystems in natural reservoirs. Moreover, with the holographic sensors it is possible to measure the hardness and acidity of water, as well as pollution with ions of heavy metals, bacteria and their spores, etc. To monitor the atmosphere, there are specially designed holographic sensors that allow determining the content of combustible hydrocarbon gases in air, and air humidity and temperature. The sensors can also be widely used in medicine in order to determine the concentrations of a wide range of compounds contained in biological fluids. The review discusses in detail the problems that arise when analyzing the level of glucose in blood plasma and serum and draws the comparison of holographic sensors with existing diagnostic tools. We consider the possibilities of using digital imaging technology, including smartphones, as an alternative to spectrometric registration of the sensor response because, compared with spectrometers, widespread digital photographic equipment significantly simplifies the measurements and reduces their cost. This is very important for the operative monitoring of environmental parameters, especially in the field. The review details the problems of measuring the wavelength of the light reflected from the sensor for different types of data available in digital cameras (image formats). Based on the arguments available in the literature, the authors substantiate the importance of designing holographic sensors for the growing sector of the express diagnostic market in practical medicine.

Keywords: holographic sensors; glucose; measurement accuracy; colorimetry; water hardness; water acidity; monitoring; ecosystem.



Александр Владиславович Крайский
Aleksandr Kraiski

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1968 г.).

Область научных интересов: физическая оптика; голография; сенсоры; фотонные кристаллы; спектроскопия комбинационного рассеяния; свойства воды.

Публикации: 60.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology.

Research interests: physical optics; holography; sensors; photonic crystals; spectroscopy of Raman scattering; water.

Publications: 60.



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.



Владимир Александрович
Постников
Vladimir Postnikov

Сведения об авторе: канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, главный технолог, Институт общей и неорганической химии им. Курнакова.

Образование: МГУ (1971 г.).

Область научных интересов: химия полимеров; медицинская химия; «умные» сенсоры.

Публикации: 71.
h-index 10

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Leading Researcher, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS.

Education: MSU, 1971.

Research interests: polymer chemistry; medical chemistry; smart sensors.

Publications: 71.



Татьяна Вячеславовна
Миронова
Tatiana Mironova

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Образование: МГУ, Физический факультет (1984 г.).

Область научных интересов: голография; корреляционная обработка цифровых изображений; колориметрия; голографические сенсоры; комбинационное рассеяние; фотонные кристаллы.

Публикации: 53.
h-index: 3

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Scientific Researcher, Lebedev Physics Institute.

Education: Faculty of Physics, Moscow State University, 1984.

Research interests: holography; correlation processing of digital images; colorimetry; holographic sensors; Raman scattering; photonic crystals.

Publications: 53.



Антон Александрович
Крайский
Anton Kraiski

Сведения об авторе: независимый исследователь.

Образование: Московский физико-технический институт (1995 г.).

Область научных интересов: фотонные кристаллы.

Публикации: 5.

Information about the author: Independent Researcher.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1995.

Research interests: photonic crystals.

Publications: 5.



Михаил Александрович
Шевченко
Mikhail Shevchenko

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Образование: МИФИ (2010 г.).

Область научных интересов: голографические сенсоры; комбинационное рассеяние света.

Публикации: 5.

Information about the author: Junior Researcher, Lebedev Physics Institute.

Education: МЕРФИ, 2010.

Research interests: holographic sensors; Raman scattering.

Publications: 5.

1. Введение

Целью работы исследователей, занимающихся разработкой голографических сенсоров, является создание нового класса диагностических устройств для оперативного мониторинга экологического состояния воды и атмосферы, а также для экспресс-диагностики в медицине. Полученные на текущий

момент результаты показали, что можно создавать сенсоры с достаточно высокой чувствительностью и точностью измерений, причем благодаря обратимости свойств сенсоры могут быть многократного использования. Сочетание с простотой и низкой стоимостью поточного изготовления, возможностью работы в реальном времени и без добавления химических реагентов должно сделать голографические

сенсоры конкурентоспособной альтернативой существующим диагностическим средствам экологического мониторинга.

Первые голографические сенсоры (ГС) для определения концентрации компонентов растворов появились в 90-е гг. XX в. [1–4], а сейчас привлекают все большее внимание исследователей благодаря тому, что на основе ГС можно разработать новый класс диагностических устройств [5–10].

В настоящее время в практической медицине увеличивается потребность в экспресс-диагностике (см., например, [11]), которая при многих серьезных и распространенных заболеваниях позволяет ускорить начало лечения, что является жизненно важным для спасения людей. Отметим, что для измерения параметров аналитов (компоненты, искомые или определяемые в пробе вещества или материала объекта аналитического контроля) могут применяться различные методы, например, в глюкометрах – фотометрический или электрохимический принципы. Однако использование таких тестовых систем имеет ряд ограничений, вызванных неустойчивостью вследствие денатурации фермента, трудностей, связанных со стерилизацией в естественных условиях, а также их стоимостью. В связи с этим в течение последних 10–20 лет ведутся исследования по разработке новых типов диагностических принципов и устройств без ферментов как для медицинских целей, так и для лабораторной и производственной сфер. Широко разрабатываются сенсоры на основе оптических методов регистрации изменения свойств «умных» гидрогелей [1–10], одно из достоинств которых заключается в том, что с их помощью можно достаточно просто определять концентрации тестируемых веществ и с помощью приборов, и визуально. Поскольку диагностические методы могут иметь не только полезные, но и осложняющие работу свойства (так, для проведения анализа горючих газов желательнее применять устройства, не использующие датчики с электрическими узлами), необходимо разрабатывать новые принципы работы сенсоров.

Оптические сенсоры, в том числе сенсоры на фотонных структурах (или брэгговские структуры), достаточно давно привлекли внимание исследователей [9, 12] и сейчас находят применение в экспресс-диагностике. К фотонным структурам (например, фотонные кристаллы типа опалов) можно отнести структуры с пространственно-периодическими (или

квазипериодическими) оптическими свойствами, периоды которых сопоставимы с длиной волны света. В таких сенсорах, в зависимости от типа аналита и способа его распознавания, были получены различные чувствительности [9]: на pH – до 0,01; на содержание глюкозы – до 0,1 мМ (аминофенилборная кислота) и до 0,5 мМ (глюкозооксидаза); на бифенол – до 10^{-9} мкМ; на цианиды – до 10^{-4} мМ; на холестерин – до 1 нМ; на ионы Hg^{2+} – до 10 нМ; на температуру – до 2 °С и т.д.

О растущем интересе к экспресс-диагностике в целом и подобного рода сенсорам в частности говорят и экономические показатели. В работе [11] сравнивалось состояние мирового производства средств лабораторной диагностики в 2012 г. и в 2017 г. В 2012 г. весь рынок этих средств оценивался в 52,5 млрд долларов, а экспресс-диагностики – 15 млрд долл., или около 29 % всего рынка. На 2017 г. рынок производства средств лабораторной диагностики прогнозировался в объеме 73,6 млрд долл., то есть рост объема всего рынка оценивался в 40 %, а объем рынка экспресс-диагностики – в 22,1 млрд долл., или 30 % от всего производства. Увеличение этого сегмента рынка оценивается в 47,3 %, что свидетельствует о его сильной востребованности. Близкие оценки приводились и маркетинговой компанией Markets&Markets для диагностики *in vitro* в целом [13]. Так, в 2016 г. объем рынка по совокупности продуктов (инструменты, реактивы, программное обеспечение) оценивался в 60,2 млрд долл., а к 2021 г. ожидается в размере 78,7 млрд долл. Оценки этой компании для более ранних лет (см. например [9]) также отмечали тенденцию роста.

Цель настоящей работы состоит в представлении возможностей голографических сенсоров и проблем, возникающих в процессе работы ГС. Здесь кратко представлены данные, полученные единственной российской группой, работающей с ГС. Эта группа впервые поставила фундаментальные вопросы об оптических свойствах голографических сенсоров как многослойных периодических структур. В настоящем обзоре представлены наиболее важные аспекты ряда теоретических и экспериментальных исследований этой группы. Следует отметить, что ранее в литературе основное внимание было направлено на зависимость отклика сенсора (длины волны) от концентрации исследуемого вещества.

В России такой обзор делается впервые.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

α	Отношение спектральных чувствительностей рабочих каналов
$\delta \lambda$	Спектральная ширина линии отражения, нм
λ	Длина волны, мкм
Φ	Яркость источника излучения

Буквы латинского алфавита

D	Толщина голографического слоя, мкм
J	Сигнал в канале сенсора
N	Число интерференционных слоев



Продолжение списка обозначений

n	Среднее значение показателя преломления
S	Спектральная чувствительность
<i>Индексы нижние</i>	
i	Номер канала сенсора
x	Индекс искомой длины волны в колориметрическом методе
<i>Аббревиатуры</i>	
ГС	Голографические сенсоры
ДЭ	Дифракционная эффективность
ИК	Инфракрасный
СО	Стандартное отклонение

2. Голографические сенсоры и их возможности

Голографические сенсоры – один из видов сенсоров на фотонных структурах. Специфика этих структур заключается в их типе: в них образуются интерференционные слои, отражение от которых, как правило, имеет узкополосный спектр.

ГС позволяют создавать новый класс диагностических устройств для определения компонентов растворов биологических жидкостей и газовых смесей. Разработка и исследование ГС начались под руководством проф. К.Р. Лоу в 90-е гг. XX в. в Кембриджском университете [1]. В обзоре 2014 г. [8] дается определение ГС: «аналитические устройства, отражающие узкополосный свет от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов, предназначенные для обнаружения и количественного определения аналитов и/или физических параметров».

Фактически ГС – это голограммы Денисюка, то есть многослойные периодические структуры, изготавливаемые, например, по фотографической технологии. В большинстве случаев ГС представляют собой полимерную несущую матрицу на подложке. В эту матрицу внедрены нанозерна серебра, концентрация которых периодически меняется, и которые образуют тонкие периодические слои с изменяющимися оптическими свойствами. Эти периодические слои будем называть интерференционными слоями, а весь слой матрицы с периодическими слоями – голографическим слоем. Интерференционные слои в основном не параллельны поверхности голографического слоя, а составляют с ней небольшой угол. У отраженного от такой структуры света имеется резонансная длина волны, которая при нормальном к интерференционным слоям падении светового излучения равна удвоенному периоду структуры. Спектр отраженного от сенсора сигнала имеет узкий пик и хорошо аппроксимируется гауссовой функцией [14] с характерной спектральной шириной от 8 нм до 20 нм. В полимерную матрицу голографического слоя встраиваются также специальные вещества, в результате взаимодействия которых с тестируемым компонентом матрица изменяет свою толщину, что, в свою очередь, приводит к изменению периода интерференционных слоев и длины волны отраженного света (при освещении белым светом). Поскольку глазом это воспринимается как изменение цвета сенсора, концентрацию тести-

руемого вещества можно определять по этому изменению. Следует отметить, что более высокую дифракционную эффективность (ДЭ) можно получить при отбеливании голограммы. При этом сейчас исследуются и другие способы изготовления голографических структур, в частности, применяют наноразмерные синтетические цеолиты, фотополимерные материалы, трёхмерную цифровую печать [10].

Описанный механизм работы ГС показал, что ГС является своеобразным, отличающимся от других типом сенсоров, что позволяет считать их новым классом диагностических устройств. Задача исследователей, разрабатывающих эти сенсоры и области применения – выявить и показать особенности и преимущества ГС.

Свойство изменения спектра отражения при набухании голограмм с повышением влажности было замечено Ю.Н. Денисюком, когда он в конце 1959 г. – начале 1960 г. получил первую голограмму. Этот факт учёный записал в свой рабочий журнал, соответствующая страница которого была опубликована одним из его ближайших учеников Д.И. Стаселько с комментариями [15].

В последнее время появился ряд обзорных статей по ГС [6–10]. Среди работ особо выделяется опубликованный в Chem.Rev. в 2014 г. большой обзор [8], в котором подводятся итоги работы в этой области за 20 лет и подробно обсуждаются проблемы и перспективы этих исследований.

Согласно этим обзорам, с помощью голографических сенсоров можно определять и анализировать как компонентный состав, так и некоторые физические параметры среды:

- кислотность (рН) водных растворов от 2 до 8 [16, 8];
- содержание ионов металлов до 10^{-5} моль/л [5, 8, 17];
- содержание глюкозы в крови до 100 мкмоль/л (по литературным данным [8, 18]) и в других биологических жидкостях [8, 19], содержание сорбитола, мочевины;
- концентрацию спирта [3, 5, 8] (в [5] диапазон $0 \div 47$ % соответствует всему видимому диапазону, а в [8] отмечено, что при переходе от 0 к 1 вес.% визуально заметны изменения цвета);
- наличие: спор бактерий [8, 20], метаболитов [8, 21], роста бактерий [22];



- содержание лактатов в плазме крови [8, 23];
- содержание горючих углеводородных газов в воздухе с помощью голографических сенсоров на основе нечувствительной к влажности матрицы [8, 24];
- влажность и температуру [8, 25]: при влажности от 5 % до 80 % они работают обратимо, и отклик устанавливается за несколько секунд; при измерениях температур в случае гидрофильных матриц необходимо учитывать влияние влажности на отклик сенсоров (для решения этой проблемы желательна разработка сенсоров на основе гидрофобной матрицы);
- присутствие воды в жидких углеводородах – так в ксилоле визуально заметно изменение цвета при возрастании концентрации воды от 47 ppm до 120 ppm [8].

В перспективе можно подумать о контроле соблюдения заданного температурного диапазона при хранении и перевозке объекта.

Возможны и иные применения.

К достоинствам голографических сенсоров относятся:

- достаточно высокая чувствительность, причем для некоторых классов веществ – чувствительность к следовым концентрациям;
- достаточно высокая точность;
- многоканальность, возможность одновременного измерения пространственно неоднородных распределений;
- визуальная оценка отклика или точная обработка цифровых изображений для одного и того же датчика;
- на базе этого – возможность работы с бытовыми визуальными устройствами, в частности с мобильными устройствами;
- возможность на стадии изготовления достаточно простого внесения изменений в состав сенсора для работы с теми или другими компонентами, то есть перенастройка на другой анализ;
- обратимость;
- работа в реальном времени;
- простота работы;
- возможность проводить большое количество анализов с высокой скоростью в течение длительного времени;
- возможность работы без добавления химических реагентов;
- отсутствие токсичных продуктов, выделяющихся при работе, то есть достаточно высокая экологичность;
- невысокая стоимость;
- возможность применения микрофлюидной техники.

ГС могут применяться в различных областях. В медицине возможны неинвазивные методы контроля содержания глюкозы в организме, например, по поту или с помощью специализированных контактных линз по слезной жидкости. В экологии – для мониторинга окружающей среды, в том числе водных ре-

сурсов, и для контроля питьевой воды на содержание ионов металлов (или иные компоненты). При этом контроль работы фильтров воды можно осуществлять визуально или, с большей точностью, с помощью цифровой техники обработки изображений. В пищевой промышленности – с помощью ГС можно осуществлять контроль мочевины в молоке на молочных фермах, содержание которой повышается при неправильном питании коров. В быту или в полевых условиях цифровой контроль можно проводить с помощью адаптированного смартфона или простого специализированного устройства, которое, в сущности, является упрощенной фотокамерой, при этом габариты камер могут быть минимальными, а их массовое производство – недорогим. Особняком стоит разработка голографических сенсоров на основе гидрофобной матрицы для определения содержания горючих углеводородных газов в воздухе [24]. Такие сенсоры в сочетании с волоконным световодом можно использовать для дистанционного зондирования в качестве чисто оптического датчика, то есть без применения в протяженной рабочей зоне каких-либо приборов с электрическим питанием.

Следует отметить, что голографические сенсоры не предназначены для определения предельно малых концентраций, но в быту пациентам, например, страдающим диабетом, и не столь важно определять предельно малые концентрации глюкозы, а важно делать это надежно, недорого, воспроизводимо, достаточно просто и, желательно, не инвазивно. Это же утверждение справедливо и для сенсоров общей жесткости воды и т.п. Таким образом, для ГС существуют свои предпочтительные ниши, зависящие от типа анализатора и условий проведения анализа.

3. Теоретическая часть. О точности определения длины резонансной волны

Точность измерения длины волны связана со спектральной шириной полосы коэффициента отражения голограммы. При малой дифракционной эффективности на спектральную ширину в первую очередь влияет толщина голографического слоя. При достаточно большой ДЭ (>0,1) на ширину линии влияет как толщина эмульсии, так и значение ДЭ [14]. В последнем случае для определения спектральной ширины надо проводить компьютерный расчет.

При малой амплитуде модуляции показателя преломления, ДЭ мала и спектральная ширина пика отражения является наименьшей. В этом случае спектральная ширина линии отражения вычисляется с помощью простого выражения (1), которое для малой ДЭ устанавливает связь между параметрами голографического слоя:

$$\delta\lambda = 0,886\lambda^2 / (2nD) = 0,886\lambda / N, \quad (1)$$



где $\delta\lambda$ – спектральная ширина линии отражения; λ – длина волны; n – среднее значение показателя преломления; D – толщина слоя; $N = (2nD) / \lambda$ – число интерференционных слоев.

На рис. 1 показан экспериментальный спектр отражения сенсора и его аппроксимация гауссовой функцией. По параметрам аппроксимирующей функции (центральная длина волны и спектральная ширина) по формуле (1) определяется эффективное число интерференционных слоев и эффективная толщина слоя. Для этого спектра отражения средняя длина волны $\lambda = 0,677$ мкм (красный), средний показатель преломления материала гидрогелевого слоя $n = 1,33$, спектральная ширина линии $\delta\lambda = 8$ нм. Толщина голографического слоя вычисляется по выражению (1) и составляет $D = 19$ мкм. Как показано в [5], при титровании кислотой раствора щелочи в окрестности резкого уменьшения кислотности раствора происходит также резкое, почти на порядок, увеличение ДЭ. Это может вызывать сильное искажение формы пика отражения и увеличение его ширины. Эти искажения становятся заметными при ДЭ больше 0,1 [14], и формула (1) перестает действовать. В этом случае использовалась компьютерная модель для расчетов спектральной зависимости коэффициента отражения. Для волнового уравнения решалась краевая задача в среде с периодическим изменением диэлектрической проницаемости. Для диэлектрической проницаемости использовалась формула Максвелла Гарнетта [26–27] для композитной среды (эмульсии с нанозернами серебра). Параметры ГС определялись методом подгонки параметров пика отражения, вычисляемого с помощью компьютерной модели, к параметрам экспериментального спектра отражения [14].

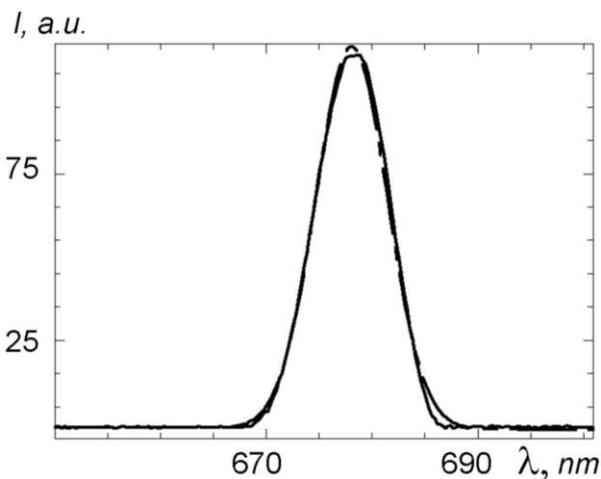


Рис. 1 – Типичный вид экспериментального спектра отражения сенсора (сплошная линия) и его аппроксимация гауссовой функцией (штриховая линия) [5]

Fig. 1 – Typical form of the experimental reflection spectrum of the sensor (solid line) and its approximation by a Gaussian function (dashed line) [5]

Точность определения анализируемого параметра состоит из двух компонент: случайной погрешности, которая определяется прежде всего воспроизводимостью измерений и систематической погрешностью. Более подробно эти вопросы освещены ниже, при рассмотрении определения глюкозы в плазме крови. Общая схема определения точности такова. Проводится массив измерений отклика сенсора в стационарных состояниях. По этому массиву определяется стандартное отклонение. Зная чувствительность сенсора, то есть производную положения максимума от концентрации анализируемого вещества, с помощью простого арифметического действия нетрудно получить стандартное отклонение для искомого параметра, в рассматриваемом случае концентрации вещества. Систематическая ошибка определяется путем сравнения результатов измерений посредством сенсора образцов с известной концентрацией. Откликом сенсора является длина волны максимума коэффициента отражения (или брэгговского провала в спектре пропускания). Длина волны при спектральных измерениях определяется по спектру коэффициента отражения либо оператором вручную, либо аппроксимацией гауссовой функцией. Специальное сопоставление на массиве измерений показало, что для опытного оператора результаты практически совпадают.

4. Экспериментальная часть

4.1. Подготовка голографических сенсоров

В работе [5] голограммы изготавливались по фотографической методике и записывались в гидрогеле, насыщенном светочувствительными зернами бромида серебра, по схеме на встречных пучках излучением гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм или второй гармоники твердотельного лазера с длиной волны 533 нм. После экспонирования и обычной процедуры проявления в гидрогеле образовывались периодические слои нанозерен металлического серебра. Экспонирование проводилось в кювете с раствором для того, чтобы период слоев при измерении тестируемого раствора обеспечивал пики отражения в рабочей области спектрометра или фоторегистратора. Пучок лазерного излучения при записи голограммы падал сверху вниз на специальную кювету. В случае необходимости в схему мог вводиться модулирующий фазовый фильтр, увеличивающий телесный угол падающего пучка. На дне кюветы располагалось зеркало, отражающее излучение назад, формируя интерференционные слои. Пластика для записи голограммы располагалась выше зеркала с небольшим наклоном.

4.2. Анализ катионов

Был исследован ряд гидрогелевых матриц различных составов на основе акриловой кислоты, чувствительных к рН и ионной силе, а также на основе аминифенилборной кислоты, чувствительных к глюкозе. Отклики ГС на основе акриловой кислоты на

некоторые катионы в широком диапазоне концентраций от 10^{-7} до 0,3 М показаны на рис. 2.

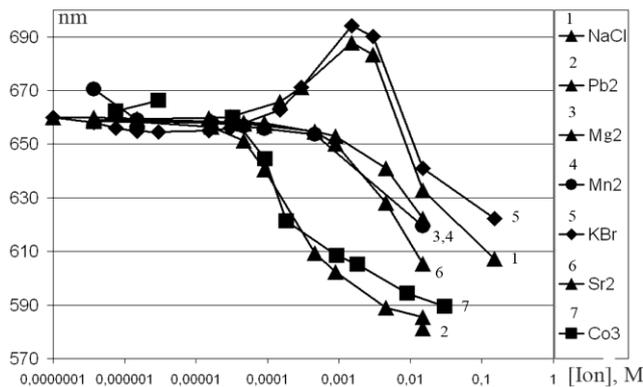


Рис. 2 – Отклики ГС для ионов некоторых 1–3-валентных металлов [5] в зависимости от концентрации

Fig. 2 – Responses of the HS for ions of some 1–3 valence metals [5] depending on the concentration

Характер откликов различен для разных типов катионов. Для щелочных ионов отклик не монотонен, увеличение длины волны заметно уже в диапазоне 10^{-4} М, виден выраженный максимум в диапазоне тысячных долей рН, и затем длина волны резко падает к концентрациям порядка 10^{-2} М. Отклики двухвалентных ионов Mn, Mg, Sr образуют другую группу с монотонной спектральной зависимостью. Длина волны начинает заметно уменьшаться при концентрации около 1 мМ. Отклик двухвалентного иона свинца близок к отклику трехвалентного кобальта – они также образуют группу с монотонной спектральной зависимостью и с более значительным воздействием на сенсор. Отклик становится заметным при концентрациях в диапазоне немногим менее сотен мкМ. Следует отметить, что сенсор при этих исследованиях не оптимизировался для ионной силы, и при соответствующей проработке, видимо, чувствительность может быть повышена.

На рис. 3 показаны спектры отражения в дистиллированной воде, водопроводной воде и в образцах воды с различным содержанием ионов металлов.

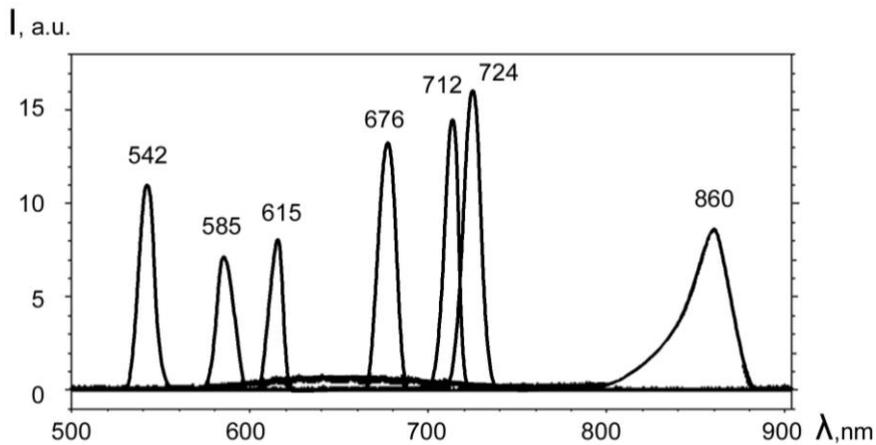


Рис. 3 – Спектры отражения сенсора при наличии различных ионов металлов в воде [5]. Указанные длины волн соответствуют следующим случаям: 542 нм – наличие ионов свинца в концентрации 5×10^{-3} М; 585 нм – минеральная вода, концентрация ионов кальция 3×10^{-3} М; 615 нм – московская водопроводная вода (холодная); 676 нм – водопроводная вода, пропущенная через фильтр «Барьер»; 712 нм – водопроводная вода, пропущенная через фильтр «Аквафор»; 724 нм – отклик на дистиллированную воду в стационарном состоянии сенсора; 860 нм – нестационарное состояние сенсора для дистиллированной воды

Fig. 3 – Spectra of sensor reflection in the presence of various metal ions in water [5]. The indicated wavelengths correspond to the following cases: 542 nm – the presence of lead ions at a concentration of 5×10^{-3} ; 585 nm – mineral water, the concentration of calcium ions 3×10^{-3} ; 615 nm – Moscow tap water (cold); 676 nm – tap water passed through the filter “Barrier”; 712 nm – tap water passed through the filter “Aquaphor”; 724 nm – response to distilled water in the stationary state of the sensor; 860 nm – non-stationary state of the sensor for distilled water

В дистиллированной воде стационарное состояние сенсора соответствовало длине волны $\lambda = 724$ нм (темно-красный свет). После переноса сенсора из восстанавливающего раствора в дистиллированную воду сенсор очень быстро, за доли секунды, расширился до состояния с длиной волны $\lambda = 860$ нм (ИК), а затем медленно сжался до своего стационарного состояния. В московской холодной водопроводной воде длина волны отклика сенсора составила $\lambda = 615$ нм (светло-красный), то есть эмульсия вследствие жесткости воды была заметно сжата (на 109 нм по сравнению с

дистиллированной водой). Эта же водопроводная вода после фильтра «Аквафор» вызывала отклик с длиной волны $\lambda = 712$ нм (темно-красный), что на 97 нм больше по сравнению с водопроводной водой и на 12 нм меньше по сравнению с дистиллированной водой. Водопроводная вода после фильтра «Барьер» вызывала отклик с длиной волны $\lambda = 676$ нм (красный), который был сдвинут в коротковолновую область на 36 нм по сравнению с фильтром «Аквафор». В минеральной воде, содержащей ионы $[Ca^{2+}] 3 \cdot 10^{-3}$ М, длина волны отклика $\lambda = 585$ нм (желтый). В модельном растворе



соли свинца в дистиллированной воде [Pb^{2+}] составляли $5 \cdot 10^{-3}$ М ($\lambda = 542$ нм зеленый). Таким образом, ГС вполне могут служить тестерами воды для проведения достаточно точных экспресс-анализов как в лабораторных, так и в полевых условиях, в частности, определять пригодность бытовых фильтров воды по способности очищать ее от ионов металлов.

4.3. Анализ содержания этилового спирта в водных растворах

На рис. 4 показано влияние концентрации этилового спирта на 2 типа сенсоров: на основе аминифенилборной кислоты и на основе акриловой кислоты в диапазоне концентрации спирта $0 \div 47$ %.

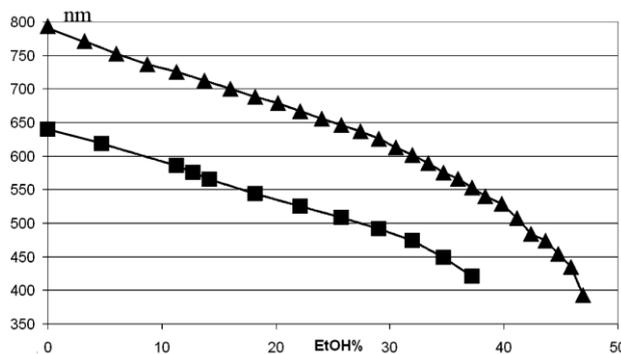


Рис. 4 – Отклик на концентрацию этилового спирта для сенсоров на основе акриловой кислоты (верхняя кривая) и аминифенилборной кислоты (нижняя кривая) [5]
Fig. 4 – Response to the concentration of ethyl alcohol for sensors based on acrylic acid (upper curve) and aminophenylboronic acid (lower curve) [5]

Сенсор на основе акриловой кислоты в указанном диапазоне перекрывал практически весь видимый спектр от красного до фиолетового. В диапазоне $0 \div 40$ % ход отклика в зависимости от концентрации спирта был практически линейен. Отметим, что управлять положением кривой по отношению к оси длин волн можно выбором условий записи голограммы.

4.4. Анализ многокомпонентных растворов: глюкоза

При анализе многокомпонентных растворов, таких, например, как глюкоза, ситуация может осложняться. Так, в сыворотке крови было обнаружено сильное снижение чувствительности голографических сенсоров к глюкозе по сравнению с чувствительностью в модельных растворах ввиду имевшихся в плазме крови ионов щелочных металлов. В модельных растворах фосфатного буфера отклик сенсоров глюкозы был линейен в диапазоне концентраций от 0 до 20 мМ. Значение отклика зависит от ионного состава раствора: при изменении ионной силы раствора (содержания ионов Na^+) от 0 до 0,15 М чувствительность сенсоров к глюкозе снижается более чем на порядок – от 6 нм/мМ до 0,44 нм/мМ [28, 29].

Это существенно при практическом применении сенсоров для определения концентрации глюкозы в биологических жидкостях, содержащих заметное количество различных ионов. В аналогичных модельных растворах шестиатомного спирта сорбита, являющегося продуктом восстановления глюкозы, отклики голографических сенсоров также были линейны. Чувствительность ГС к сорбиту в модельном растворе без ионов металлов была на два порядка выше, чем чувствительность к глюкозе. При добавлении же ионов металлов в этот раствор, значение отклика снижалось всего примерно наполовину, оставаясь достаточно высоким. Таким образом, в биологических жидкостях при соответствующем подборе реакций восстановления глюкозы до сорбита, на основе ГС можно разработать чувствительные аналитические системы для определения глюкозы.

В эксперименте [28, 29] 0,3 мл сыворотки крови предварительно разбавляли до 10 мл 0,25 М ацетатно-аммонийным буфером (рН 8,4), содержащим модификатор для восстановления глюкозы до сорбита. Результаты определения содержания сорбита показаны на рис. 5. Зависимость отклика от концентрации сорбита в сыворотке практически совпадает с аналогичной зависимостью для контрольных растворов сорбита, что свидетельствует о полном преобразовании глюкозы в сорбит. Чувствительность к содержанию глюкозы превысила 400 нм/мМ [28, 29]. При измерении длины волны в этом эксперименте стандартное отклонение (СО) (прецизионность) составило 0,05 нм при ширине линии около 10 нм. Для концентрации глюкозы это обеспечило СО до $1,0 \cdot 10^{-4}$ мМ, или 0,1 мкМ.

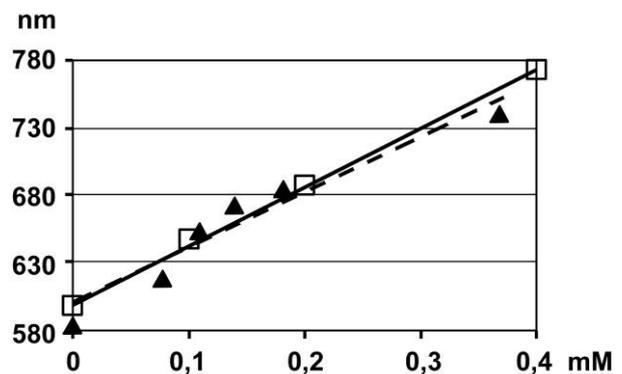


Рис. 5 – Зависимость длины волны максимума коэффициента отражения света от концентрации глюкозы в растворах сорбита (квадраты) и разбавленных модифицированных образцах сыворотки крови (треугольники) [28]
Fig. 5 – Dependence of the wavelength of reflected light on glucose concentration in sorbitol solutions (squares) and diluted modified serum samples (triangles) [28]

Для голограммы, использованной в другом реальном эксперименте с микрофлюидной техникой, СО составило $8,0 \cdot 10^{-4}$ мМ, в пересчете на исходный образец плазмы крови СО – 0,015 мМ для глюкозы. Конечно, в бытовых условиях такой высокой точно-

сти не требуется, но, во-первых, такая точность может понадобиться в исследованиях и, во-вторых, найденные в этой работе подходы могут применяться при разработке других сенсоров. Отметим, что по международному стандарту ISO15197-2013 к электронным глюкометрам предъявляются следующие требования: не менее 95 % результатов глюкометра должны отклоняться от результатов эталонного анализатора не более чем на 15 %; при содержании глюкозы выше 5,55 ммоль/л, а ниже этой границы отклонение не должно быть больше 0,83 ммоль/л. Однако, в соответствии с этими требованиями, при содержании глюкозы 5,55 ммоль/л (в границах нормы) может быть получено значение 6,38 ммоль, что представляется слишком грубым допуском.

Описанный метод измерения концентрации глюкозы с помощью ГС позволил измерить эффект снижения концентрации глюкозы в плазме крови в результате насыщения крови кислородом [30]. Это уменьшение составило около 12 %, что меньше регламентированного для электронных глюкометров относительного стандартного отклонения.

Для эталонного анализатора «YSI 2300 STAT PLUS» предел относительного СО измерений не превышает $\pm 2\%$, что при содержании глюкозы 5,55 мМ при отклонении на 3 СО может дать значение 5,86 мМ. Для голографического сенсора, с помощью которого были проведены измерения, СО составило 0,015 мМ, поэтому значение результата измерения с отклонением до 3 СО не будет превышать 5,59 мМ. Итак, для ГС СО значительно лучше, чем для эталонного анализатора. Реальное отклонение в эксперименте с модельными растворами глюкозы и сорбитола составило около 3 %, то есть на уровне эталонного прибора. По концентрационным зависимостям видно, что это отклонение явно носит систематический характер и значительно больше СО, или прецизионности, определения длины волны. Предположительно, это связано с неточностями навесок небольших количеств веществ и объемов растворов.

5. Об определении длины волны отраженного сенсором излучения с помощью колориметрического метода

5.1. Основные положения метода

Отклик голографического сенсора локален. Каждая точка его поверхности отражает излучение с длиной волны, соответствующей периоду голографических слоев в данной области сенсора и, следовательно, концентрации тестируемого вещества в данном месте. Это, с одной стороны, накладывает дополнительное требование равномерности отклика сенсора по его поверхности, но, с другой стороны, открывает возможность использовать сенсор в качестве многоканального анализатора. Варьируя свойства сенсора вдоль поверхности, то есть настраивая различные области сенсора на чувствительность к определенным компонентам раствора, можно одно-

временно измерять концентрации различных компонентов в тестируемой жидкости. Другая возможность – помещать различные анализируемые образцы в различных областях сенсора, однородного по поверхности. Технически реализовать вторую возможность проще.

Голограмма располагалась горизонтально чувствительным слоем вверх, к ней прижималась пластмассовая накладка со сквозными отверстиями диаметром около двух миллиметров, которые образовывали матрицу ячеек с объемом около 30 мкл. В ячейки вводились тестируемые растворы, а освещение голограммы и измерение спектра проводилось снизу, через подложку. Измерения можно проводить с помощью спектрометра с оптоволоконным входом, но при большом количестве ячеек это достаточно трудоемкий процесс, не позволяющий к тому же проводить одновременные измерения. Для реализации возможностей такой системы был разработан способ измерения распределения длины волны узкополосного светового излучения, отраженного от поверхности сенсора, по его цифровому цветному изображению [31]. Кроме того, этот способ волн оказался крайне полезным на этапе разработки сенсоров для контроля равномерности отклика сенсоров по поверхности, а также для изучения поведения сенсоров в процессе набухания, в нестационарном состоянии.

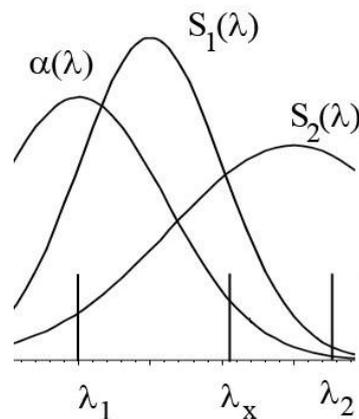


Рис. 6 – $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ – спектральные чувствительности рабочих каналов; $\alpha(\lambda)$ – их отношение; $[\lambda_1, \lambda_2]$ – рабочий диапазон [31]

Fig. 6 – $S_1(\lambda)$ and $S_2(\lambda)$ – the spectral sensitivities of the working channels; $\alpha(\lambda)$ – their ratio; $[\lambda_1, \lambda_2]$ – the operating range [31]

В этом подходе к измерениям отклика сенсоров учитывается тот факт, что излучение сенсора узкополосно [5]. В общем плане предложенный способ состоит в следующем. Излучение направляют не менее чем в два регистрирующих канала с различными спектральными чувствительностями. Если в рабочем диапазоне отношение спектральных чувствительностей, по крайней мере, двух каналов носит монотонный характер, то по отношению сигналов в этих двух каналах определяют среднюю длину волны узкополосного излучения (рис. 6). Если селективная чувст-

вительность канала с номером i есть $S_i(\lambda)$, то сигнал в этом канале будет $J_i = \int d\lambda S_i(\lambda)\Phi(\lambda)$, где $\Phi(\lambda)$ – яркость источника. Для δ -образного источника $J_i = I_0 S_i(\lambda)$. Соотношение спектральных чувствительностей каналов $\alpha(\lambda) = S_1(\lambda)/S_2(\lambda)$, и, таким образом, для случая двух каналов в области монотонного изменения функции $\alpha(\lambda)$ искомая длина волны λ_x – это решение уравнения $\alpha(\lambda_x) = J_1/J_2$, то есть $\lambda_x = \alpha^{-1}(J_1/J_2)$.

Данное утверждение справедливо не только для δ -образных спектральных линий, но и для излучения с достаточно узким спектром. Если соотношение спектральных чувствительностей детекторов линейно изменяется на всей ширине спектральной линии, симметричной относительно своей центральной длины волны, то средняя длина волны будет определяться так же корректно, как и в случае монохроматического источника излучения.

Со строго колориметрической точки зрения, было предложено описывать цвета изображения, полученного с помощью фотоаппарата, в координатах доминирующей длины волны и чистоты цвета. При этом, поскольку исследуются изображения голографиче-

ских сенсоров, чистота цвета (насыщенность) максимальна, так как цвета спектрально-чистые. Таким образом, для голографических сенсоров, поверхность которых при освещении белым светом отражает свет с узким спектром, измеряется не просто доминирующая длина волны, но реальная средняя длина волны узкополосного спектра. Здесь необходимо только заранее прокалибровать используемый фотоаппарат, чтобы знать отклик сенсора на различные длины волн.

5.2. Подготовка измерительной аппаратуры

5.2.1. Подготовка материала для калибровки

Подготовка измерительной аппаратуры происходит следующим образом. Вначале устанавливается, каким образом фотоаппарат, который будет использоваться для измерений, реагирует на различные длины волн. Для этого была разработана процедура калибровки: формируется непрерывный спектр (например, от лампы накаливания) с наложенным на него линейчатым спектром (например, от ртутной лампы) в данном случае с помощью голографической решетки. Затем делается цифровая фотография этих спектров (пример на рис. 7; фотоаппарат Sony F717).

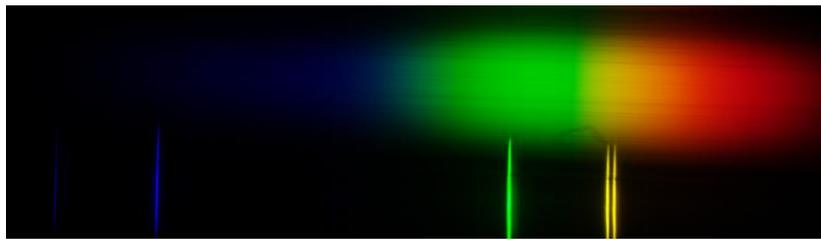


Рис. 7 – Цифровая фотография непрерывного спектра с наложенным на него линейчатым спектром ртутной лампы
Fig. 7 – Digital photography of a continuous spectrum with a linear spectrum superimposed

Длина волны в этом примере представляет собой линейную функцию от горизонтальной координаты и может быть рассчитана для каждой точки кадра линейной интерполяцией между известными длинами волн

ртутной лампы. На приведенном кадре видно пять линий: фиолетовая (404,7 нм), синяя (435,8 нм), зеленая (546,1 нм) и две желтых (577 и 579 нм). Зависимость длины волны от координаты показана на рис. 8.

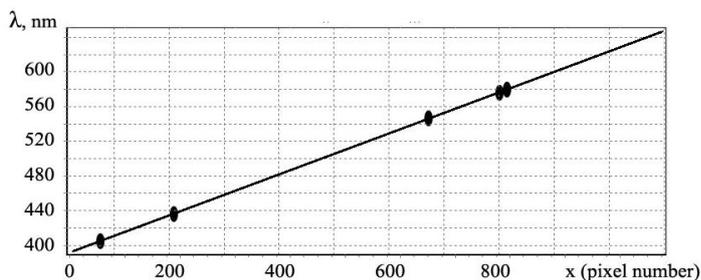


Рис. 8 – Интерполяционная прямая для спектра (рис. 7) показывает зависимость длины волны в спектре от горизонтальной координаты (номера пикселя) в кадре: точки – длины волн ртутной лампы
Fig. 8 – The interpolation straight line for the spectrum (fig. 7) shows the dependence of the wavelength in the spectrum on the horizontal coordinate (pixel number) in the frame: the dots – the wavelengths of the mercury lamp

Длины волн должны быть поставлены в соответствие с некоторой величиной, характеризующей соотношение сигналов в цветовых каналах сенсора фотоаппарата. В качестве такой величины удобно использовать цветность (HUE). Дальнейшие вычисления зависят от того, какой выходной формат изображений доступен для данной конкретной камеры.

5.2.2. Графические форматы

Если изображение получено в форматах BMP, TIFF или JPEG, то зависимость сигналов в цветовых каналах от координаты (и, следовательно, от длины волны) выглядит так, как показано на рис. 9.

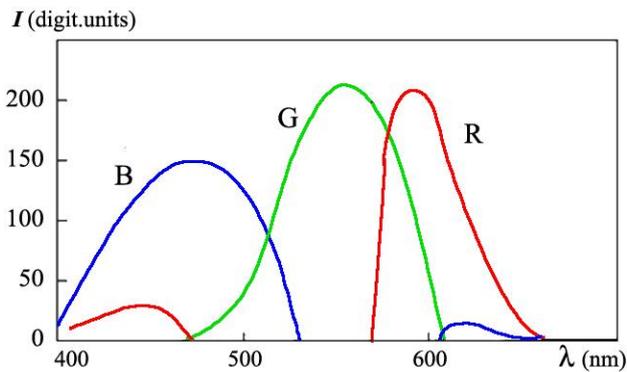


Рис. 9 – Сигналы в цветовых каналах в фотографии спектра в зависимости от длины волны [32]
Fig. 9 – The signals in the color channels in the photo of the spectrum as a function of the wavelength [32]

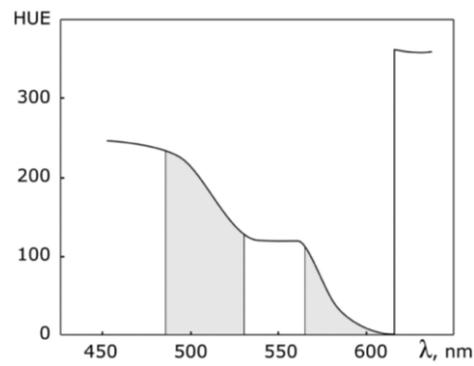


Рис. 10 – Пример характерной зависимости функции цветности от длины волны при обработке изображений спектра в графических форматах [32] (серый цвет – рабочие диапазоны): по горизонтальной оси – длина волны отраженного света; по вертикальной оси – цветность
Fig. 10 – An example of the characteristic dependence of the chromaticity function on the wavelength when processing images of the spectrum in graphic formats [32] (gray color – operating ranges): the abscissa – the wavelength of reflected light; the HUE function – the ordinate

Для этих сигналов в диапазоне 540 ÷ 570 нм присутствуют отклики только зеленых пикселей. В далекой красной и фиолетовой областях спектра кажется, что есть дополнительные «области чувствительности», то есть отклики соответственно синего и красного каналов. Сравнение с аналогичными кривыми для необработанных данных (см. рис. 12) позволяет сделать вывод о том, что эти два диапазона «дополнительной чувствительности» эмулируются встроенным в камеру компьютером, который для улучшения зрительного восприятия далеких синей и красной областей спектра, где реально работают только пиксели одного канала, создаёт фиолетовый оттенок. Кроме того, видно, что относительные величины сигнала в синем канале увеличены в несколько раз. Такая картина присуща всем фотоаппаратам (исследовано порядка дюжины) при съемке спектра в любом графическом формате. Также не имеет значения, как обрабатываются данные с сенсора – встроенным компьютером фотоаппарата или компьютерной программой (Photoshop, ACDSee и т.д.), в любом случае данные из формата RAW пересчитываются в цветное изображение, что сопровождается подобными эффектами. Для рассматриваемых задач главный недостаток таких эффектов – «потеря» цветовой чувствительности сенсора в зеленой области, что, кстати говоря, не оказывает серьёзного влияния на цветопередачу бытовых фотографий, так как в обычной жизни спектрально-чистые цвета встречаются достаточно редко (например, в радуге).

На рис. 10 показана типичная зависимость функции цветности (HUE) от длины волны. На интервале от 540 нм до 570 нм функция цветности постоянна. Таким образом, этот диапазон непригоден для измерений длин волн.

Помимо описанной особенности графических форматов, оказалось, что для этих форматов цветность точек изображения спектра зависит не только от длины волны, но и от интенсивности излучения даже при таких экспозициях, когда сенсор работает в весьма далеком от насыщения режиме.

С учетом этого для описания действия фотоаппарата необходимо строить не характеристическую кривую, а характеристическую поверхность, которая дает зависимость длины волны от двух координат – либо от цветности (HUE) и средней величины сигнала в каналах (I), либо от сигналов в двух рабочих каналах. При этом в диапазоне 570 ÷ 605 нм чувствительны только красные и зеленые пиксели, а отклик в синем канале находится на уровне шума. Первый вариант удобен в качестве более общего при использовании трехцветного сенсора. Пример характеристической поверхности приведен на рис. 12 (для фотоаппарата Sony F717).

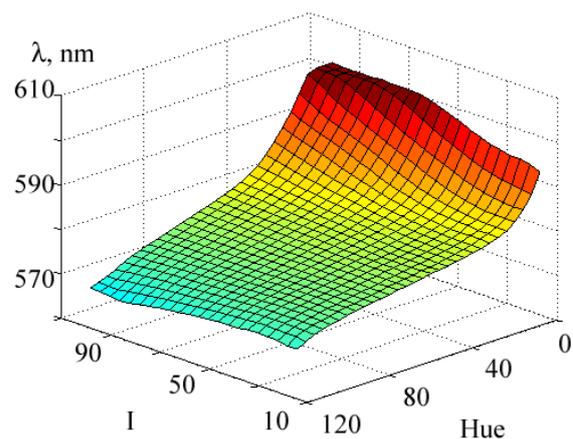


Рис. 11 – Характеристическая поверхность для фотоаппарата Sony F717: по горизонтальным осям I – интенсивность, Hue – цветность; по вертикальной оси – длина волны отраженного света (измеряемый диапазон длин волн 570–605 нм находится в области чувствительности красного и зеленого каналов) [31]
Fig. 11 – Characteristic surface for the Sony F717: the horizontal axes are I – the intensity, Hue – the chromaticity; the vertical axis is the wavelength of the reflected light (the measured wavelength range 570–605 nm is located in the sensitivity region of the red and green channels) [31]

Когда построена характеристическая поверхность, фотоаппарат может быть использован для измерений длины волны в рабочих диапазонах откликов сенсора и цветности. Для более длинноволнового рабочего участка точность измерения длины волны достигает 0,16 нм.

5.2.3. RAW формат

Если фотоаппарат позволяет извлекать необработанные данные (формат RAW), то ситуация меняется: измерения длины волны можно проводить практически во всем видимом диапазоне спектра. Горизонтальное сечение необработанных данных отклика сенсоров для фотографии спектра было показано на рис. 12.

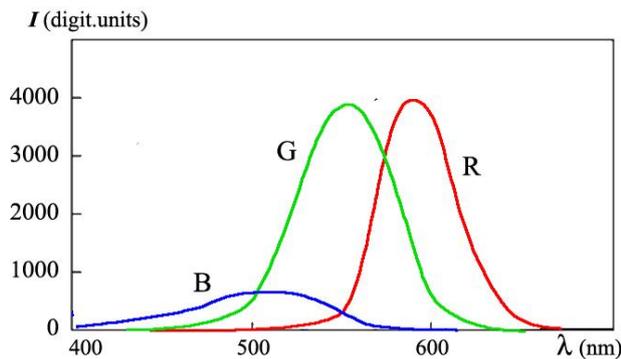


Рис. 12 – Цветовые компоненты изображения непрерывного спектра для необработанных данных [32]

Fig. 12 – Color components of a continuous spectrum image for raw data [32]

Сравним эти данные с аналогичными кривыми для графических форматов (см. рис. 9). Кривые в данном случае гладкие, в дальней красной и фиолетовой областях спектра нет никаких странных особенностей, диапазоны чувствительностей красного и синего каналов перекрываются. Это приводит к тому, что функция цветности изменяется монотонно в широком диапазоне длин волн – от 455 нм до 625 нм.

Процедура калибровки фотоаппарата проводится аналогично предыдущему случаю – для графических форматов. Делается ряд фотографий спектра (непрерывного и наложенного на него линейного) с различными экспозициями. С сенсора снимаются необработанные сигналы и разделяются по цветовым каналам с учетом расположения ячеек байеровского массива. Горизонтальная координата в кадре приводится в соответствие с длиной волны (см. рис. 8). Затем для каждой длины волны непрерывного спектра с кадров с различной экспозицией собираются данные о соотношениях цветовых каналов. В результате получается зависимость длины волны спектра от функции цветности и отклика по трем цветовым каналам. Пример такой характеристической поверхности для фотоаппарата Canon EOS10D показан на рис. 13 (значения откликов цветовых каналов норми-

рованы для сравнения на соответствующие значения для графических форматов).

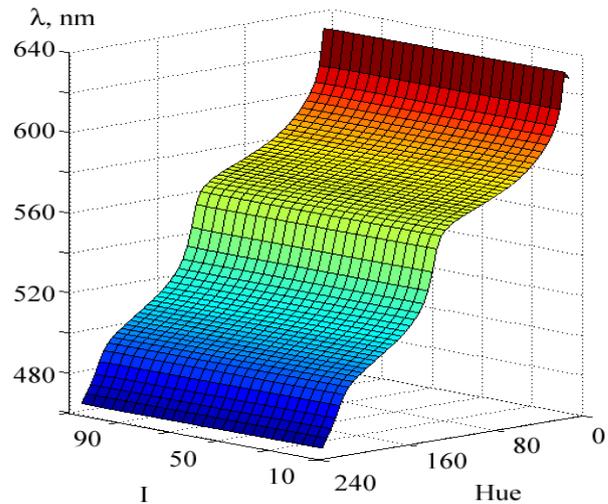


Рис. 13 – Калибровочная поверхность, полученная из необработанных данных для фотоаппарата Canon EOS10D: по горизонтальным осям I – интенсивность, Hue – цветность; по вертикальной оси – длина волны отраженного света

Fig. 13 – Calibration surface obtained from raw data for camera Canon EOS10D: the horizontal axes are I – intensity, Hue – chromaticity; the vertical axis is the wavelength of the reflected light

На рис. 13 видно, что рабочий диапазон измерений существенно расширился: длину волны можно определять в 455 ÷ 625 нм, а, кроме того, зависимость от интенсивности в этом случае пренебрежимо мала. По сути, для необработанных данных можно строить не характеристическую поверхность, а просто кривую зависимости длины волны от цветности. В этом случае точность определения длины волны в зависимости от спектрального участка меняется в пределах 0,3 ÷ 3 нм.

5.3. Результаты измерений колориметрическим методом

На этапе подбора рабочего режима голографических сенсоров описанный метод определения длин волн применялся для контроля равномерности отклика сенсора по поверхности при переходных процессах и в стационарном состоянии. При этом была зарегистрирована поверхность голограммы площадью около 2 см² в переходном режиме при замене раствора спирта с меньшей концентрацией на раствор с большей концентрацией. Результаты показаны на рис. 14 и 15. На рис. 14 данные относятся к переходному процессу, когда толщина голограммы еще продолжает меняться, а рис. 15 соответствует стационарному состоянию сенсора.

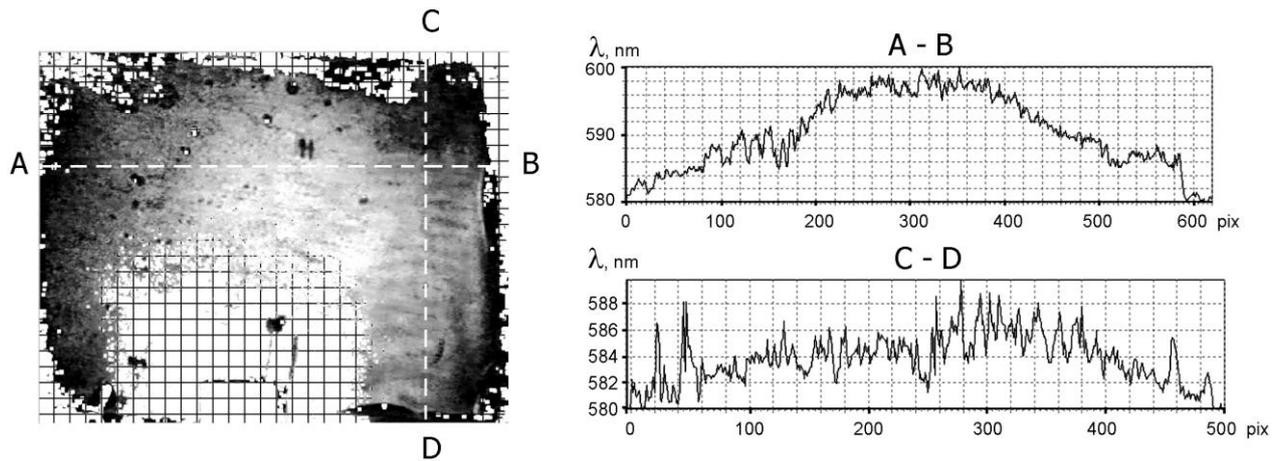


Рис. 14 – Карта распределения длин волн по поверхности голограммы: сеткой отмечены области, в которых невозможно провести обработку; яркость серых точек пропорциональна определяемой длине волн. В правой колонке показаны примеры горизонтального (вверху) и вертикального (внизу) сечений карты длин волн: по оси ординат – длины волн, пересчитанные по полученной характеристической поверхности; по оси абсцисс – номера пикселей в сечении

Fig. 14 – The distribution of the wavelength over the surface of the hologram: the mesh indicates areas in which the processing is impossible; the brightness of gray points is proportional to the determined wavelength. The right column shows examples of the horizontal (top) and vertical (bottom) sections of the wavelength map: the ordinates – the wavelengths recalculated from the received characteristic surface; the abscissa – the pixel number in the section

На рис. 14 видно, что длина волны в различных точках меняется от 580 нм до 600 нм, то есть изменения от центра к краям велики, достаточно велики и разброс. Это говорит о том, что сжатие голограммы происходит неравномерно, быстрее процесс протекает по краям голограммы. Кроме того, велик разброс в небольшой окрестности каждой точки, который свидетельствует о неоднородности деформации сетки сенсора по пространству.

На рис. 15 справа показаны сечения для одной из точек карты распределения длин волн для сенсора в стационарном состоянии. Видно, что разброс сильно уменьшился по сравнению с переходным процессом и по всей поверхности сосредоточен в диапазоне около 1 нм. Сильно упал и локальный разброс, не превосходящий 1 нм (число точек входящих в карту составляет около 500 000).

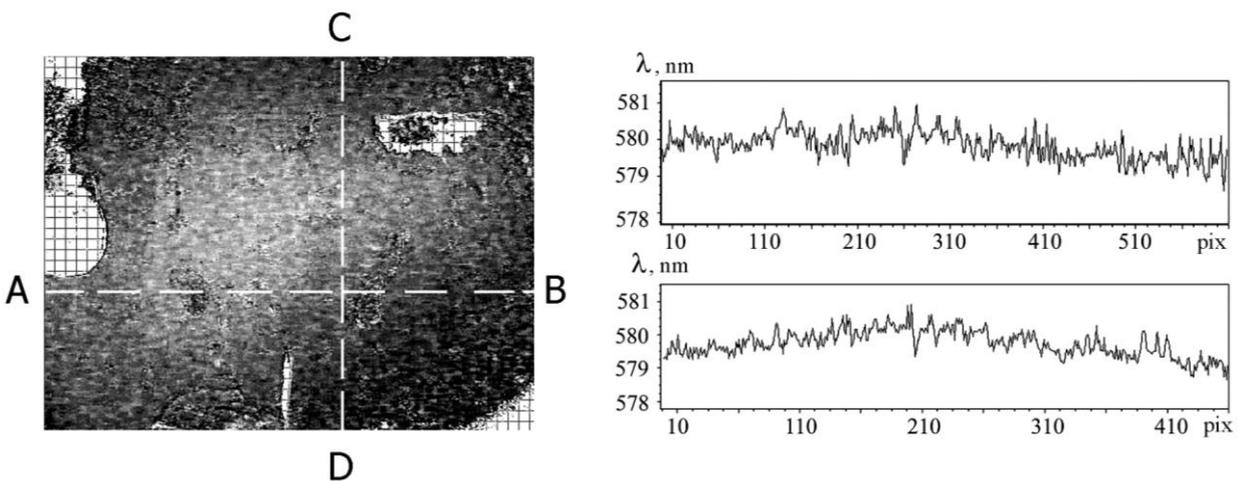


Рис. 15 – Карта распределения длин волн по поверхности голограммы в стационарном состоянии: справа – горизонтальное (вверху) и вертикальное (внизу) сечения карты длин волн в одной из точек; по оси ординат – длины волн, пересчитанные по полученной характеристической поверхности; по оси абсцисс – номера пикселей в сечении

Fig. 15 – The distribution of wavelength over the surface of the hologram in a stationary state: the right column shows examples of the horizontal (top) and vertical (bottom) sections of the wavelength map; the ordinates – the wavelengths recalculated from the received characteristic surface; the abscissa – the pixel number in the section



На рис. 16 приведены результаты определения длин волн колориметрическим способом для строки из 4-х ячеек, содержащих водно-спиртовой раствор с содержанием спирта: 6,25 %, 12,5 %, 25 %, 37,5 %. На рис. 16а показана фотография этой строки – концентрация спирта увеличивалась слева направо. Изображения имели красный, оранжевый, зелено-голубой и голубой цвета. На рис. 16b изображена карта длин волн в изометрической проекции, а на рис. 16c – сечение карты длин волн,

проведенное через все ячейки. Ниже показана зависимость длины волны отклика от концентрации спирта. Чувствительность составила 3,48 нм/(спирт.%); наблюдаемое изменение длины волны (от 606 нм до 500 нм) – 106 нм. На рис. 16e и 16f показаны фотография и карта длин волн для чипа с голографическими сенсорами с 24-мя ячейками, в которых находился аналит в различной концентрации, справа – горизонтальное и вертикальное сечение этой карты.

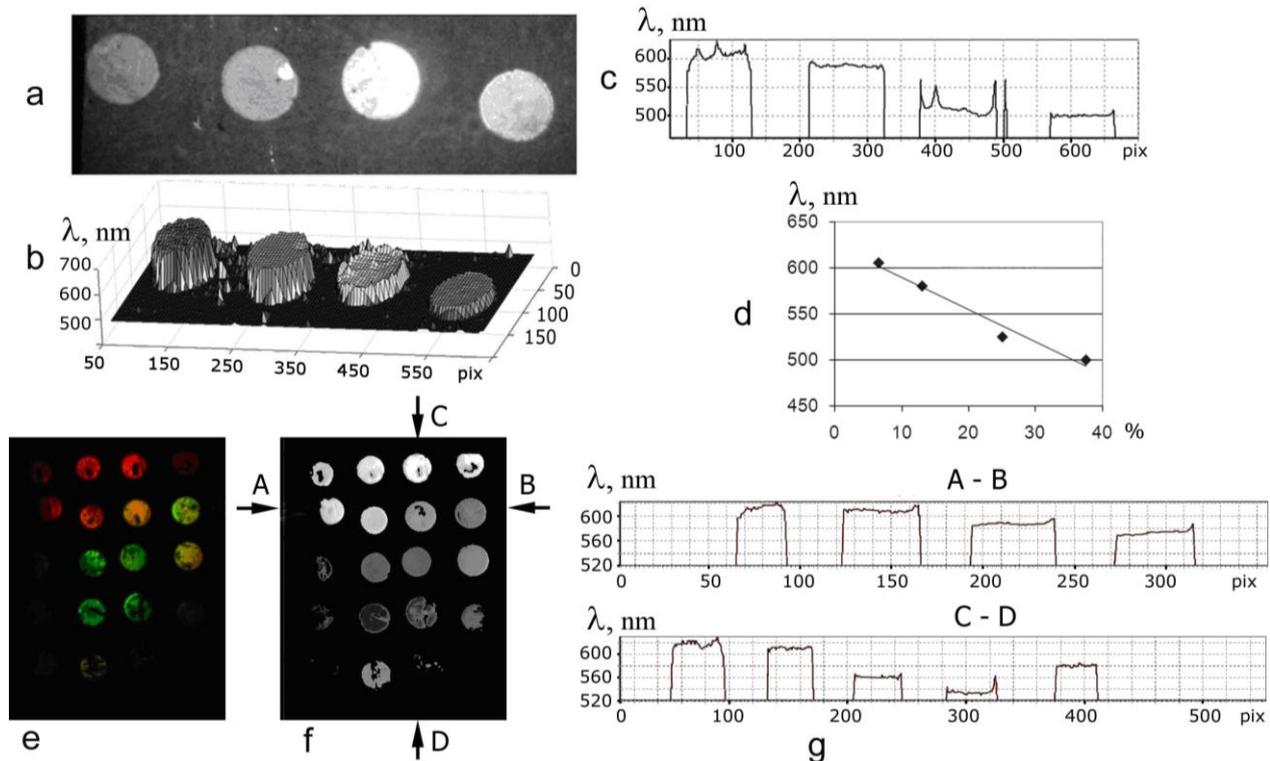


Рис. 16 – Результаты колориметрической обработки фотографий голографических сенсоров с микрофлюидными ячейками: а – фотография строки из 4-х ячеек, содержащих водно-спиртовой раствор с содержанием спирта (слева направо): 6,25 %, 12,5 %, 25 %, 37,5 %; б – карта длин волн в изометрической проекции (координаты в плоскости изображения – в относительных единицах); в – сечение карты длин волн, проведенное через все ячейки: по оси абсцисс – номера пикселей, по оси ординат – длины волн в нм; д – зависимость длины волны отклика от концентрации спирта: по оси абсцисс – содержание спирта, %, по оси ординат – длина волны, нм; е – изображение набора ячеек ГС с различным содержанием аналита; ф – карта длин волн этого изображения; г – горизонтальное (вверху) и вертикальное (внизу) сечения карты длин волн

Fig. 16 – Results of colorimetric processing of photographs of holographic sensors with microfluidic cells: а – a photograph of a row of 4 cells containing a water-alcohol solution with an alcohol content (left to right): 6.25%, 12.5%, 25%, 37.5%; б – the wavelength map in isometric projection (the coordinates in the image plane are in relative units); в – the cross-section of the wavelength map through all the cells: the pixel number – along the abscissa, the wavelengths in nm – the ordinate; д – the dependence of the wavelength on the alcohol concentration: the abscissa – the alcohol content, %, the ordinate – the wavelength, nm; е – the image of a set of cells with different analyte content; ф – the wavelength map of this image; г – the horizontal (top) and vertical (bottom) sections of the wavelength map

Для верификации колориметрического метода определения длины волны отраженного от сенсора света параллельно с получением спектрометрических данных проводилась фотосъемка поверхности сенсора с ракурса, при котором интенсивность отраженного от сенсора света максимальна. На рис. 17 представлены

сравнительные результаты измерения кинетики перехода для сенсора из одного состояния в другое с помощью спектрометра и колориметрии. Переход в одно и то же состояние (раствор сорбитола в фосфатном буфере) осуществлялся из разных начальных состояний – уксусная кислота и фосфатный буфер. Вследст-

вие этого на начальном этапе (до 85 сек) данные различаются. На следующем участке видно, что колориметрический способ не уступает по точности измерений спектров с помощью спектрометра.

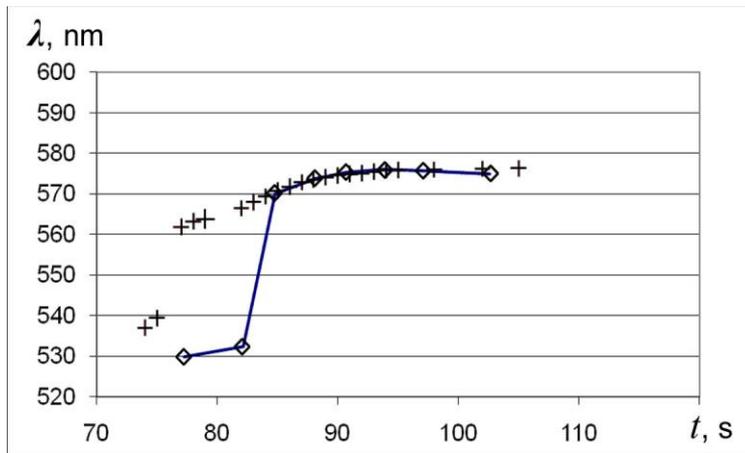


Рис. 17– Сравнительные результаты спектральных и колориметрических измерений переходов сенсора в одинаковое конечное состояние из разных начальных состояний: ◆ – данные колориметрических измерений, переход от уксусной кислоты к раствору сорбитола в фосфатном буфере; + – данные спектрометрических измерений, переход от фосфатного буфера к раствору сорбитола в фосфатном буфере

Fig. 17– Comparison of the results of spectral and colorimetric measurements of sensor transitions to the same final state from different initial states: ◆ – the colorimetric measurements, the transition from acetic acid to the solution of sorbitol in phosphate buffer; + – the data of spectrometric measurements, transition from phosphate buffer to sorbitol solution in phosphate buffer

Колориметрический метод можно применять для цифровых изображений, полученных с помощью любых цифровых устройств: бытовых фотоаппаратов, смартфонов (рис. 18, предложение 2013 г.), WEB-камер, камер слежения, научных камер и т.п.

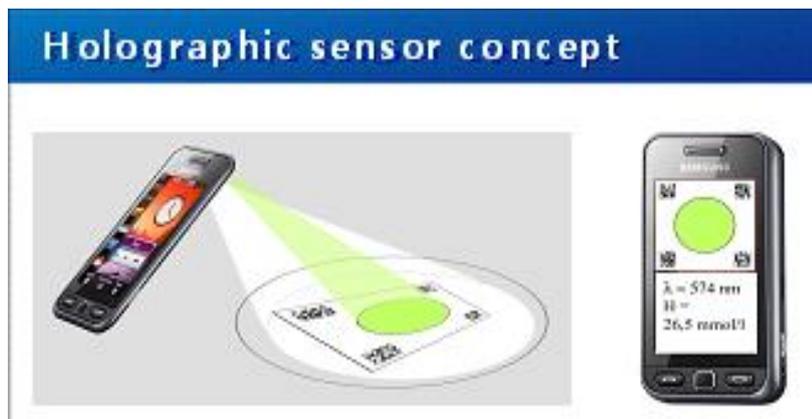


Рис. 18 – Крайский А.В., Постников В.А., Миронова Т.В. Предложения по использованию смартфона для регистрации длины волны отклика ГС и определения содержания аналита
Fig. 18 – Kraiski A.V., Postnikov V.A., Mironova T.V. Proposal to use a smartphone to record the wavelength of the holographic sensor response for the determination the concentration of an analyte

Смартфон в сочетании с дифракционной решеткой для считывания спектра применен в [34], при этом принцип работы был иным, поскольку с длиной волны связывалось положение пикселя в спектре, развернутом по пространству голографической решеткой, то есть цифровой приемник смартфона использовался просто как пространственно-чувствительный датчик.

Другой, чисто цветовой принцип работы смартфона, был использован в [35].

Стандартный колориметрический способ – поставить в соответствие цвет на фотографии сенсора со степенью его набухания, то есть с концентрацией исследуемого вещества – был недавно предложен в [36]. В этом случае сначала исправляют полученное изображение, добиваясь его линейности и однородности с помощью характеристических данных для конкретной камеры. Затем полученные с сенсора данные (RGB) пересчитываются в приборно-независимую цветовую модель CIEXYZ. Далее происходит пересчет данных в цветовые пространства RGB, HSI и CIE_L_a_b для их визуализации, а после эти данные

используют для измерений исследуемого раствора. В [36] приведены сведения по зависимости цвета сенсора от кислотности аналита.

6. Заключение

Голографические сенсоры – это новый класс диагностических устройств, проходящий этап усовершенствования и дальнейшей разработки. ГС могут применяться для анализа состава различных веществ (жидких и газообразных) – например, уже разработаны сенсоры для определения кислотности водных растворов (рН от 2 до 8); содержания ионов металлов (концентрация до 10^{-5} моль/л); содержания глюкозы в крови и в других биологических жидкостях (до 0,1 мкмоль/л); содержания сорбитола, мочевины, спор бактерий, метаболитов и т.д. При определении концентрации спирта диапазон 0 ÷ 47 % соответствует всему видимому диапазону отклика сенсора, тем самым чувствительность к концентрации может достигать сотых долей процента.



Имеются образцы сенсоров, работающих в газообразной среде и определяющих содержание горючих углеводородных газов в воздухе, а также влажность и температуру воздуха.

Следует отметить, что на стадии изготовления сенсоры можно перенастроить на различные типы аналитов путем внесения соответствующих изменений в состав гидрогелевой матрицы сенсора.

К достоинствам ГС можно отнести достаточно высокую точность и чувствительность, обратимость, возможность работы в реальном времени, невысокую стоимость. При этом сенсоры работают без добавления химических реагентов, при работе отсутствует выделение токсичных продуктов, то есть сенсоры высокоэкологичны.

В обзоре приведены данные по характеру поведения отклика сенсора в зависимости от концентрации для различных типов катионов. Эти данные позволяют надеяться на возможность не только определения интегральной концентрации солей в воде, но и дифференцирования содержания одно-, двух- и трехвалентных ионов.

Весьма перспективным кажется направление, связанное с измерениями концентрации глюкозы. Описанный в данной работе метод позволил измерить эффект уменьшения концентрации глюкозы в плазме крови в результате насыщения крови кислородом (12 %), что было невозможно сделать с помощью бытовых электронных глюкометров.

Кроме того, был подробно описан метод определения средней длины волны отраженного от сенсора света по цифровой фотографии поверхности сенсора. Пользование этим методом возможно благодаря тому, что отраженный свет имеет достаточно узкую спектральную ширину, порядка десятка нанометров. Для верификации колориметрического метода проведено сравнение результатов измерений с помощью оптоволоконного спектрометра и расчетов средней длины волны из данных, полученных на основе цифровых фотографий поверхности сенсора. Совпадение результатов позволяет применить колориметрический метод для одновременного анализа отклика сенсора по всей его поверхности. Это позволяет проводить многоканальные измерения либо одной жидкости на содержание различных веществ, либо, как это было реализовано на практике, одновременный анализ набора проб различного состава на концентрацию определенного вещества.

На основании опыта работы с глюкозой было установлено, что повысить чувствительность можно с помощью специфических для данного аналита реакций. В связи с этим при дальнейших разработках необходимо предусмотреть определение и других веществ, в частности, других важных компонентов биологических жидкостей. Это позволит создавать недорогие мощные, простые в эксплуатации, малогабаритные и легкие измерительные комплексы для применения в быту, в полевых условиях, на производстве и т.д., в частности, для решения экологиче-

ских проблем: мониторинга окружающей среды – как водных ресурсов, так и атмосферы.

Далее требуется детальное сравнение этих анализаторов с существующими на настоящий момент. В случае признания преимуществ этих ГС потребуется провести технологическую проработку производства и внедрения их в практику. При этом имеет смысл ставить конкретные задачи шире создания анализатора на одно вещество и проводить разработку комплексных анализаторов для ряда значимых в рамках конкретной задачи компонентов.

Список литературы

- [1] Hologram used as a sensor: WO Patent Application 1995026499 A1 / C.R. Lowe, R.B. Millington, J. Blyth, A.G. Mayes. – October 5, 1995.
- [2] Millington, R.B. Holographic sensor for Proteases / R.B. Millington [et al.] // *Anal. Chem.* – 1995. – Vol. 67. – P. 4229–4233.
- [3] Mayes, A.G. A holographic alcohol sensor / A.G. Mayes [et al.] // *Anal. Chem.* – 1999. – Vol. 71. – P. 3390–3396.
- [4] Toal, V. Introduction to Holography / V. Toal // CRC Press: Boca Raton. – FL, 2011. – 441 p.
- [5] Крайский, А.В. Голографические сенсоры для диагностики компонентов растворов/ А.В. Крайский, [и др.] // *Квант. электроника.* – 2010. – Т. 40. – № 2. С. 178–182.
- [6] Postnikov, V. A. Holographic Sensors for Detection of Components in Water Solutions / V.A. Postnikov; A.V. Kraiskii, V.I. Sergienko // in book “Holography – Basic Principles and Contemporary Applications”. – 2013. – Dr. Emilia Mihaylova (Ed.). – InTech. – Rijeka. – P. 103–128; DOI: 10.5772/53564
- [7] Mihaylova, E. Research on Holographic Sensors and Novel Photopolymers at the Centre for Industrial and Engineering Optics / E. Mihaylova [et al.] // in book “Holography – Basic Principles and Contemporary Applications”. – 2013. – Dr. Emilia Mihaylova (Ed.). – InTech. – Rijeka. – P. 89–102; DOI: 10.5772/56061.
- [8] Yetisen, A.K. Holographic Sensors: Three-Dimensional Analyte-Sensitive Nanostructures and Their Applications / A.K. Yetisen [et al.] // *Chem. Rev.* – 2014. – Vol. 114. – No. 20. – P. 10654–96.
- [9] Yetisen, A.K. Photonic hydrogel sensors / A.K. Yetisen [et al.] // *Biotechnol. Adv.* – 2016. – Vol. 34. – No. 3. – P. 250–271.
- [10] Zawadzka, M. Photonic Materials for Holographic Sensing / M. Zawadzka [et al.] // in M.J. Serpe (eds.), *Photonic Materials for Sensing, Biosensing and Display Devices*, Springer Series / M.J. Serpe [et al.] // in *Materials Science.* – 2016. – 229; DOI 10.1007/978-3-319-24990-2_11
- [11] Стеблина, Ю.В. Решение актуальных задач экспресс-диагностики [Электронный ресурс]. – Режим доступа:



https://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/c2f/stebalina-yuv_-ekspress_diagnostika.-rostov_na_donu-02-iyunya-2015.pdf Заглавие из документа. – (Дата обращения: 21.02.18).

[12] Holtz, J. Polymerized colloidal crystal hydrogel films as intelligent chemical sensing materials / J. Holtz, S. Asher // *Nature*. – 1997. – Vol. 389. – С. 829–832.

[13] In Vitro Diagnostics/IVD Market by Product, Application – Forecast to 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ivd-in-vitro-diagnostics-market-703.html>. Заглавие с экрана – (Дата обращения: 21.02.18).

[14] Крайский, А.А. Определение параметров голографического слоя по его спектральным характеристикам / А.А. Крайский, А.В. Крайский // *Квант. Электроника*. – 2016. – Т. 46. – № 6. – С. 558–566.

[15] Стаселько, Д.И. Юрий Николаевич Денисюк и трехмерная оптическая голография / Д.И. Стаселько // Как это было. Воспоминания создателей отечественной лазерной техники: Ч.3, под ред. И.Б.Ковш. – М.: «Лазерная ассоциация», 2011.

[16] Mayes, A.G. Metal Ion-Sensitive Holographic Sensors / A.G. Mayes [et al.] // *Anal. Chem.* – 2002. – Vol. 74. – No. 15. – P. 3649–3657; DOI: 10.1021/ac020131d

[17] Marshall, A.J. pH-Sensitive Holographic Sensors / A.J. Marshall [et al.] // *Anal. Chem.* – 2003. – Vol. 75. – No. 17. – P. 4423–4431; DOI: 10.1021/ac020730k

[18] Kabilan, S. Glucose-sensitive holographic sensors / S. Kabilan [et al.] // *J. Mol. Recognit.* – 2004. – Vol. 17. – P. 162–166; DOI:10.1002/jmr.663.

[19] Yang, X. Towards the real-time monitoring of glucose in tear fluid: Holographic glucose sensors with reduced interference from lactate and pH / X.Yang [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2008. – Vol. 23. – P. 899–905.

[20] Bhatta, D. Holographic sensors for the detection of bacterial spores / D. Bhatta [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2007. – Vol. 23. – Iss. 4. – P. 520–527.

[21] Marshall, A.J. Metabolite-Sensitive Holographic Biosensors / A.J. Marshall [et al.] // *Analytical Chemistry*. – 2004. – Vol. 76 (5). – P. 1518–1523.

[22] Lee, M.C. Glucose-Sensitive Holographic Sensors for Monitoring Bacterial Growth/ M.C. Lee [et al.] // *Analytical Chemistry*. – 2004. – Vol. 76. – No.19. – P. 5748–5755.

[23] Sartain, F.K. Holographic Lactate Sensor / F.K. Sartain, X. Yang, C.R. Lowe // *Analytical Chemistry*. – 2006. – Vol. 78. – No. 16. – P. 5664–5670; DOI: 10.1021/ac060416g.

[24] Martinez-Hurtado, J.L. Holographic Detection of Hydrocarbon Gases and Other Volatile Organic Compounds. / J.L. Martinez-Hurtado [et al.] // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26. – P. 15694–15699; DOI: 10.1021/la102693m.

[25] Naydenova, I. A visual indication of environmental humidity using a color changing hologram recorded in a self-developing photopolymer / I.Naydenova // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 031109; DOI:10.1063/1.2837454.

[26] Maxwell Garnett, J.C. Colours in metal glasses and in metallic films / J.C. Maxwell Garnett // *Phil. Trans. A*. – 1904. – Vol. 203. – P. 385–420.

[27] Maxwell Garnett, J.C. Colours in Metal Glasses, in Metallic Films, and in Metallic Solutions. II / J.C. Maxwell Garnett // *Phil. Trans. A*. – 1906. – Vol. 205. – P. 237–288.

[28] Постников, В.А. Голографические сенсоры для определения глюкозы в модельных средах и сыворотке крови / Постников В.А. [и др.] // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58. – № 11/3. – С. 58–60.

[29] Крайский, А.В. Голографические сенсоры для определения компонентов водных растворов / А.В. Крайский, В.А. Постников // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58. – № 11/3. – С. 40–42.

[30] Зайцева, Г.В. Эффекты уменьшения концентрации глюкозы в плазме крови после насыщения крови кислородом / Г.В. Зайцева [и др.] // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. – 2017. – Т. 44. – № 6. – С. 3.

[31] Крайский, А.В. Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов // *Квант. электроника*. – 2010. – Т. 40. – № 7. – С. 652–658.

[32] Крайский, А.В. Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в RAW-формате / А.В. Крайский, Т.В. Миронова, Т.Т. Султанов // *Квант. Электроника*. – 2012. – Т. 42. – № 12. – С. 1137–1139.

[33] Крайский, А.В. Оптические свойства голографических сенсоров и колориметрический способ определения длины волны узкополосного светового излучения / А.В. Крайский [и др.] // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58. – № 11/3. – С. 47–50.

[34] Gallegos, D. Label-free biodetection using a smartphone / D. Gallego [et al.] // *Lab. Chip*. – 2013. – Vol. 13. – P. 21–24; DOI: 10.1039/c3lc40991k

[35] Martinez-Hurtado, J.L. Multiplex Smartphone Diagnostics / J.L. Martinez-Hurtado, Ali K. Yetisen, Seok-Hyun Yun / Paul C. Guest (ed.). – *Multiplex Biomarker Techniques: Methods and Applications, Methods in Molecular Biology*. – 2017. – Vol. 1546; DOI 10.1007/978-1-4939-6730-8_26, © Springer Science+Business Media LLC.

[36] Khalili Moghaddam, G. Smartphone-based quantitative measurements on holographic sensors / G. Khalili Moghaddam, C.R. Lowe // *PLoS ONE* 12(11): e0187467. – 2017 [E-resource] – Available on: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187467>

References

[1] Lowe C.R., Millington R.B., Blyth J., Mayes A.G. Hologram used as a sensor: WO Patent Application 1995026499 A1 / – October 5, 1995.

[2] Millington R.B., Mayes A.G., Blyth J., Lowe C.R. Holographic sensor for Proteases. *Anal. Chem.*, 1995;67:4229–4233.



- [3] Mayes A.G., Blyth J., Kyrolloinen-Reay M., Millington R., Lowe C. A holographic alcohol sensor. *Anal. Chem.*, 1999;71:3390–3396.
- [4] Toal V. Introduction to Holography. CRC Press: Boca Raton, FL, 2011, 441 p.
- [5] Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Sultanov T.T., Khamidulin A.V. Holographic sensors for diagnostics of solution components (Golograficheskie sensory dlya diagnostiki komponentov rastvorov). *Quantum Electronics*, 2010;40(2):178–182 (in Russ.).
- [6] Postnikov V.A., Kraiskii A.V., Sergienko V.I. Holographic Sensors for Detection of Components in Water Solutions: in book “Holography – Basic Principles and Contemporary Applications”, 2013. – Dr. Emilia Mihaylova (Ed.). InTech. – Rijeka, pp. 103–128; DOI: 10.5772/53564.
- [7] Mihaylova E., Cody D., Naydenova I., Martin S., Toal V. Research on Holographic Sensors and Novel Photopolymers at the Centre for Industrial and Engineering Optics: in book “Holography – Basic Principles and Contemporary Applications”, 2013. – Dr. Emilia Mihaylova (Ed.). InTech. – Rijeka, pp. 89–102; DOI: 10.5772/56061.
- [8] Yetisen A.K., Naydenova I., da Cruz Vasconcellos F., Blyth J., Lowe C.R. Holographic Sensors: Three-Dimensional Analyte-Sensitive Nanostructures and Their Applications. *Chem. Rev.*, 2014;114(20):10654–96.
- [9] Yetisen A.K., Yetisen A.K., Butt H., Volpatti L. R., Pavlichenko I., Humar M., Kwok Sh.J.J., Koo H., Kim K.S., Naydenova I., Khademhosseini A., Hahn S.K., Yun S.H. Photonic hydrogel sensors. *Biotechnol. Adv.*, 2016;34(3):250–271.
- [10] Zawadzka M., Mikulchik T., Cody D., Martin S., Yetisen A.K., Martinez-Hurtado J.L., Butt H., Mihaylova E., Awala H., Mintova S., Yun S.H., Naydenova I. Photonic Materials for Holographic Sensing: in M.J. Serpe (eds.). Photonic Materials for Sensing, Biosensing and Display Devices, Springer Series. *Materials Science*. 2016;229; DOI 10.1007/978-3-319-24990-2_11.
- [11] Steblina Yu.V. Solution of urgent problems of express diagnostics (Reshenie aktual'nyh zadach ekspress-diagnostiki) [E-resource]. Available on: https://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/c2f/stebalina-yuv_-ekspress_diagnostika.-rostov_na_donu-02-iyunya-2015.pdf (21.02.18) (in Russ.).
- [12] Holtz J., Asher S. Polymerized colloidal crystal hydrogel films as intelligent chemical sensing materials. *Nature*, 1997;389:829–832.
- [13] In Vitro Diagnostics/IVD Market by Product, Application – Forecast to 2021 [E-resource]. – Available on: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ivd-in-vitro-diagnostics-market-703.html> (21.02.18).
- [14] Kraiskii A.A., Kraiskii A.V. Determination of the parameters of a holographic layer by its spectral characteristic (Opreделение parametrov golograficheskogo sloya po ego speltral'nam harakteristikam). *Quantum electron*, 2016;46(6):558–566; DOI: 10.1070/QEL14915 (in Russ.).
- [15] Staselko D.I. Yury Nikolaevich Denisyuk and three-dimensional optical holography (Yurii Nikolaevich Denisyuk i trekhmernaya opticheskaya golografiya) // Kak eto bylo. Vospominaniya sozdatelei otechestvennoi lazernoi tekhniki: Ch. 3 pod red. I.B. Kovsh. Moscow: Lazernaya assotsiatsiya, 2011 (in Russ.).
- [16] Mayes A.G., Blyth J., Davidson C.A.B., Lowe Ch.R. Metal Ion-Sensitive Holographic Sensors. *Anal. Chem.*, 2002;74(15):3649–3657; DOI: 10.1021/ac020131d.
- [17] Marshall A.J., Blyth J., Millington R.B., Lowe Ch.R. pH-Sensitive Holographic Sensors. *Anal. Chem.*, 2003;75(17): 4423–4431; DOI: 10.1021/ac020730k
- [18] Kabilan S., Blyth J., Lee M.C., Marshall A.J., Hussain A., Yang X.-P., Lowe C.R. Glucose-sensitive holographic sensors. *J. Mol. Recognit.*, 2004;17:162–166; DOI:10.1002/jmr.663.
- [19] Yang X., Pan X., Blyth J., Lowe C.R. Towards the real-time monitoring of glucose in tear fluid: Holographic glucose sensors with reduced interference from lactate and pH. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008;23:899–905.
- [20] Bhatta D., Christie G., Madrigal-Gonzalez B., Blyth J., Lowe C.R. Holographic sensors for the detection of bacterial spores. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007;23(4):520–527.
- [21] Marshall A.J., Young D.S., Blyth J., Kabilan S., Lowe Ch.R. Metabolite-Sensitive Holographic Biosensors. *Analytical Chemistry*, 2004;76(5):1518–1523.
- [22] Lee M.C., Kabilan S., Hussain A., Yang X., Blyth J., Lowe Ch.R. Glucose-Sensitive Holographic Sensors for Monitoring Bacterial Growth. *Analytical Chemistry*, 2004;76(19):5748–5755.
- [23] Sartain F.K., Yang X., Lowe C.R. Holographic Lactate Sensor. *Analytical Chemistry*, 2006;78(16):5664–5670; DOI: 10.1021/ac060416g.
- [24] Martinez-Hurtado J.L., Davidson C.A., Blyth J., Lowe C.R. Holographic Detection of Hydrocarbon Gases and Other Volatile Organic Compounds. *Langmuir*, 2010;26:15694–15699; DOI: 10.1021/la102693m.
- [25] Naydenova I., Jallapuram R., Toal V., Martin S. A visual indication of environmental humidity using a color changing hologram recorded in a self-developing photopolymer. *Appl. Phys. Lett.*, 2008;92:031109; DOI:10.1063/1.2837454.
- [26] Maxwell Garnett J.C. Colours in metal glasses and in metallic films. *Phil. Trans. A*, 1904;203:385–420.
- [27] Maxwell Garnett J.C. Colours in Metal Glasses, in Metallic Films, and in Metallic Solutions. II. *Phil. Trans. A*, 1906;205:237–288.
- [28] Postnikov V.A., Tikhonov V.E., Kraysky A.V., Shevchenko M.A., Sergienko V.I. Holographic sensors for determining glucose in model media and serum (Golograficheskie sensory dlya opredeleniya glyukozy v model'nykh sre-dakh i syvorotke krovi). *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015;58(11/3):58–60 (in Russ.).
- [29] Kraiskii A.V., Postnikov V.A. Holographic sensors for determining the components of aqueous solutions (Golograficheskie sensory dlya opredeleniya



komponentov vodnykh rastvorov). *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015;58(11/3):40–42 (in Russ.).

[30] Zaitseva G.V., Zaritsky A.R., Kirichenko M., Krasnov M.A., Krisky A.V., Postnikov V.A., Shevchenko M.A. Effects of decrease in glucose concentration in blood plasma after oxygen saturation of blood (Effekty umen'sheniya kontsentratsii glukozy v plazme krovi posle nasyshcheniya krovi kislorodom). *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN*, 2017;44(6):3 (in Russ.).

[31] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. Measurement of the surface wavelength distribution of narrow-band radiation by a colorimetric method (Izmenenie poverhnostnogo raspredeleniya dliny volny uzkopolostnogo izlucheniya kolorimetriceskim metodom). *Quantum Electronics*, 2010;40(7):652–658 (in Russ.).

[32] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. Narrow-band radiation wavelength measurement by processing digital photographs in RAW format (Izmenenie dliny volny uzkopolostnogo izlucheniya pri obrabotke tsifrovyykh fotografiiy v RAW-formate). *Quantum Electronics*, 2012;42(12):1137–1139 (in Russ.).

[33] Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Sultanov T.T., Mironova T.V., Kraiskii A.A., Shevchenko M.A. Optical properties of holographic sensors and colorimetric method for determining the wavelength of narrow-band light radiation (Opticheskie svoystva golograficheskikh sensorov i kolorimetriceskii sposob opredeleniya dliny volny uzkopolostnogo svetovogo izlucheniya). *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015;58(11/3):47–50 (in Russ.).

[34] Gallegos D., Long K.D., Yu H., Clark P.P., Lin Y., George Sh., Natha P., Cunningham B.T. Label-free biodetection using a smartphone. *Lab. Chip.*, 2013;13:21–24; DOI: 10.1039/c3lc40991k.

[35] Martinez-Hurtado J.L., Ali K. Yetisen, Seok-Hyun Yun Multiplex Smartphone Diagnostics. Paul C. Guest (ed.). – Multiplex Biomarker Techniques: Methods and Applications, *Methods in Molecular Biology*. – 2017, vol. 1546; DOI 10.1007/978-1-4939-6730-8_26, © Springer Science+Business Media LLC.

[36] Khalili Moghaddam G., Lowe C.R. Smartphone-based quantitative measurements on holographic sensors. *PLoS ONE*, 2017;12(11):e0187467. Available on: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187467>.

Транслитерация по BSI



**14-ое Совещание с международным участием
«Фундаментальные проблемы ионки твердого тела»
ФПИТТ-2018**

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в 14-ом Совещании с международным участием «Фундаментальные проблемы ионки твердого тела» (с 9 по 13 сентября 2018 г.), которое состоится в Научном центре г. Черноголовка Российской академии наук.

Совещания с международным участием «Фундаментальные проблемы ионки твердого тела» проводятся каждые два года и посвящены памяти основателя первой лаборатории твердых электролитов в России профессора Укше Евгения Александровича (1928–1993 гг.).

14-е Совещание посвящено 90-летию со дня рождения Укше Евгения Александровича.

Место проведения конференции: Корпус общего назначения (КОН) Института проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., просп. акад. Семенова, д. 1.

Официальный сайт мероприятия: <http://fpssi14.lssi.su/>

Во время проведения Совещания будет проходить II-ая Научная школа молодых ученых «Материалы для новых электрохимических источников энергии».

Список секций

В ходе Совещания ФПИТТ-2018 планируется обсудить следующие темы:

1. Ионные проводники: синтез, структура, свойства и механизмы переноса.
2. Электродные процессы и электрокатализ на межфазных границах.
3. Экспериментальные и теоретические методы исследования.
4. Практическое использование твердотельных электрохимических устройств.

<http://fpssi14.lssi.su/>



komponentov vodnykh rastvorov). *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015;58(11/3):40–42 (in Russ.).

[30] Zaitseva G.V., Zaritsky A.R., Kirichenko M., Krasnov M.A., Krisky A.V., Postnikov V.A., Shevchenko M.A. Effects of decrease in glucose concentration in blood plasma after oxygen saturation of blood (Effekty umen'sheniya kontsentratsii glukozy v plazme krovi posle nasyshcheniya krovi kislorodom). *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN*, 2017;44(6):3 (in Russ.).

[31] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. Measurement of the surface wavelength distribution of narrow-band radiation by a colorimetric method (Izmenenie poverhnostnogo raspredeleniya dliny volny uzkopolostnogo izlucheniya kolorimetriceskim metodom). *Quantum Electronics*, 2010;40(7):652–658 (in Russ.).

[32] Kraiskii A.V., Mironova T.V., Sultanov T.T. Narrow-band radiation wavelength measurement by processing digital photographs in RAW format (Izmenenie dliny volny uzkopolostnogo izlucheniya pri obrabotke tsifrovyykh fotografiiy v RAW-formate). *Quantum Electronics*, 2012;42(12):1137–1139 (in Russ.).

[33] Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Sultanov T.T., Mironova T.V., Kraiskii A.A., Shevchenko M.A. Optical properties of holographic sensors and colorimetric method for determining the wavelength of narrow-band light radiation (Opticheskie svoystva golograficheskikh sensorov i kolorimetriceskii sposob opredeleniya dliny volny uzkopolostnogo svetovogo izlucheniya). *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2015;58(11/3):47–50 (in Russ.).

[34] Gallegos D., Long K.D., Yu H., Clark P.P., Lin Y., George Sh., Natha P., Cunningham B.T. Label-free biodetection using a smartphone. *Lab. Chip.*, 2013;13:21–24; DOI: 10.1039/c3lc40991k.

[35] Martinez-Hurtado J.L., Ali K. Yetisen, Seok-Hyun Yun Multiplex Smartphone Diagnostics. Paul C. Guest (ed.). – Multiplex Biomarker Techniques: Methods and Applications, *Methods in Molecular Biology*. – 2017, vol. 1546; DOI 10.1007/978-1-4939-6730-8_26, © Springer Science+Business Media LLC.

[36] Khalili Moghaddam G., Lowe C.R. Smartphone-based quantitative measurements on holographic sensors. *PLoS ONE*, 2017;12(11):e0187467. Available on: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187467>.

Транслитерация по BSI



**14-ое Совещание с международным участием
«Фундаментальные проблемы ионки твердого тела»
ФПИТТ-2018**

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в 14-ом Совещании с международным участием «Фундаментальные проблемы ионки твердого тела» (с 9 по 13 сентября 2018 г.), которое состоится в Научном центре г. Черноголовка Российской академии наук.

Совещания с международным участием «Фундаментальные проблемы ионки твердого тела» проводятся каждые два года и посвящены памяти основателя первой лаборатории твердых электролитов в России профессора Укше Евгения Александровича (1928–1993 гг.).

14-е Совещание посвящено 90-летию со дня рождения Укше Евгения Александровича.

Место проведения конференции: Корпус общего назначения (КОН) Института проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., просп. акад. Семенова, д. 1.

Официальный сайт мероприятия: <http://fpssi14.lssi.su/>

Во время проведения Совещания будет проходить II-ая Научная школа молодых ученых «Материалы для новых электрохимических источников энергии».

Список секций

В ходе Совещания ФПИТТ-2018 планируется обсудить следующие темы:

1. Ионные проводники: синтез, структура, свойства и механизмы переноса.
2. Электродные процессы и электрокатализ на межфазных границах.
3. Экспериментальные и теоретические методы исследования.
4. Практическое использование твердотельных электрохимических устройств.

<http://fpssi14.lssi.su/>





ИНФОРМАЦИЯ

INFORMATION

МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCES

**Международная научно-техническая конференция
«Возобновляемая энергетика, энерго- и ресурсосбережение»**

4–6 октября 2018 г. на базе Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) состоится Международная научно-техническая конференция «Возобновляемая энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Конференция посвящена обсуждению современных достижений в области использования возобновляемых источников энергии, разработки, производства и применения энерго- и ресурсосберегающих оборудования и установок. Конференция организуется для обмена опытом, поддержки дискуссий и публикации результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ, проводимых отдельными учеными, высшими учебными заведениями, а также научно-исследовательскими и промышленными группами.

Тематические разделы конференции:

1. *Возобновляемая энергетика* (ветроэнергетика, ветропарки, автономные, сетевые и комбинированные ветроустановки; гидроэнергетика, малые ГЭС; фотовольтаика, солнечные коллекторы, концентраторы солнечной энергии; использование энергии приливов и отливов, установки и оборудование волновой энергетики; геотермальные электроэнергетические установки; гибридные установки на базе ВИЭ; системы управления и автоматизации установками возобновляемой энергетики).
2. *Малая и распределенная энергетика*. Возобновляемые источники энергии в промышленности и в современной городской инфраструктуре.
3. *Интеллектуальные системы электроснабжения*.
4. *Энергосбережение* устройствами силовой электроники, электрическими машинами, автоматизированными электроприводами и т.п.

Рабочие языки конференции – русский и английский. Язык публикаций – английский.

Труды конференции будут изданы в виде сборника трудов (полных статей) конференции, публикуемого в цифровой библиотеке «IEEE Xplore» (издательство Institute of Electrical and Electronics Engineers). Издание индексируется наукометрической базой Scopus.

Важные даты:

- последний срок приема докладов 30 июня 2018 г.;
- уведомление о включении докладов в программу до 1 августа 2018 г.;

Место проведения: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

Организаторы:

- Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск (сайт университета: www.susu.ru);
- Южно-Уральская группа IEEE.

Подробная информация о конференции размещена на сайте:

<http://uralcon.susu.ru>



РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

ADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT
COMPANIES AND MANUFACTURERS



Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики
«Глобальная энергия»

«6» июня 2018 г.

Международная премия за солнечную и теплоэнергетику. Ученые из России и Австралии стали лауреатами премии «Глобальная энергия» - 2018

6 июня 2018 года в Москве на официальной пресс-конференции были озвучены имена лауреатов Международной энергетической премии «Глобальная энергия».

В 2018 году высокой награды удостоены ученые из России и Австралии: академик Сергей Алексеенко – за разработки в области теплоэнергетики, которые позволяют создавать современное энергосберегающее оборудование, и профессор Мартин Грин – за технологии в фотовольтаике, повышающие экономичность и эффективность солнечных элементов.



Торжественное вручение премии состоится в октябре, в рамках Международного форума «Российская энергетическая неделя». Лауреаты 2018 года получают золотые медали, нагрудные значки, дипломы и поделят премиальный фонд в 39 млн. рублей.

Лауреаты 2018 года были определены 5 июня на заседании Международного комитета по присуждению премии «Глобальная энергия». До последней минуты информация держалась в секрете. В состав Международного комитета входят 20 экспертов из 13 стран мира. Его возглавляет известный британский ученый – лауреат Нобелевской премии **Родней Джон Аллам**. На пресс-конференции он подвел итоги XVI номинационного цикла, отметив, что в борьбе за звание лауреатов приняли участие 44 учёных из 14 стран. Говоря об основных областях исследований, он подчеркнул, что большая часть номинационных представлений приходится на область возобновляемой энергетики (34,09%). На втором месте – разведка, добыча, транспортировка и переработка топливно-энергетических ресурсов (15,91%). Исследования в области ядерной энергетики (13,64%) замыкают тройку лидеров. Традиционно впечатляет география конкурса: за победу боролись ученые из Европы, Северной Америки, Азии и Океании. При этом большинство номинантов (56%) – представители европейских государств.



Дополнил рассказ о премии член Международного комитета по ее присуждению, генеральный директор Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), **Аднан Амин**. Он отметил вклад «Глобальной энергии» в создание устойчивого будущего во благо всего человечества и готовность России использовать свой энергетический потенциал в области ВИЭ.

О важности научного сотрудничества, которое не имеет границ, рассказал **Рае Квон Чунг**, член Международного комитета по присуждению премии «Глобальная энергия», советник председателя группы лидеров и экспертов высокого уровня по проблемам воды и стихийным бедствиям при Генеральном Секретаре ООН.

Именно он сообщил лауреатам радостную новость об их победе во время телефонного звонка, который транслировался на всю аудиторию.

Первым о своей победе узнал **Сергей Алексеенко (Россия)** – академик РАН, эксперт в области теплофизики, энергетики и энергосбережения. Награда присуждается ему за подготовку теплофизических основ для создания современных энергетических и энергосберегающих технологий, которые позволяют проектировать экологически безопасные тепловые электростанции (за счет моделирования процессов горения газа, угля и жидкого топлива). Также они применяются при разработке новых типов горелок, методов термической переработки твердых бытовых отходов с целью генерирования тепловой энергии, при моделировании процессов

сжижения природного газа и разработке теплогидравлических стандартов безопасности атомных электростанций. Помимо этого, Сергей Алексеенко – инициатор развития петротермальной энергетики (использования высоких глубинных температур недр Земли). Ученый убежден, что эта энергия позволит обеспечить энергопотребности человечества навсегда.

Второй год подряд эксперты Международного комитета по присуждению премии отмечают разработки в области солнечной энергетики. **Мартин Грин (Австралия)** получит премию «Глобальная энергия» за исследования, разработки и образовательную деятельность в области фотовольтаики. Продажи систем, использующих солнечные элементы PERC, изобретенных Мартином Грином, превысили в конце 2016 года 4 млрд. долларов. Согласно данным Bloomberg New Energy Finance, совокупные продажи солнечных элементов, использующих его технологию, превысят 1 трлн. долларов США к 2040 году. Солнечные элементы PERC уже сейчас становятся коммерческим стандартом во всем мире. Согласно прогнозам, в ближайшее десятилетие элементы позволят сэкономить еще около 750 млн. долларов на производстве энергии только в одной Австралии.

Важность такого практического применения технологий и прикладную роль разработок лауреатов отметил **Олег Бударгин**, вице-председатель Мирового энергетического совета (МИРЭС), член Наблюдательного совета ассоциации «Глобальная энергия». Также он рассказал о новом технологическом цикле в энергетике, в котором роль науки, лауреатов премии «Глобальная энергия» и молодых ученых особенно важна. *«Наука и ученые сегодня – на передовом рубеже вхождения в новый технологический цикл. Этот цикл ставит перед собой важную задачу – повышение качества жизни человечества. И именно наука призвана стать локомотивом для нового образования и новых производств»*, – отметил эксперт.

Напомним, торжественное вручение премии «Глобальная энергия» состоится в рамках Международного форума «Российская энергетическая неделя» в начале октября 2018 года. Награду вручит президент РФ Владимир Путин или его официальный представитель.

Дополнительная информация:

Наталья Никитина +7 (903) 160-30-98; +7 (903) 137-98-21

NNikitina@newton-pr.ru

Наталья Наумова, +7 916 44 666 10, +7 495 739 54 35

naumova@ge-prize.org

Овсепян Лилиит, +7 910 460 19 92, +7 495 739 54 35

ovsepyan@ge-prize.org

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», ОАО «Сургутнефтегаз» и ПАО «ФСК ЕЭС». С 2003 года лауреатами премии стали 35 ученых из 11 стран: 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. Премияльный фонд в 2017 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

ENGINEERING
TOMORROW

Danfoss

Пресс-релиз

ООО

«Данфосс»

Дата: 30.03.2018

«Данфосс» переносит сборку частотных преобразователей в Россию

Сроки поставки оборудования заказчикам сократились в 15 раз.

После переноса в Россию процесса сборки мощных низковольтных частотных преобразователей Danfoss время их поставки заказчикам сократится с четырех-пяти недель до двух-трех дней. Новый производственный участок был запущен 30 марта 2018 года на предприятии компании в Истринском районе Подмосковья. Ежегодно здесь будет выпускаться более полутора тысяч единиц оборудования серий HVAC и AQUA Drive мощностью от 110 до 355 кВт, предназначенного для использования в водоснабжении, энергетике, системах вентиляции, холодильной технике, судостроении и нефтегазовой промышленности. В перспективе планируется расширение ассортимента российской сборки.

«Помимо существенного сокращения сроков поставки, мы ставили перед собой задачу повысить гибкость производства. Теперь у нас появилась возможность оперативно менять конфигурацию преобразователей частоты, вносить как аппаратные, так и программные изменения. Это позволит варьировать функционал оборудования в соответствии с пожеланиями заказчиков», — комментирует Андрей Попов, заместитель директора по R&D «Данфосс», ведущего мирового производителя энергосберегающего оборудования.

Как отмечает представитель компании, новый участок производства организован в полном соответствии с внедренным в 2015 году на предприятии «Данфосс» международным стандартом менеджмента качества ISO/TS 16949, разработанным Всемирной ассоциацией автопроизводителей (IATF). По сути, этот стандарт является верхней квалификационной ступенью в мировой системе менеджмента качества. Расширяя и ужесточая требования базового стандарта ISO 9001, он фактически исключает понятие производственного брака и вводит жесткий регламент работы для служб сервисной поддержки. Это гарантирует потребителю оперативное и квалифицированное сервисное обслуживание, независимо от географии применения оборудования.

На сегодняшний день каждый пятый проданный в России низковольтный частотный преобразователь имеет маркировку Danfoss. Благодаря локализации производства компания рассчитывает укрепить свои позиции на рынке. В частности, теперь она может поставлять оборудование в те отрасли и на те предприятия, которые могут использовать только продукцию отечественного производства. Ожидается, что первые собранные в России преобразователи частоты найдут свое применение в судостроении, водоснабжении и нефтегазовой отрасли.

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 году. 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.



Пост-релиз

В Москве прошла конференция ЭкоЭкспертов Schneider Electric

Москва 2 апреля 2018 г. – Компания Schneider Electric, мировой эксперт в управлении энергией и автоматизации, провела ежегодную конференцию партнеров в сфере систем управления зданиями, освещением и комфортом, а также систем энергоменеджмента и передачи данных, участвующих в программе EcoXpert™. Мероприятие состоялось 29 марта в отеле DoubleTree by Hilton Marina в Москве.



В рамках конференции лидеры компании Schneider Electric рассказали о стратегии и планах по выводу на рынок новых продуктов и систем, обсудили с гостями мировой и российский опыт участия в программе «ЭкоЭксперт». Так, о трендах и технологиях будущего рассказал вице-президент дивизионов «Здания и Экобизнес» и «Проекты через Партнеров» Алексей Кашаев, а о возможностях развития в рамках партнерской программы Schneider Electric – Ульяна Немова, лидер программы «ЭкоЭксперт» в России и СНГ.

В конференции также приняли участие приглашенные спикеры – руководители компаний ЭкоЭкспертов. Так, о своем опыте участия в программе рассказал Александр Сулягин «Лаборатория Комфорта», Новосибирск. А также об успешном проекте внедрения EcoStruxure Power Expert на российских АЗС рассказал Александр Федин, АйТи.Смарт Системы.

«ЭкоЭксперты разрабатывают и внедряют наиболее эффективные решения для широкого спектра зданий. Цель их работы – помочь заказчикам получать максимальную отдачу от бизнеса, найти лучшее решение вне зависимости от его сегмента. Мировая программа поддержки сети сертифицированных партнеров-ЭкоЭкспертов Schneider Electric доказала свою эффективность уже более чем в 40 странах мира и сегодня активно развивается в нашей стране», – отметила г-жа Немова.

Еще одной важной темой для обсуждений в рамках конференции стала стратегия систем энергоменеджмента на базе таких решений, как EcoStruxure Building и EcoStruxure Power. Это открытые платформы для управления зданиями и управления энергопотреблением с использованием Интернета вещей. Объединяя подключенное оборудование и программное обеспечение для интеллектуального, безопасного и комфортного управления, данные решения позволяют повысить энергоэффективность зданий на 30 %.



Также живой интерес экспертной аудитории вызвали доклады на темы интеллектуальных систем пожарной сигнализации, стратегий совершенствования систем автоматизации и безопасности, особенности современных систем управления освещением и комфортом, возможности структурированных кабельных систем. В настоящее время глобальная сеть ЭкоЭкспертов включает более 3 000 компаний, которые обеспечивают своих заказчиков эффективными, инновационными и интегрированными системами и техническими решениями при поддержке Schneider Electric. Все участники программы – профессионалы в одной или нескольких сферах экспертных знаний в области управления энергетическими ресурсами.

Schneider Electric – инновационный партнер конференции «Нефтехимия России и СНГ»

Москва 6 апреля 2018 г. – Компания Schneider Electric, мировой эксперт в управлении энергией и автоматизации, примет участие в 6-й ежегодной конференции «Нефтехимия России и СНГ» в статусе инновационного партнера. Мероприятие пройдет с 12 по 13 апреля в Москве, в отеле Four Seasons Москва (здание гостиницы «Москва»).

В рамках деловой программы первого дня конференции в пленарной дискуссии «Реализация конкурентных преимуществ региона в секторе нефтегазохимии» одним из докладчиков станет Борис Муратов, вице-президент подразделения «Промышленная автоматизация» компании Schneider Electric в России и СНГ. В своем выступлении он расскажет аудитории о глобальных трендах в развитии нефтегазохимии, о том, какими станут нефтегазовые компании в ближайшие 10 лет, как повысить рентабельность и конкурентоспособность региональных нефтехимических предприятий на мировом рынке. В ходе дискуссии аудитория обсудит роль государства и механизмы регулирования нефтегазохимического сектора сегодня, а также смещение фокуса в развитии нефтегазовых компаний с экспансии на эффективность.

Во второй день конференции выступит Ахмед Вафи, руководитель по развитию бизнеса нефтехимического сектора региона EMEA компании Schneider Electric. Он представит на суд профессиональной аудитории доклад об опыте внедрения инновационных технологий для повышения прибыльности промышленного производства этилена.

«Участие в конференции и поддержка мероприятия в качестве инновационного партнера – это прекрасная возможность для Schneider Electric не только обсудить насущные вопросы нефтегазохимической отрасли России и СНГ, но и поделиться с коллегами мировым опытом реализации успешных проектов нашей компании. Наша цель – показать, что инновационные решения и интеллектуальные предприятия уже стали необходимой реальностью. Системное внедрение передовых цифровых технологий – обязательное условие обеспечения должного уровня инвестиционной и операционной эффективности компаний нефтегазохимической отрасли в эпоху ее опережающего развития», – уверен Борис Муратов.

Шестой год подряд конференция «Нефтехимия России и СНГ» освещает актуальные проекты в области финансирования, управления капитальным строительством и модернизации производства, а также повышения операционной эффективности и внедрения передовых технологий для отраслевых предприятий.

О компании Schneider Electric

Schneider Electric находится на передовой цифровой трансформации в сферах управления энергией и автоматизации для жилых домов, зданий, центров обработки данных, инфраструктуры и промышленности.

Присутствие в более чем 100 странах мира позволяет Schneider Electric быть бесспорным лидером в области управления электроэнергией (низкое и среднее напряжение, бесперебойное энергоснабжение) и систем автоматизации. Мы предлагаем эффективные интегрированные решения, объединяющие управление энергией, автоматизацию и программное обеспечение.

В экосистему Schneider Electric входит крупнейшая сеть партнеров, интеграторов и разработчиков, вместе с которыми на базе открытой платформы решений Schneider Electric мы обеспечиваем операционную эффективность и управление в режиме реального времени.

Мы уверены, что наши уникальные специалисты и партнеры делают Schneider Electric уникальной компанией, а наша приверженность инновациям, диверсификации и принципам устойчивого развития делает жизнь ярче - везде, всегда и для всех. Мы, в Schneider Electric, называем это Life Is On.

www.schneider-electric.com/ru



Контакты:

**Менеджер по связям с общественностью
Schneider Electric в России и СНГ
Ольга Тура**

Телефон:
+7 (495) 777-9990 ext. 1051
+7 916 884 7417
Email: Olga.Tura@schneider-electric.com

**Контакты PR-агентства:
Анна Ключник**

Телефон:
+7 (495) 974-22-62 ext. 1402
+7 (903) 594-51-01
Email: Klyuchnik@skc-agency.ru



191123 Россия
Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., д. 37А
Пресс-центр
Тел.: +7 (812) 643-60-63
tass_spb@tass.ru
tass.ru

Анонс Пресс-центра

Экологический фестиваль «Меридиан надежды» 2018

4 апреля (среда)

В ТАСС (г. Санкт-Петербург) состоится пресс-конференция, посвященная VIII Всероссийскому экологическому кинофестивалю «Меридиан надежды».

О программе кинофестиваля, составе жюри, этапах отбора фильмов, а также мастер-классах для детей расскажут директор Всероссийского экологического кинофестиваля «Меридиан надежды», член Союза кинематографистов России **Наталья Уложенко**, помощник начальника Департамента Росприроднадзора по СЗФО **Гульнара Гудулова**.

Кинопоказ фильмов будет проходить в Санкт-Петербурге и Ленинградской области с 9 по 13 апреля.

Вход на мероприятие представителей СМИ осуществляется по предварительной аккредитации при наличии паспорта и/или редакционного удостоверения.

Справки и аккредитация:

+7 (812) 643-60-63

tass_spb@tass.ru

Адрес:

Санкт-Петербург, Шпалерная, 37А



10 из 55 проектов многофункционального ЖК вышли в национальный финал конкурса
«Проектирование мультикомфортного дома-2018»

Пресс-релиз

Москва, 3 апреля 2018 года



3 апреля завершился национальный полуфинал конкурса «Проектирование мультикомфортного дома – 2018». В этом году он проходил в формате онлайн с предварительным отбором среди более 450 участников и 55 работ. В рамках полуфинала жюри и организаторы конкурса ISOVER (подразделение «Сен-Гобен») оценили 49 проектов из 20 архитектурных и строительных вузов 15 городов России. В финал прошло только 10.

«В этом году на конкурс поступило множество достойных, проработанных и интересных архитектурных проектов по созданию многофункционального жилого комплекса на территории культурной деревни города Дубай, – комментирует Наталия Чупыра, лидер национального этапа международного конкурса, член комитета по энергоэффективности Ассоциации Европейского Бизнеса, руководитель направления «Энергоэффективность и зеленое строительство» Saint-Gobain ISOVER, LEED Green Associated. – Отбор был многосторонним и сложным. В результате голосования эксперты в области архитектуры, строительной физики, зеленого, пассивного и энергоэффективного строительства отобрали 10 лучших проектов-претендентов на победу в национальном финале, который пройдет в Москве 19 апреля 2018».

Ими стали:

№ команды	Название команды	Город	вуз
5	Archteam	Волгоград	Волгоградский государственный технический университет Институт архитектуры и строительства
6	Sputnik	Воронеж	Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
12	BASA	Томск	Томский государственный архитектурно-строительный университет
14	OLMA259	Самара	Самарский Государственный Технический Университет
41	PGUAS ARCH	Пенза	Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
43	ARCH41	Пенза	Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
50	TOP	Ростов-на -Дону	Южный федеральный университет
141	2+1	Екатеринбург	Уральский федеральный университет
145	DL	Москва	Московский государственный строительный университет
261	AIDA	Казань	Казанский государственный архитектурно строительный университет

Команды, вышедшие в национальный финал, будут бороться за возможность представлять Россию на международном финале в Объединённых Арабских Эмиратах. Помимо бесценного опыта, который получают будущие архитекторы во время участия в конкурсе, победители национального финала получают денежное вознаграждение от организаторов и специальные призы от партнёров конкурса.

В этом году официальными партнерами российского этапа стали Совет по «зеленому» строительству», компания «Графисофт СЕ» (GRAPHISOFT), представляющая бренд ARCHICAD, и компания «Бош Термотехника», представляющая бренд Bosch, а в состав жюри вошли ведущие специалисты в области архитектуры и строительства.

В этом году ещё одним постоянным членом жюри конкурса стал Никита Токарев, член правления Союза Московских Архитекторов. Окончил МАрхИ в 1994 году, в 1997 году прошел стажировку в «Институте жилища и городского развития» (Роттердам). В 1997–2012 гг. преподавал в МАрхИ, доцент. В 2000–2012 гг. – руководитель архитектурного бюро PANACOM. С 2012 года и по настоящее время является директором Архитектурной школы МАрШ, преподавателем модуля «Профессиональная практика». Автор более 50 публикаций в профессиональной прессе.

Получить более подробную информацию можно на сайте конкурса: <http://www.isover-students.ru>

О КОМПАНИИ «СЕН-ГОБЕН»

«Сен-Гобен» разрабатывает, производит и поставляет высококачественные материалы и решения, которые помогают улучшить условия жизни каждого человека и общества в целом. Продукция «Сен-Гобен» находит широкое применение в самых разных сферах: в жилых домах, на транспорте, в элементах инфраструктуры и во многих отраслях промышленности. Комфорт, безопасность и безупречные характеристики материалов незаменимы при решении задач экологически устойчивого строительства, эффективного использования ресурсов и противодействия изменению климата. Мировой лидер в создании комфортного пространства.

В 2016 году ОБЪЕМ ПРОДАЖ «Сен-Гобен» составил 39,1 млрд евро. Группа имеет представительства в 67 странах мира.

В штате – более 170 000 сотрудников.

www.saint-gobain.com

О ПОДРАЗДЕЛЕНИИ ISOVER:

ISOVER – мировой эксперт в утеплении и защите от шума. Уже 80 лет продукцию ISOVER выпускают в соответствии с мировым стандартом качества более 40 заводов в разных странах мира.

Продукция ISOVER обеспечивает эффективную защиту от холода и шума, повышает комфорт и энергоэффективность дома, сокращает затраты на его эксплуатацию.

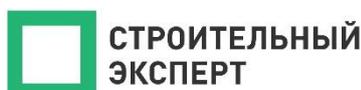
ISOVER неоднократно отмечен премией Правительства г. Москвы «Берегите энергию!» в номинации «Технология года» и имеет самые высокие баллы за экологичность выпускаемой продукции, отмеченной двумя экомаркировками.

За 25 лет ISOVER стал ведущим игроком на российском рынке строительных материалов и заслужил доверие и уважение миллионов людей.

Контакты для СМИ:

Ксения Кононова
kkoonova@pr-consulta.ru
+7 (495) 641-22-09

GRAPHISOFT
A NEMETSCHEK COMPANY



Пресс-релиз

03/04/2018

В Новосибирске открылся региональный офис концерна BASF Курс на расширение присутствия в регионах

Новосибирск, Россия. – 3 апреля 2018 года состоялось открытие регионального офиса концерна BASF, ведущего мирового производителя строительной химии. Это событие стало следующим этапом реализации стратегии расширения присутствия в Сибирском, Уральском и Дальневосточном федеральных округах.

«В Сибири хорошо развита дилерская сеть, наличие офиса и присутствие наших сотрудников в регионе позволит ещё лучше понимать потребности клиентов, оперативно реагировать на запросы и предлагать решения конкретных задач в области строительства, стоящих перед нашими заказчиками, – комментирует Сергей Ветлов, генеральный директор компании «BASF Строительные системы». – Таким образом, мы сделали ещё один шаг на пути реализации нашей стратегии присутствия в России».

В региональном офисе работают специалисты, которые предлагают комплексные решения и технологии для строительства, ремонта и реконструкции зданий и сооружений, а также техническую поддержку на объектах. При этом взаимодействие с заказчиками предполагает предварительную экспертизу с выездом на место, подбор рецептур с учётом особенностей сырья (в случае необходимости) и обучение.

У компании уже накоплен большой опыт работы в регионе на крупнейших инфраструктурных объектах, таких как Саяно-Шушенская ГЭС, Братский ЦБК, с развлекательными центрами, например с аквапарком



191123 Россия
Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., д. 37А
Пресс-центр
Тел.: +7 (812) 643-60-63
tass_spb@tass.ru
tass.ru

Анонс Пресс-центра

Экологический фестиваль «Меридиан надежды» 2018

4 апреля (среда)

В ТАСС (г. Санкт-Петербург) состоится пресс-конференция, посвященная VIII Всероссийскому экологическому кинофестивалю «Меридиан надежды».

О программе кинофестиваля, составе жюри, этапах отбора фильмов, а также мастер-классах для детей расскажут директор Всероссийского экологического кинофестиваля «Меридиан надежды», член Союза кинематографистов России **Наталья Уложенко**, помощник начальника Департамента Росприроднадзора по СЗФО **Гульнара Гудулова**.

Кинопоказ фильмов будет проходить в Санкт-Петербурге и Ленинградской области с 9 по 13 апреля.

Вход на мероприятие представителей СМИ осуществляется по предварительной аккредитации при наличии паспорта и/или редакционного удостоверения.

Справки и аккредитация:

+7 (812) 643-60-63

tass_spb@tass.ru

Адрес:

Санкт-Петербург, Шпалерная, 37А



10 из 55 проектов многофункционального ЖК вышли в национальный финал конкурса «Проектирование мультикомфортного дома-2018»

Пресс-релиз

Москва, 3 апреля 2018 года



3 апреля завершился национальный полуфинал конкурса «Проектирование мультикомфортного дома – 2018». В этом году он проходил в формате онлайн с предварительным отбором среди более 450 участников и 55 работ. В рамках полуфинала жюри и организаторы конкурса ISOVER (подразделение «Сен-Гобен») оценили 49 проектов из 20 архитектурных и строительных вузов 15 городов России. В финал прошло только 10.

О ПОДРАЗДЕЛЕНИИ ISOVER:

ISOVER – мировой эксперт в утеплении и защите от шума. Уже 80 лет продукцию ISOVER выпускают в соответствии с мировым стандартом качества более 40 заводов в разных странах мира.

Продукция ISOVER обеспечивает эффективную защиту от холода и шума, повышает комфорт и энергоэффективность дома, сокращает затраты на его эксплуатацию.

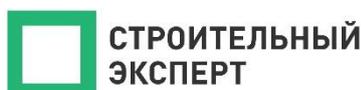
ISOVER неоднократно отмечен премией Правительства г. Москвы «Берегите энергию!» в номинации «Технология года» и имеет самые высокие баллы за экологичность выпускаемой продукции, отмеченной двумя экомаркировками.

За 25 лет ISOVER стал ведущим игроком на российском рынке строительных материалов и заслужил доверие и уважение миллионов людей.

Контакты для СМИ:

Ксения Кононова
kkoonova@pr-consulta.ru
+7 (495) 641-22-09

GRAPHISOFT
A NEMETSCHEK COMPANY



Пресс-релиз

03/04/2018

В Новосибирске открылся региональный офис концерна BASF Курс на расширение присутствия в регионах

Новосибирск, Россия. – 3 апреля 2018 года состоялось открытие регионального офиса концерна BASF, ведущего мирового производителя строительной химии. Это событие стало следующим этапом реализации стратегии расширения присутствия в Сибирском, Уральском и Дальневосточном федеральных округах.

«В Сибири хорошо развита дилерская сеть, наличие офиса и присутствие наших сотрудников в регионе позволит ещё лучше понимать потребности клиентов, оперативно реагировать на запросы и предлагать решения конкретных задач в области строительства, стоящих перед нашими заказчиками, – комментирует Сергей Ветлов, генеральный директор компании «BASF Строительные системы». – Таким образом, мы сделали ещё один шаг на пути реализации нашей стратегии присутствия в России».

В региональном офисе работают специалисты, которые предлагают комплексные решения и технологии для строительства, ремонта и реконструкции зданий и сооружений, а также техническую поддержку на объектах. При этом взаимодействие с заказчиками предполагает предварительную экспертизу с выездом на место, подбор рецептур с учётом особенностей сырья (в случае необходимости) и обучение.

У компании уже накоплен большой опыт работы в регионе на крупнейших инфраструктурных объектах, таких как Саяно-Шушенская ГЭС, Братский ЦБК, с развлекательными центрами, например с аквапарком

«Аквамир», где применялись системы укладки плитки, позволившие на шесть месяцев раньше сдать комплекс в эксплуатацию. Потенциал региона также подтверждается и числом крупнейших строек, к которым можно отнести возведение четвёртого моста через Обь, ледовой арены, претендующей на проведение молодёжного чемпионата мира по хоккею, строительство спортивных объектов к проведению Зимней универсиады – 2019 в Красноярске, модернизацию Омского НПЗ.

«Мы уже поставляем наши решения значимым локальным клиентам, и новый этап работы, связанный с открытием офиса, позволит внести ощутимый вклад в развитие всего региона», – добавляет Сергей Ветлов

Учитывая многолетний опыт и научную базу, BASF готов участвовать в самых сложных проектах. Решения концерна успешно зарекомендовали себя на ответственных объектах, таких как Западный скоростной диаметр в Санкт-Петербурге, Золотой мост во Владивостоке. Также на счету компании участие в строительстве спортивных объектов международного уровня в Красноярске, Екатеринбурге, Казани, Сочи и др. городах.

Подразделение строительной химии Master Builders Solutions имеет производственный комплекс в Московской области, заводы в Казани и Санкт-Петербурге. Открытие офиса в Новосибирске позволит BASF точно оценить потенциал Сибирского федерального округа и проанализировать возможности оптимизации логистики, сокращения издержек и транспортных расходов.

О подразделении строительной химии

Подразделение строительной химии концерна BASF под брендом Master Builders Solutions предлагает передовые решения для нового строительства, а также для техобслуживания, ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Эти решения создаются на основе более чем 100-летнего опыта работы в строительной отрасли. Широкий портфель разработок охватывает добавки в бетон и цемент, химические решения для подземного строительства, системы гидроизоляции, герметики, ремонтные и защитные смеси, высококачественные строительные растворы, подливки под оборудование, напольные покрытия, плиточный клей, деформационные швы, а также решения для защиты древесины и др. Численность персонала подразделения строительной химии составляет около 6500 человек. Для того чтобы комплексно (от разработки концепции до практического осуществления проекта) решать конкретные задачи, стоящие перед нашими заказчиками, мы объединяем компетенции по различным регионам и направлениям деятельности и используем опыт, накопленный в процессе реализации многочисленных строительных проектов по всему миру. Мы опираемся на технологии BASF и на глубокое знание потребностей строительной отрасли в том или ином регионе для разработки решений, способствующих успешному бизнесу заказчиков и продвижению рациональных подходов к строительству.

Производственные площадки и центры продаж подразделения строительной химии расположены более чем в 60 странах мира. Оборот по итогам 2017 года составил около 2,4 млрд евро. С дополнительной информацией можно ознакомиться на веб-сайте по адресу: www.master-builders-solutions.basf.com.

О концерне BASF

BASF создаёт химию в целях устойчивого будущего. В своей деятельности мы сочетаем экономические успехи с бережным отношением к окружающей среде и социальной ответственностью. Сотрудники группы BASF, общая численность которых составляет около 115 тысяч человек, вносят вклад в успешное развитие бизнеса наших клиентов в различных индустриях практически во всех странах мира. Структура нашего бизнеса включает пять основных сегментов: химикаты, специальные продукты, функциональные материалы и решения, решения для сельского хозяйства, нефть и газ. По итогам 2017 года объём продаж BASF составил около 64,5 млрд евро. Акции BASF торгуются на фондовых биржах во Франкфурте (BAS), Лондоне (BFA) и Цюрихе (BAS). Более подробная информация о концерне BASF представлена на сайте: www.basf.com.

Лилия Лебедева:
моб.: +7 (926) 883-95-23,
press@basf-press.com

Дарья Ткачёва:
моб.: +7 (917) 556-82-52,
darya.tkacheva@basf.com

BASF
Media Relations:
125167, Москва, Ленинградский
проспект, 37А-4,
тел.: +7 (495) 225-64-36



Global Renewable Generation Continues its Strong Growth, New IRENA Capacity Data Shows

Sector adds record 167 gigawatts (GW) of generating capacity, expands 8.3% in 2017

Abu Dhabi, UAE, 05 April 2018 – By the end of 2017, global renewable generation capacity increased by 167 GW and reached 2,179 GW worldwide. This represents a yearly growth of around 8.3%, the average for seven straight years in a row, according to new data released by the International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Capacity Statistics 2018 is the most comprehensive, up-to-date and accessible figures on renewable energy capacity statistics. It contains nearly 15,000 data points from more than 200 countries and territories.

“This latest data confirms that the global energy transition continues to move forward at a fast pace, thanks to rapidly falling prices, technology improvements and an increasingly favourable policy environment, said IRENA Direc-

«Аквамир», где применялись системы укладки плитки, позволившие на шесть месяцев раньше сдать комплекс в эксплуатацию. Потенциал региона также подтверждается и числом крупнейших строек, к которым можно отнести возведение четвёртого моста через Обь, ледовой арены, претендующей на проведение молодёжного чемпионата мира по хоккею, строительство спортивных объектов к проведению Зимней универсиады – 2019 в Красноярске, модернизацию Омского НПЗ.

«Мы уже поставляем наши решения значимым локальным клиентам, и новый этап работы, связанный с открытием офиса, позволит внести ощутимый вклад в развитие всего региона», – добавляет Сергей Ветлов

Учитывая многолетний опыт и научную базу, BASF готов участвовать в самых сложных проектах. Решения концерна успешно зарекомендовали себя на ответственных объектах, таких как Западный скоростной диаметр в Санкт-Петербурге, Золотой мост во Владивостоке. Также на счету компании участие в строительстве спортивных объектов международного уровня в Красноярске, Екатеринбурге, Казани, Сочи и др. городах.

Подразделение строительной химии Master Builders Solutions имеет производственный комплекс в Московской области, заводы в Казани и Санкт-Петербурге. Открытие офиса в Новосибирске позволит BASF точно оценить потенциал Сибирского федерального округа и проанализировать возможности оптимизации логистики, сокращения издержек и транспортных расходов.

О подразделении строительной химии

Подразделение строительной химии концерна BASF под брендом Master Builders Solutions предлагает передовые решения для нового строительства, а также для техобслуживания, ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Эти решения создаются на основе более чем 100-летнего опыта работы в строительной отрасли. Широкий портфель разработок охватывает добавки в бетон и цемент, химические решения для подземного строительства, системы гидроизоляции, герметики, ремонтные и защитные смеси, высококачественные строительные растворы, подливки под оборудование, напольные покрытия, плиточный клей, деформационные швы, а также решения для защиты древесины и др. Численность персонала подразделения строительной химии составляет около 6500 человек. Для того чтобы комплексно (от разработки концепции до практического осуществления проекта) решать конкретные задачи, стоящие перед нашими заказчиками, мы объединяем компетенции по различным регионам и направлениям деятельности и используем опыт, накопленный в процессе реализации многочисленных строительных проектов по всему миру. Мы опираемся на технологии BASF и на глубокое знание потребностей строительной отрасли в том или ином регионе для разработки решений, способствующих успешному бизнесу заказчиков и продвижению рациональных подходов к строительству.

Производственные площадки и центры продаж подразделения строительной химии расположены более чем в 60 странах мира. Оборот по итогам 2017 года составил около 2,4 млрд евро. С дополнительной информацией можно ознакомиться на веб-сайте по адресу: www.master-builders-solutions.basf.com.

О концерне BASF

BASF создаёт химию в целях устойчивого будущего. В своей деятельности мы сочетаем экономические успехи с бережным отношением к окружающей среде и социальной ответственностью. Сотрудники группы BASF, общая численность которых составляет около 115 тысяч человек, вносят вклад в успешное развитие бизнеса наших клиентов в различных индустриях практически во всех странах мира. Структура нашего бизнеса включает пять основных сегментов: химикаты, специальные продукты, функциональные материалы и решения, решения для сельского хозяйства, нефть и газ. По итогам 2017 года объём продаж BASF составил около 64,5 млрд евро. Акции BASF торгуются на фондовых биржах во Франкфурте (BAS), Лондоне (BFA) и Цюрихе (BAS). Более подробная информация о концерне BASF представлена на сайте: www.basf.com.

Лилия Лебедева:
моб.: +7 (926) 883-95-23,
press@basf-press.com

Дарья Ткачёва:
моб.: +7 (917) 556-82-52,
darya.tkacheva@basf.com

BASF
Media Relations:
125167, Москва, Ленинградский
проспект, 37А-4,
тел.: +7 (495) 225-64-36



Global Renewable Generation Continues its Strong Growth, New IRENA Capacity Data Shows

Sector adds record 167 gigawatts (GW) of generating capacity, expands 8.3% in 2017

Abu Dhabi, UAE, 05 April 2018 – By the end of 2017, global renewable generation capacity increased by 167 GW and reached 2,179 GW worldwide. This represents a yearly growth of around 8.3%, the average for seven straight years in a row, according to new data released by the International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Capacity Statistics 2018 is the most comprehensive, up-to-date and accessible figures on renewable energy capacity statistics. It contains nearly 15,000 data points from more than 200 countries and territories.

“This latest data confirms that the global energy transition continues to move forward at a fast pace, thanks to rapidly falling prices, technology improvements and an increasingly favourable policy environment, said IRENA Direc-

tor-General Adnan Z. Amin. “Renewable energy is now the solution for countries looking to support economic growth and job creation, just as it is for those seeking to limit carbon emissions, expand energy access, reduce air pollution and improve energy security.”

“Despite this clear evidence of strength in the power generation sector, a complete energy transformation goes beyond electricity to include the end-use sectors of heating, cooling and transportation, where there is substantial opportunity for growth of renewables,” Mr. Amin added.

Solar photovoltaics (PV) grew by a whopping 32% in 2017, followed by wind energy, which grew by 10%. Underlying this growth are substantial cost reductions, with the levelised cost of electricity from solar PV decreasing by 73%, and onshore wind by nearly one-quarter, between 2010 and 2017. Both technologies are now well within the cost range of power generated by fossil fuels.

China continued to lead global capacity additions, installing nearly half of all new capacity in 2017. 10% of all new capacity additions came from India, mostly in solar and wind. Asia accounted for 64% of new capacity additions in 2017, up from 58% last year. Europe added 24 GW of new capacity in 2017, followed by North America with 16 GW. Brazil set itself on a path of accelerated renewables deployment, installing 1 GW of solar generation, a ten-fold increase from the previous year.

Off-grid renewables capacity saw unprecedented growth in 2017, with an estimated 6.6 GW serving off-grid customers. This represents a 10% growth from last year, with around 146 million people now using off-grid renewables.

Highlights by technology:

Hydropower: The amount of new hydro capacity commissioned in 2017 was the lowest seen in the last decade. Brazil and China continued to account for most of this expansion (12.4 GW or 60% of all new capacity). Hydro capacity also increased by more than 1 GW in Angola and India.

Wind energy: Three-quarters of new wind energy capacity was installed in five countries: China (15 GW); USA (6 GW); Germany (6 GW); UK (4 GW); and India (4 GW). Brazil and France also installed more than 1 GW.

Bioenergy: Asia continued to account for most of the increase in bioenergy capacity, with increases of 2.1 GW in China, 510 MW in India and 430MW in Thailand. Bioenergy capacity also increased in Europe (1.0 GW) and South America (0.5 GW), but the increase in South America was relatively low compared to previous years.

Solar energy: Asia continued to dominate the global solar capacity expansion, with a 72 GW increase. Three countries accounted for most of this growth, with increases of 53 GW (+68%) in China, 9.6 GW (+100%) in India and 7 GW (+17%) in Japan. China alone accounted for more than half of all new solar capacity installed in 2017. Other countries that installed more than 1 GW of solar in 2017 included: USA (8.2 GW); Turkey (2.6 GW); Germany (1.7 GW); Australia (1.2 GW); South Korea (1.1 GW); and Brazil (1 GW).

Geothermal energy: Geothermal power capacity increased by 644 MW in 2017, with major expansions in Indonesia (306 MW) and Turkey (243 MW). Turkey passed the level of 1 GW geothermal capacity at the year-end and Indonesia is fast approaching 2 GW.

Download Renewable Capacity Statistics 2018

Total Renewable Power Generation Capacity, 2011-2017

###

About the International Renewable Energy Agency (IRENA)

The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation that supports countries in their transition to a sustainable energy future, and serves as the principal platform for international co-operation, a centre of excellence, and a repository of policy, technology, resource and financial knowledge on renewable energy. With 156 Members (155 States and the European Union) and 24 additional countries in the accession process and actively engaged, IRENA promotes the widespread adoption and sustainable use of all forms of renewable energy, including bioenergy, geothermal, hydropower, ocean, solar and wind energy, in the pursuit of sustainable development, energy access, energy security and low-carbon economic growth and prosperity.

www.irena.org

Contact information: Timothy Hurst, Chief Communications Officer, IRENA, thurst@irena.org; +971 2 417 9000

Stay in touch with IRENA: www.twitter.com/irena and www.facebook.com/irena.org

Гринпис России представил в ООН доклад о том, как добыча и транспортировка ископаемого топлива угрожают российской природе и коренным жителям

11–13 апреля в Женеве проходит предварительная сессия Универсального периодического обзора ООН. Эта структура – часть Совета по правам человека ООН и она предоставляет возможность каждой стране информировать ООН о предпринятых ею мерах в этой сфере.

tor-General Adnan Z. Amin. “Renewable energy is now the solution for countries looking to support economic growth and job creation, just as it is for those seeking to limit carbon emissions, expand energy access, reduce air pollution and improve energy security.”

“Despite this clear evidence of strength in the power generation sector, a complete energy transformation goes beyond electricity to include the end-use sectors of heating, cooling and transportation, where there is substantial opportunity for growth of renewables,” Mr. Amin added.

Solar photovoltaics (PV) grew by a whopping 32% in 2017, followed by wind energy, which grew by 10%. Underlying this growth are substantial cost reductions, with the levelised cost of electricity from solar PV decreasing by 73%, and onshore wind by nearly one-quarter, between 2010 and 2017. Both technologies are now well within the cost range of power generated by fossil fuels.

China continued to lead global capacity additions, installing nearly half of all new capacity in 2017. 10% of all new capacity additions came from India, mostly in solar and wind. Asia accounted for 64% of new capacity additions in 2017, up from 58% last year. Europe added 24 GW of new capacity in 2017, followed by North America with 16 GW. Brazil set itself on a path of accelerated renewables deployment, installing 1 GW of solar generation, a ten-fold increase from the previous year.

Off-grid renewables capacity saw unprecedented growth in 2017, with an estimated 6.6 GW serving off-grid customers. This represents a 10% growth from last year, with around 146 million people now using off-grid renewables.

Highlights by technology:

Hydropower: The amount of new hydro capacity commissioned in 2017 was the lowest seen in the last decade. Brazil and China continued to account for most of this expansion (12.4 GW or 60% of all new capacity). Hydro capacity also increased by more than 1 GW in Angola and India.

Wind energy: Three-quarters of new wind energy capacity was installed in five countries: China (15 GW); USA (6 GW); Germany (6 GW); UK (4 GW); and India (4 GW). Brazil and France also installed more than 1 GW.

Bioenergy: Asia continued to account for most of the increase in bioenergy capacity, with increases of 2.1 GW in China, 510 MW in India and 430MW in Thailand. Bioenergy capacity also increased in Europe (1.0 GW) and South America (0.5 GW), but the increase in South America was relatively low compared to previous years.

Solar energy: Asia continued to dominate the global solar capacity expansion, with a 72 GW increase. Three countries accounted for most of this growth, with increases of 53 GW (+68%) in China, 9.6 GW (+100%) in India and 7 GW (+17%) in Japan. China alone accounted for more than half of all new solar capacity installed in 2017. Other countries that installed more than 1 GW of solar in 2017 included: USA (8.2 GW); Turkey (2.6 GW); Germany (1.7 GW); Australia (1.2 GW); South Korea (1.1 GW); and Brazil (1 GW).

Geothermal energy: Geothermal power capacity increased by 644 MW in 2017, with major expansions in Indonesia (306 MW) and Turkey (243 MW). Turkey passed the level of 1 GW geothermal capacity at the year-end and Indonesia is fast approaching 2 GW.

Download Renewable Capacity Statistics 2018

Total Renewable Power Generation Capacity, 2011-2017

###

About the International Renewable Energy Agency (IRENA)

The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation that supports countries in their transition to a sustainable energy future, and serves as the principal platform for international co-operation, a centre of excellence, and a repository of policy, technology, resource and financial knowledge on renewable energy. With 156 Members (155 States and the European Union) and 24 additional countries in the accession process and actively engaged, IRENA promotes the widespread adoption and sustainable use of all forms of renewable energy, including bioenergy, geothermal, hydropower, ocean, solar and wind energy, in the pursuit of sustainable development, energy access, energy security and low-carbon economic growth and prosperity.

www.irena.org

Contact information: Timothy Hurst, Chief Communications Officer, IRENA, thurst@irena.org; +971 2 417 9000

Stay in touch with IRENA: www.twitter.com/irena and www.facebook.com/irena.org

Гринпис России представил в ООН доклад о том, как добыча и транспортировка ископаемого топлива угрожают российской природе и коренным жителям

11–13 апреля в Женеве проходит предварительная сессия Универсального периодического обзора ООН. Эта структура – часть Совета по правам человека ООН и она предоставляет возможность каждой стране информировать ООН о предпринятых ею мерах в этой сфере.

Эксперт Гринпис России Елена Сакирко рассказала о проблеме масштабных нефтяных разливов и низких экологических и социальных стандартах российских нефтегазовых компаний, из-за которых нарушается традиционный уклад жизни коренных народов.

Основная причина разливов нефти – ветхие нефтепроводы. По оценке главы Минприроды РФ, ежегодно в России разливается не менее 1,5 млн тонн нефти. Это в два раза больше, чем при катастрофе в Мексиканском заливе в 2010 году. Чтобы решить эту проблему, Гринпис России предлагает принять государственную программу по замене всех нефтепроводов, проложенных до 1990 года.



Елена Сакирко также рассказала о критике поправок в Федеральный закон о территориях традиционного природопользования, которую озвучивают Гринпис России и общественные организации, защищающие права коренных народов.

Действующее региональное законодательство по защите прав коренных малочисленных народов не решает конфликтов между интересами коренных жителей и нефтегазовых компаний, потому что нет соответствующих подзаконных актов. Однако вместо того чтобы исправить это, при принятии данных поправок к федеральному закону может быть окончательно закреплено главенство закона о недрах над законами, защищающими права коренных народов.

Самый ценный участок природного парка «Нумто», одна из главных святынь в культуре коренных народов ханты и лесных ненцев, все ещё под угрозой добычи нефти. После того, как власти Ханты-Мансийского автономного округа изменили зонирование парка, компания «Сургутнефтегаз» получила возможность строить там нефтяные вышки, дороги и другую инфраструктуру, что неизбежно нанесёт ущерб экосистеме. Работы могут начаться всего в нескольких километрах от озера Нумто.

В выступлении Гринпис России был также упомянут газопровод «Северный поток 2», который компания «Норд Стрим 2 АГ» планирует проложить через Кургальский заказник вопреки требованиям российского законодательства. Строительство этого газопровода не только разрушит уникальные природные комплексы заказника и места обитания краснокнижных животных и растений, но и нанесёт невосполнимый ущерб традиционной среде обитания коренных народов (ижора, ингерманландцы, воль).

Помочь решить эти проблемы могут рекомендации ООН. Представители России согласились со всеми предыдущими рекомендациями по этой теме, кроме ратификации Декларации о правах коренных народов. Однако для того, чтобы эти рекомендации реально исполнялись, этого должны добиваться общественные организации, активисты и неравнодушные люди.

Наблюдать за ходом основной сессии Универсального Периодического Обзора ООН, которая пройдёт 7–18 мая, можно будет через официальные ресурсы этой структуры. Доклады стран будут приняты в сентябре.

«Природа — основа жизни многих коренных народов. Невозможно отделить вопросы о правах коренных народов от проблемы изменения климата и борьбы с ископаемым топливом. Мы привыкли слышать, что коренные народы ведут борьбу за право на землю, язык, самоопределение. Но в реальности происходит нечто большее: я верю, что, защищая свои священные озера и пастбища от промышленного освоения, они сохраняют нашу Землю», — комментирует своё выступление эксперт Гринпис России Елена Сакирко.

Konstantin Fomin – press officer – Greenpeace Russia

Skype: bobik_ag – +7 (910) 004 56 40 –
kfomin@greenpeace.org; www.greenpeace.ru



Пресс-релиз

13.04.2018

На Красноярском экономическом форуме «Балтика» объявила о том, что продолжит инвестировать в инфраструктуру для раздельного сбора отходов – в 2018 году объем вложений составит 50 млн рублей



13 апреля, во второй день Красноярского экономического форума состоялся круглый стол «Ресурсосбережение и вовлечение отходов в хозяйственный оборот – приоритетный вектор развития «зеленой» экономики в Российской Федерации» с участием представителей правительства и бизнеса. В рамках дискуссии Ольга Егорова, управляющий по работе с органами государственной власти в регионе Сибирь компании «Балтика», часть Carlsberg Group, рассказала об опыте компании в реализации расширенной ответственности производителя и планах инвестировать в 2018 г. 50 млн рублей в развитие инфраструктуры для раздельного сбора отходов.

Организатором круглого стола выступил Минпромторг РФ, соорганизатор – Ассоциация операторов отрасли обращения с отходами «Чистая страна».

Одной из тем повестки круглого стола была Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Проект документа подготовлен Минпромторгом.

Согласно стратегии, к 2030 году Россия должна выйти на уровень стран Европейского Союза, где вместе с сжиганием доля утилизации отходов составляет около 60%.

В своем докладе Павел Серватинский, директор Департамента металлургии и материалов Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, отметил, что этот стратегический документ включает две основные задачи: разработка отечественных технологий, в первую очередь экспортно ориентированных, и вовлечение отходов во вторичный оборот.



По словам представителя ведомства, в стране ежегодно образуется 5,4 млрд тонн отходов, из них 60 миллионов твердые коммунальные отходы (ТКО). Если промышленные отходы более чем в 50% повторно используются, то этот показатель по ТКО не превышает 5–9%, остальное отправляется на свалки.

Минпромторг взял на себя задачу по созданию мощностей по сортировке отходов, чтобы источником возврата средств для инвесторов была продажа вторичных материальных ресурсов.



Участники также обсудили внедрение механизма расширенной ответственности производителя, в соответствии с которым производители или импортеры обязаны выполнять нормативы по утилизации бытовых отходов от своей продукции или уплачивать экологический сбор.

Ольга Егорова, управляющий по работе с органами государственной власти в регионе Сибирь компании «Балтика» поделилась опытом компании в реализации РОП.

С момента принятия поправок в 89-ФЗ компания выбрала путь самостоятельного выполнения нормативов через инвестиции в создание инфраструктуры для раздельного сбора отходов и работу через отраслевых и региональных операторов. В целом работать по такому принципу компания начала еще до изменений в законодательстве – более пяти лет «Балтика» реализует собственный проект «Принеси пользу своему городу» по раздельному сбору отходов.

На конец 2017 года компания уже инвестировала более 40 миллионов рублей в развитие системы раздельного сбора и переработки отходов и планирует инвестировать еще 50 млн рублей в этом году. Средства будут направлены на расширение парка контейнеров для раздельного сбора отходов, покупку линий по сортировке отходов и переработке ПЭТ.



«Для «Балтики» реализация расширенной ответственности производителя – это выполнение не только требований законодательства, но и добровольных обязательств в рамках реализации программы устойчивого развития бизнеса Carlsberg Group, одна из целей которой – к 2030 году свести к нулю выбросы углерода на пивоварнях и на 30% сократить углеродный след готовой продукции, – отметила **Ольга Егорова, управляющий по работе с органами государственной власти в регионе Сибирь компании «Балтика».** – Для формирования эффективной системы обращения с отходами в нашей стране важно сохранить приоритетность самостоятельной утилизации отходов предприятиями, как прописано в законе об отходах. Условия для этого – поэтапная трансформация системы, предсказуемость и прозрачность механизмов регулирования. Экосбор должен быть опцией для тех, кто по каким-то причинам не может исполнить РОП, но не рассматриваться как источник наполнения бюджета. Также необходимо внедрение экономических механизмов стимулирования и населения, и бизнеса, – например, таких, как учет инвестиций, вложенных производителем в раздельный сбор и переработку, в счет экологического сбора».

Продолжая список мер, направленных на развитие системы, представитель «Балтики» также перечислила необходимость закрепления на законодательном уровне обязательной организации раздельного сбора отходов на придомовых территориях, а также закрепления ответственности региональных органов власти и региональных операторов за осуществление раздельного сбора отходов.

Сегодня проект «Балтики» по раздельному сбору отходов охватывает более 20 городов, где установлено более 2 500 контейнеров. За 2017 год компанией и ее партнерами передано на переработку более 55 000 тонн отходов, в том числе более 1500 тонн отходов ПЭТ-упаковки.

В ряде европейских стран уровень переработки ПЭТ достигает 90%, что не сопоставимо с текущим уровнем переработки ПЭТ в России. При этом ПЭТ-упаковка является одним из лидеров по потенциалу рециклинга. Она легкая по весу, перерабатывается на 100%, может входить в замкнутый цикл и многократно применяться в производстве новых товаров. Благодаря своим свойствам ПЭТ имеет высокий потенциал для стимулирования развития отрасли переработки в России и перехода к «зеленой» экономике.

* бутылка, произведенная из полиэтилентерефталата



ООО «Пивоваренная компания «Балтика», часть Carlsberg Group, — один из крупнейших производителей товаров народного потребления России, с 1996 года — №1 на российском рынке пива. «Балтике» принадлежат 8 заводов в России, широкий портфель брендов. Компания является значительной частью Carlsberg Group и ее региона Восточная Европа, к которому также относятся Азербайджан, Беларусь, Казахстан и Украина. Пивоваренная компания «Балтика» — ведущий экспортер российского пива: продукция представлена более чем в 75 странах мира, в 43 из которых компания — единственный российский поставщик в категории. Бренды компании являются обладателями более 670 российских и международных наград профессиональных и потребительских конкурсов.

Carlsberg Group — одна из крупнейших пивоваренных групп в мире, владеющая широким портфелем брендов пива и других напитков. Флагманский бренд компании — Carlsberg — является одним из наиболее известных пивных брендов в мире; «Балтика», Carlsberg и Tuborg входят в восьмерку крупнейших брендов Европы. В Carlsberg Group работает более 42 000 человек. Продукция компании продается более чем на 150 рынках мира. В 2016 году Carlsberg Group продала 117 миллионов гектолитров пива.



Fortum wins contract to supply the biggest solar electricity system in Nordic history

FORTUM CORPORATION PRESS RELEASE 16 April 2018

Fortum won S Group's competitive bidding process for the implementation of a solar electricity system on the rooftops of approx. 40 commercial buildings across Finland. With a total output capacity of about 10 MW, the solar electricity project is the biggest ever supply of rooftop solar electricity systems to be installed on rooftops in the Nordic countries. The total solar power production capacity in Finland in 2017 was about 35 MW.

Fortum is responsible for the project planning, project management and equipment procurement. The installation work will be conducted by about 10 teams from ARE. The installation work will start in spring 2018 and will be completed during autumn 2018 (with the exception of a few new sites).

"Realising our vision – For a cleaner world – isn't easy nor can it be accomplished overnight. Fortunately, it is a goal that is also shared by many other companies and communities, and this S Group project to utilise solar energy in their commercial buildings is a prime example of that," says **Tatu Kulla**, Head of Business Development, Fortum.

"The entire S Group has a shared goal to use our own renewable energy to produce 80 per cent of the electricity we consume in 2025. Our sites' electricity consumption peaks during summer, right when the sunlight lasts longer and is more intense. In the best cases, during summer we can produce enough solar energy to satisfy 100% of the electricity needs of one building," says **Mikko Halonen**, Managing Director, S-Voima.

"We chose Fortum to supply our solar electricity systems because its products and processes are reliable and audited. The life-cycle of a solar electricity system is decades long. We trust Fortum's ability to meet its obligations years into the future," Halonen continues.

Fortum's strengths in solar electricity projects implemented with business customers are the reliability of a recognised and financially sound company, high-quality and cost-efficient solutions, and experience with successful large-scale solar power plant construction projects. Fortum's experience in implementing major solar power projects extend to India, e.g., where the total output of Fortum's solar power plants is about 185 MW.

Fortum Corporation
Group Communications

Further information:

Juha Ruokonen, Project Manager, Fortum, juha.ruokonen@fortum.com, tel. +358 400 918 322
Mikko Halonen, Managing Director, S-Voima, tel. +358 10 768 2064

Fortum

Fortum is a leading clean-energy company that provides its customers with electricity, heating and cooling as well as smart solutions to improve resource efficiency. We want to engage our customers and society to join the change for a cleaner world. We employ some 9,000 professionals in the Nordic and Baltic countries, Russia, Poland and India. In 2017, our sales were EUR 4.5 billion. Fortum's share is listed on Nasdaq Helsinki. www.fortum.com

S Group

S Group is a Finnish network of companies operating in the retail and service sectors. It has more than 1,600 outlets in Finland. S Group comprises the cooperatives and SOK Corporation along with its subsidiaries. S Group consists of twenty independent regional cooperatives and SOK Corporation, which is owned by the cooperatives, and its subsidiaries. In addition, S Group includes seven local cooperatives. The network of cooperatives extends throughout Finland, and the regional aspect is highlighted in the operations of the cooperatives. The cooperatives are owned by their members, also known as co-op members.



ООО «Пивоваренная компания «Балтика», часть Carlsberg Group, — один из крупнейших производителей товаров народного потребления России, с 1996 года — №1 на российском рынке пива. «Балтике» принадлежат 8 заводов в России, широкий портфель брендов. Компания является значительной частью Carlsberg Group и ее региона Восточная Европа, к которому также относятся Азербайджан, Беларусь, Казахстан и Украина. Пивоваренная компания «Балтика» — ведущий экспортер российского пива: продукция представлена более чем в 75 странах мира, в 43 из которых компания — единственный российский поставщик в категории. Бренды компании являются обладателями более 670 российских и международных наград профессиональных и потребительских конкурсов.

Carlsberg Group — одна из крупнейших пивоваренных групп в мире, владеющая широким портфелем брендов пива и других напитков. Флагманский бренд компании — Carlsberg — является одним из наиболее известных пивных брендов в мире; «Балтика», Carlsberg и Tuborg входят в восьмерку крупнейших брендов Европы. В Carlsberg Group работает более 42 000 человек. Продукция компании продается более чем на 150 рынках мира. В 2016 году Carlsberg Group продала 117 миллионов гектолитров пива.



Fortum wins contract to supply the biggest solar electricity system in Nordic history

FORTUM CORPORATION PRESS RELEASE 16 April 2018

Fortum won S Group's competitive bidding process for the implementation of a solar electricity system on the rooftops of approx. 40 commercial buildings across Finland. With a total output capacity of about 10 MW, the solar electricity project is the biggest ever supply of rooftop solar electricity systems to be installed on rooftops in the Nordic countries. The total solar power production capacity in Finland in 2017 was about 35 MW.

Fortum is responsible for the project planning, project management and equipment procurement. The installation work will be conducted by about 10 teams from ARE. The installation work will start in spring 2018 and will be completed during autumn 2018 (with the exception of a few new sites).

“Realising our vision – For a cleaner world – isn't easy nor can it be accomplished overnight. Fortunately, it is a goal that is also shared by many other companies and communities, and this S Group project to utilise solar energy in their commercial buildings is a prime example of that,” says **Tatu Kulla**, Head of Business Development, Fortum.

“The entire S Group has a shared goal to use our own renewable energy to produce 80 per cent of the electricity we consume in 2025. Our sites' electricity consumption peaks during summer, right when the sunlight lasts longer and is more intense. In the best cases, during summer we can produce enough solar energy to satisfy 100% of the electricity needs of one building,” says **Mikko Halonen**, Managing Director, S-Voima.

“We chose Fortum to supply our solar electricity systems because its products and processes are reliable and audited. The life-cycle of a solar electricity system is decades long. We trust Fortum's ability to meet its obligations years into the future,” Halonen continues.

Fortum's strengths in solar electricity projects implemented with business customers are the reliability of a recognised and financially sound company, high-quality and cost-efficient solutions, and experience with successful large-scale solar power plant construction projects. Fortum's experience in implementing major solar power projects extend to India, e.g., where the total output of Fortum's solar power plants is about 185 MW.

Fortum Corporation
Group Communications

Further information:

Juha Ruokonen, Project Manager, Fortum, juha.ruokonen@fortum.com, tel. +358 400 918 322
Mikko Halonen, Managing Director, S-Voima, tel. +358 10 768 2064

Fortum

Fortum is a leading clean-energy company that provides its customers with electricity, heating and cooling as well as smart solutions to improve resource efficiency. We want to engage our customers and society to join the change for a cleaner world. We employ some 9,000 professionals in the Nordic and Baltic countries, Russia, Poland and India. In 2017, our sales were EUR 4.5 billion. Fortum's share is listed on Nasdaq Helsinki. www.fortum.com

S Group

S Group is a Finnish network of companies operating in the retail and service sectors. It has more than 1,600 outlets in Finland. S Group comprises the cooperatives and SOK Corporation along with its subsidiaries. S Group consists of twenty independent regional cooperatives and SOK Corporation, which is owned by the cooperatives, and its subsidiaries. In addition, S Group includes seven local cooperatives. The network of cooperatives extends throughout Finland, and the regional aspect is highlighted in the operations of the cooperatives. The cooperatives are owned by their members, also known as co-op members.

Проекты по развитию экотуризма в России становятся все более привлекательными для инвесторов

В рамках деловой программы Красноярского экономического форума «Россия 2018–2024: реализуя потенциал» был представлен доклад о развитии экологического туризма в Сибирском федеральном округе заместителя директора департамента государственной политики и регулирования в сфере охраны окружающей среды Игоря Давыдова.



«В Сибири находится 45 федеральных ООПТ, на которых в том числе реализуется приоритетный проект Правительства РФ «Дикая природа России: сохранить и увидеть». В рамках этой программы мы привлекаем внебюджетные деньги на развитие туристической деятельности. Сегодня аренда земли возможна только в нацпарках и рекреационных зонах. Однако обсуждается вопрос создания отдельных объектов инфраструктуры в охранных зонах заповедников. При этом инвесторам необходимо будет руководствоваться принятыми «зелеными стандартами» строительства», – пояснил Игорь Давыдов.

Реализация приоритетного проекта стала основной темой доклада директора ФГБУ «Информационно-аналитический центр поддержки заповедного дела» Андрея Миняева.

«Инвесторы смогут построить экологические тропы, смотровые площадки, наблюдательные пункты, музеи и «визит-центры», обустроенные туристские стоянки и места отдыха, пункты размещения посетителей на рекреационных территориях пилотных ООПТ. Однако обязательным условием станет обеспечение минимизации антропогенного воздействия на экосистемы заповедных территорий. К разработке программ развития будут привлечены международные эксперты, имеющие опыт реализации проектов по развитию экологического туризма в крупнейших иностранных заповедниках. Таких экспертов мы уже подобрали», – рассказал Андрей Миняев.



В течение трех дней работы КЭФ были подписаны более 70 соглашений, меморандумов, договоров между органами власти, бизнесом, общественными организациями. С 12 по 14 апреля площадки КЭФ посетили почти 6 тысяч человек из 30 стран мира, а также представители 60 регионов России.





ISOVER получил наивысшую оценку за экологичность продукции и производства – EcoMaterial Absolut Plus

Москва, 19 апреля 2018 года

В апреле 2018 г тепло- и звукоизоляционные материалы ISOVER, производимые в Егорьевске (Московская обл.), достигли максимально возможного уровня экологической маркировки и получили наибольшее количество баллов экологического рейтинга за всю историю стандарта EcoMaterial 2.0 (в 2016 г. была проведена масштабная работа по обновлению и совершенствованию стандарта на основе многолетнего опыта работы, рекомендаций квалифицированных экспертов и зарубежной практики в области экологии, строительства, проведения лабораторных исследований. Благодаря этому была разработана и введена новая версия стандарта EcoMaterial 2.0) – 176 баллов. Для ISOVER это весомый вклад в защиту окружающей среды, здоровье сотрудников и тех, кто выбирает теплоизоляцию ISOVER для утепления своего дома.

Лидер в сфере экологической экспертизы ГК «Экостандарт» провел комплексный аудит соответствия завода ISOVER в Егорьевске стандарту EcoMaterial, а также испытание выпускаемой продукции. В первую очередь эксперты оценили насколько материалы безопасны для здоровья человека в «Санитарно-гигиеническом аспекте», проведя радиологические, электромагнитные, химические, токсикологические измерения и лабораторные исследования. Результат продемонстрировал экологичность продукции и безопасность для здоровья человека – тепло- и звукоизоляция ISOVER рекомендована для применения даже в медицинских и детских учреждениях.

Второй этап определил комплексное воздействие утеплителей ISOVER и их производства на окружающую среду. Производство теплоизоляционных материалов ISOVER осуществляется из минерального сырья на современном оборудовании с высоким уровнем автоматизации процессов. Каждый киловатт электроэнергии, потраченный на изготовление минеральной ваты ISOVER, позволит сберечь не менее 68 киловатт, которые пришлось бы истратить на отопление неутепленных зданий. На заводе ISOVER используется полностью замкнутый цикл водопотребления, что обеспечивает полное отсутствие сбросов технологической воды в водные объекты. Также отсутствует слив ливневых и дренажных стоков: вся вода с дорог, крыш и соседнего предприятия «Сен-Гобен» собирается, проходит процесс очистки и снова отправляется на завод, что также помогает предприятию снизить водопотребление из систем городских систем. Без сомнения, завод ISOVER в Егорьевске является образцовым в отрасли с точки зрения минимального воздействия на окружающую среду.

В рамках третьего этапа «Экологическая ответственность производителя» представители Ecomaterial оценили популяризацию зеленых решений и тенденций, поддержку социальных экопроектов и другую деятельность ISOVER в данной области.

В результате ISOVER отметили наивысшим уровнем экологичности – EcoMaterial Absolute PLUS, который характеризует продукцию ISOVER как экологически чистый высокотехнологичный материал. Предыдущие уровни данного стандарта дают следующие определения: EcoMaterial Basic – материал безопасен для человека, EcoMaterial Green – материал безопасен для человека и окружающей среды, EcoMaterial Absolute – экологически чистый материал.

Наличие экомаркировки говорит о том, что утеплители и звукоизоляционные материалы ISOVER соответствует российским стандартам, при их производстве используются передовые технологии и оборудование, которое минимизирует воздействие на окружающую среду, а производитель имеет повышенную ответственность в области охраны окружающей среды.

О КОМПАНИИ «СЕН-ГОБЕН»

«Сен-Гобен» – международная промышленная группа со штаб-квартирой в Париже, которая разрабатывает, производит и продаёт высококачественные строительные и инновационные материалы и решения, которые улучшают жизнь каждого человека и общества в целом. Продукцию «Сен-Гобен» можно встретить в домах, офисах, транспорте, объектах инфраструктуры и т.д. У «Сен-Гобен СНГ» 8 действующих заводов в этом регионе, а также научно-исследовательский центр в г. Егорьевске.

Мировой лидер в создании комфортного пространства.

В 2016 году ОБЪЕМ ПРОДАЖ «Сен-Гобен» составил 39,1 млрд. евро. Группа имеет представительства в 67 странах мира.

В штате – более 170 000 сотрудников.

www.saint-gobain.ru

О ПОДРАЗДЕЛЕНИИ ISOVER:

ISOVER – мировой эксперт в утеплении и защите от шума. Уже 80 лет продукцию ISOVER выпускают в соответствии с мировым стандартом качества более 40 заводов в разных странах мира.

Продукция ISOVER обеспечивает эффективную защиту от холода и шума, повышает комфорт и энергоэффективность дома, сокращает затраты на его эксплуатацию.

ISOVER неоднократно отмечен премией Правительства г. Москвы «Берегите энергию!» в номинации «Технология года» и имеет самые высокие баллы за экологичность выпускаемой продукции, отмеченной двумя экомаркировками.

За 25 лет ISOVER стал ведущим игроком на российском рынке строительных материалов и заслужил доверие и уважение миллионов людей.

КОНТАКТЫ ДЛЯ СМИ:

Кононова Ксения
тел.: +7 (495) 641-22-09
kkononova@pr-consulta.ru

ООО «Сен-Гобен Строительная Продукция Рус»
Россия, 107061, Москва, Преображенская пл., д.8
Бизнес-центр «ПРЕО 8», 19-й этаж
Т: +7 495 775 15 10 • Ф: +7 495 775 15 11
www.saint-gobain.ru



BASF
We create chemistry

**MASTER®
BUILDERS
SOLUTIONS**

BASF
We create chemistry

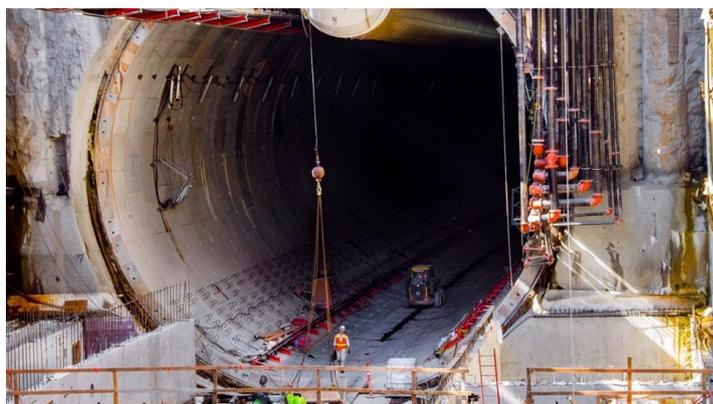
Пресс-релиз

19/04/2018

BASF представил новые составы для подземного строительства на Всемирном конгрессе в Дубае

- MasterRoc TSG 800 способствует безопасной проходке тоннелей при меньшем расходе
- MasterRoc SLF 50 повышает эффективность выемки грунта

В апреле 2018 года в Дубае на Всемирном конгрессе Международной тоннельной ассоциации (ITA-AITES) концерн BASF, ведущий мировой производитель строительной химии, представил пожаробезопасную консистентную смазку MasterRoc TSG 800. Новинка является инновационной разработкой компании для тоннелепроходческих работ.



«Специальный химический состав MasterRoc TSG 800 одновременно повышает безопасность и эффективность выемки грунтов при подземном строительстве. Смазка отличается сниженной плотностью, что позволяет уменьшить расход материала при работе на объектах. Этот факт значительно повлияет на экономические показатели строительных проектов», – пояснил Вольфганг Алдриан, руководитель технической службы подразделения продукции для подземного строительства концерна BASF.

Кроме того, на конгрессе представлен новый кондиционер для грунта, обеспечивающий более высокую стабильность. MasterRoc SLF 50, являющийся новым поколением кондиционирующих агентов, был создан специально для повышения производительности работ при проходке тоннелей в сложных грунтовых условиях. Он формирует пену с высокими показателями периода полураспада, что способствует поддержанию давления в рабочей зоне. Использование данного кондиционера позволяет экономить энергоресурсы благодаря снижению крутящего момента на роторе, а также оптимизировать выемку грунта и уменьшить износ режу-

Продукция ISOVER обеспечивает эффективную защиту от холода и шума, повышает комфорт и энергоэффективность дома, сокращает затраты на его эксплуатацию.

ISOVER неоднократно отмечен премией Правительства г. Москвы «Берегите энергию!» в номинации «Технология года» и имеет самые высокие баллы за экологичность выпускаемой продукции, отмеченной двумя экомаркировками.

За 25 лет ISOVER стал ведущим игроком на российском рынке строительных материалов и заслужил доверие и уважение миллионов людей.

КОНТАКТЫ ДЛЯ СМИ:

Кононова Ксения
тел.: +7 (495) 641-22-09
kkononova@pr-consulta.ru

ООО «Сен-Гобен Строительная Продукция Рус»
Россия, 107061, Москва, Преображенская пл., д.8
Бизнес-центр «ПРЕО 8», 19-й этаж
Т: +7 495 775 15 10 • Ф: +7 495 775 15 11
www.saint-gobain.ru



BASF
We create chemistry

**MASTER®
BUILDERS
SOLUTIONS**

BASF
We create chemistry

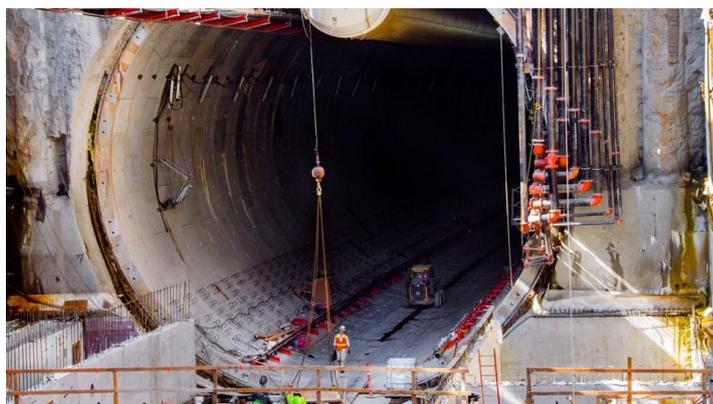
Пресс-релиз

19/04/2018

BASF представил новые составы для подземного строительства на Всемирном конгрессе в Дубае

- MasterRoc TSG 800 способствует безопасной проходке тоннелей при меньшем расходе
- MasterRoc SLF 50 повышает эффективность выемки грунта

В апреле 2018 года в Дубае на Всемирном конгрессе Международной тоннельной ассоциации (ITA-AITES) концерн BASF, ведущий мировой производитель строительной химии, представил пожаробезопасную консистентную смазку MasterRoc TSG 800. Новинка является инновационной разработкой компании для тоннелепроходческих работ.



«Специальный химический состав MasterRoc TSG 800 одновременно повышает безопасность и эффективность выемки грунтов при подземном строительстве. Смазка отличается сниженной плотностью, что позволяет уменьшить расход материала при работе на объектах. Этот факт значительно повлияет на экономические показатели строительных проектов», – пояснил Вольфганг Алдриан, руководитель технической службы подразделения продукции для подземного строительства концерна BASF.

Кроме того, на конгрессе представлен новый кондиционер для грунта, обеспечивающий более высокую стабильность. MasterRoc SLF 50, являющийся новым поколением кондиционирующих агентов, был создан специально для повышения производительности работ при проходке тоннелей в сложных грунтовых условиях. Он формирует пену с высокими показателями периода полураспада, что способствует поддержанию давления в рабочей зоне. Использование данного кондиционера позволяет экономить энергоресурсы благодаря снижению крутящего момента на роторе, а также оптимизировать выемку грунта и уменьшить износ режу-

щей головки.

MasterRoc SLF 50 успешно применён при проходке двухэтажного автомобильного тоннеля длиной 2,963 метра вдоль набережной Сиэтла (США) в рамках проекта по строительству новой дорожной артерии, связывающей южную и северную части города.

О подразделении строительной химии

Подразделение строительной химии концерна BASF под брендом Master Builders Solutions предлагает передовые решения для нового строительства, а также для техобслуживания, ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Эти решения создаются на основе более чем 100-летнего опыта работы в строительной отрасли. Широкий портфель разработок охватывает добавки в бетон и цемент, химические решения для подземного строительства, системы гидроизоляции, герметики, ремонтные и защитные смеси, высококачественные строительные растворы, подливки под оборудование, напольные покрытия, плиточный клей, деформационные швы, а также решения для защиты древесины и др. Численность персонала подразделения строительной химии составляет около 6500 человек. Для того чтобы комплексно (от разработки концепции до практического осуществления проекта) решать конкретные задачи, стоящие перед нашими заказчиками, мы объединяем компетенции по различным регионам и направлениям деятельности и используем опыт, накопленный в процессе реализации многочисленных строительных проектов по всему миру. Мы опираемся на технологии BASF и на глубокое знание потребностей строительной отрасли в том или ином регионе для разработки решений, способствующих успешному бизнесу заказчиков и продвижению рациональных подходов к строительству.

Производственные площадки и центры продаж подразделения строительной химии расположены более чем в 60 странах мира. Оборот по итогам 2017 года составил около 2,4 млрд евро. С дополнительной информацией можно ознакомиться на веб-сайте по адресу: www.master-builders-solutions.basf.com.

О концерне BASF

BASF создаёт химию в целях устойчивого будущего. В своей деятельности мы сочетаем экономические успехи с бережным отношением к окружающей среде и социальной ответственностью. Сотрудники группы BASF, общая численность которых составляет около 115 тысяч человек, вносят вклад в успешное развитие бизнеса наших клиентов в различных индустриях практически во всех странах мира. Структура нашего бизнеса включает пять основных сегментов: химикаты, специальные продукты, функциональные материалы и решения, решения для сельского хозяйства, нефть и газ. По итогам 2017 года объём продаж BASF составил около 64,5 млрд евро. Акции BASF торгуются на фондовых биржах во Франкфурте (BAS), Лондоне (BFA) и Цюрихе (BAS). Более подробная информация о концерне BASF представлена на сайте: www.basf.com.



Компания Schneider Electric стала участником Национального нефтегазового форума 2018

Москва, 23 апреля 2018 г. – Компания Schneider Electric, мировой эксперт в управлении энергией и автоматизации, приняла участие в работе Национального нефтегазового форума. Мероприятие прошло 17–18 апреля в Москве на площадке ЦВК «Экспоцентр».

Представители Schneider Electric поделились своим видением преобразований в нефтегазовой промышленности в рамках пленарного заседания форума. Так, 17 апреля в сессии «Технологическое развитие нефтегазовой отрасли России в условиях цифровой трансформации мировой экономики и структурных преобразований» выступил Крис Дартнелл, президент сегмента «Нефть и газ» Schneider Electric. В сессии «Импортозамещение и локализация в нефтегазовой промышленности» свой доклад представил Борис Муратов, вице-президент по рынку «Промышленная автоматизация» в России и СНГ. Эксперты обсудили тенденции глобальных и локальных рынков нефтегазовой отрасли, структурные преобразования отрасли в эпоху цифровизации мировой экономики, поделились представлениями о будущем индустрии и роли человеческого капитала в ней. Также были затронуты вопросы современных механизмов государственного стимулирования, локализации и международного сотрудничества компаний отрасли.

«Благодаря многолетнему сотрудничеству с ведущими нефтегазовыми компаниями России, Schneider Electric успешно развивает и локализует самые передовые решения мирового уровня для предприятий в России, – говорит г-н Муратов. – На ряде объектов у нас и за рубежом уже успешно работают компоненты инновационной концепции «умных производств», разработанной Schneider Electric. Для глубокой адаптации и локальной разработки критичных компонентов программного обеспечения для автоматизированных систем управления техпроцессами на крупных предприятиях нефтегазовой отрасли мы запустили масштабный НИ-ОКР-проект на базе «Иннополиса» в республике Татарстан в прошлом году. Участие в Национальном нефте-

щей головки.

MasterRoc SLF 50 успешно применён при проходке двухэтажного автомобильного тоннеля длиной 2,963 метра вдоль набережной Сиэтла (США) в рамках проекта по строительству новой дорожной артерии, связывающей южную и северную части города.

О подразделении строительной химии

Подразделение строительной химии концерна BASF под брендом Master Builders Solutions предлагает передовые решения для нового строительства, а также для техобслуживания, ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Эти решения создаются на основе более чем 100-летнего опыта работы в строительной отрасли. Широкий портфель разработок охватывает добавки в бетон и цемент, химические решения для подземного строительства, системы гидроизоляции, герметики, ремонтные и защитные смеси, высококачественные строительные растворы, подливки под оборудование, напольные покрытия, плиточный клей, деформационные швы, а также решения для защиты древесины и др. Численность персонала подразделения строительной химии составляет около 6500 человек. Для того чтобы комплексно (от разработки концепции до практического осуществления проекта) решать конкретные задачи, стоящие перед нашими заказчиками, мы объединяем компетенции по различным регионам и направлениям деятельности и используем опыт, накопленный в процессе реализации многочисленных строительных проектов по всему миру. Мы опираемся на технологии BASF и на глубокое знание потребностей строительной отрасли в том или ином регионе для разработки решений, способствующих успешному бизнесу заказчиков и продвижению рациональных подходов к строительству.

Производственные площадки и центры продаж подразделения строительной химии расположены более чем в 60 странах мира. Оборот по итогам 2017 года составил около 2,4 млрд евро. С дополнительной информацией можно ознакомиться на веб-сайте по адресу: www.master-builders-solutions.basf.com.

О концерне BASF

BASF создаёт химию в целях устойчивого будущего. В своей деятельности мы сочетаем экономические успехи с бережным отношением к окружающей среде и социальной ответственностью. Сотрудники группы BASF, общая численность которых составляет около 115 тысяч человек, вносят вклад в успешное развитие бизнеса наших клиентов в различных индустриях практически во всех странах мира. Структура нашего бизнеса включает пять основных сегментов: химикаты, специальные продукты, функциональные материалы и решения, решения для сельского хозяйства, нефть и газ. По итогам 2017 года объём продаж BASF составил около 64,5 млрд евро. Акции BASF торгуются на фондовых биржах во Франкфурте (BAS), Лондоне (BFA) и Цюрихе (BAS). Более подробная информация о концерне BASF представлена на сайте: www.basf.com.



Компания Schneider Electric стала участником Национального нефтегазового форума 2018

Москва, 23 апреля 2018 г. – Компания Schneider Electric, мировой эксперт в управлении энергией и автоматизации, приняла участие в работе Национального нефтегазового форума. Мероприятие прошло 17–18 апреля в Москве на площадке ЦВК «Экспоцентр».

Представители Schneider Electric поделились своим видением преобразований в нефтегазовой промышленности в рамках пленарного заседания форума. Так, 17 апреля в сессии «Технологическое развитие нефтегазовой отрасли России в условиях цифровой трансформации мировой экономики и структурных преобразований» выступил Крис Дартнелл, президент сегмента «Нефть и газ» Schneider Electric. В сессии «Импортозамещение и локализация в нефтегазовой промышленности» свой доклад представил Борис Муратов, вице-президент по рынку «Промышленная автоматизация» в России и СНГ. Эксперты обсудили тенденции глобальных и локальных рынков нефтегазовой отрасли, структурные преобразования отрасли в эпоху цифровизации мировой экономики, поделились представлениями о будущем индустрии и роли человеческого капитала в ней. Также были затронуты вопросы современных механизмов государственного стимулирования, локализации и международного сотрудничества компаний отрасли.

«Благодаря многолетнему сотрудничеству с ведущими нефтегазовыми компаниями России, Schneider Electric успешно развивает и локализует самые передовые решения мирового уровня для предприятий в России, – говорит г-н Муратов. – На ряде объектов у нас и за рубежом уже успешно работают компоненты инновационной концепции «умных производств», разработанной Schneider Electric. Для глубокой адаптации и локальной разработки критичных компонентов программного обеспечения для автоматизированных систем управления техпроцессами на крупных предприятиях нефтегазовой отрасли мы запустили масштабный НИ-ОКР-проект на базе «Иннополиса» в республике Татарстан в прошлом году. Участие в Национальном нефте-

газовом форуме дало нам возможность рассказать о проделанной работе, а также узнать напрямую о нуждах отрасли».

Национальный нефтегазовый форум – крупнейшее федеральное событие отрасли, организованное Министерством энергетики России совместно с ведущими предпринимательскими и отраслевыми объединениями – Российским союзом промышленников и предпринимателей, Торгово-промышленной палатой России, Союзом нефтегазопромышленников России, Российским газовым обществом.

О компании Schneider Electric

Schneider Electric находится на передовой цифровой трансформации в сферах управления энергией и автоматизации для жилых домов, зданий, центров обработки данных, инфраструктуры и промышленности.

Присутствие в более чем 100 странах мира позволяет Schneider Electric быть бесспорным лидером в области управления электроэнергией (низкое и среднее напряжение, бесперебойное энергоснабжение) и систем автоматизации. Мы предлагаем эффективные интегрированные решения, объединяющие управление энергией, автоматизацию и программное обеспечение.

В экосистему Schneider Electric входит крупнейшая сеть партнеров, интеграторов и разработчиков, вместе с которыми на базе открытой платформы решений Schneider Electric мы обеспечиваем операционную эффективность и управление в режиме реального времени.

Мы уверены, что наши уникальные специалисты и партнеры делают Schneider Electric уникальной компанией, а наша приверженность инновациям, диверсификации и принципам устойчивого развития делает жизнь ярче – везде, всегда и для всех. Мы, в Schneider Electric, называем это Life Is On.

www.schneider-electric.com/ru



Контакты:

Менеджер по связям с общественностью
Schneider Electric в России и СНГ
Ольга Тура

Телефон:
+7 (495) 777-9990 ext. 1051
+7 916 884 7417
Email: Olga.Tura@schneider-electric.com

Контакты PR-агентства:
Анна Ключник

Телефон:
+7 (495) 974-22-62 ext. 1402
+7 (903) 594-51-01
Email: Klyuchnik@skc-agency.ru

The Office of H R H Crown Prince Alexander

PRESS RELEASE

CROWN PRINCE ALEXANDER EASTER MESSAGE TO THE BELIEVERS WHO CELEBRATE 1 APRIL 2018

Belgrade, 30 March 2018 – On the occasion of Easter, the greatest Christian holiday, His Royal Highness Crown Prince Alexander sent his warm congratulations to all believers who celebrate it according to the Gregorian calendar: “Resurrection of Christ gives us a hope and belief that our fate is intended from high above, it is the source of faith and confidence with which we deal with all life’s challenges. In the days when we celebrate the victory of life over death, of eternal over ephemeral, I wish to all of you who celebrate the Resurrection of Christ according to the Gregorian calendar, all those who pray to God and obey His laws, to all people of goodwill, happy Easter holidays”, said HRH Crown Prince Alexander in his message.

Public Relations

The Royal Palace, Belgrade 11040, Serbia
Tel: +381 11 306 4000 Fax: +381 11 306 4040
E-mail: pr@dvor.rs Please visit www.dvor.rs



газовом форуме дало нам возможность рассказать о проделанной работе, а также узнать напрямую о нуждах отрасли».

Национальный нефтегазовый форум – крупнейшее федеральное событие отрасли, организованное Министерством энергетики России совместно с ведущими предпринимательскими и отраслевыми объединениями – Российским союзом промышленников и предпринимателей, Торгово-промышленной палатой России, Союзом нефтегазопромышленников России, Российским газовым обществом.

О компании Schneider Electric

Schneider Electric находится на передовой цифровой трансформации в сферах управления энергией и автоматизации для жилых домов, зданий, центров обработки данных, инфраструктуры и промышленности.

Присутствие в более чем 100 странах мира позволяет Schneider Electric быть бесспорным лидером в области управления электроэнергией (низкое и среднее напряжение, бесперебойное энергоснабжение) и систем автоматизации. Мы предлагаем эффективные интегрированные решения, объединяющие управление энергией, автоматизацию и программное обеспечение.

В экосистему Schneider Electric входит крупнейшая сеть партнеров, интеграторов и разработчиков, вместе с которыми на базе открытой платформы решений Schneider Electric мы обеспечиваем операционную эффективность и управление в режиме реального времени.

Мы уверены, что наши уникальные специалисты и партнеры делают Schneider Electric уникальной компанией, а наша приверженность инновациям, диверсификации и принципам устойчивого развития делает жизнь ярче – везде, всегда и для всех. Мы, в Schneider Electric, называем это Life Is On.

www.schneider-electric.com/ru



Контакты:

Менеджер по связям с общественностью
Schneider Electric в России и СНГ
Ольга Тура

Телефон:
+7 (495) 777-9990 ext. 1051
+7 916 884 7417
Email: Olga.Tura@schneider-electric.com

Контакты PR-агентства:
Анна Ключник

Телефон:
+7 (495) 974-22-62 ext. 1402
+7 (903) 594-51-01
Email: Klyuchnik@skc-agency.ru

The Office of H R H Crown Prince Alexander

PRESS RELEASE

CROWN PRINCE ALEXANDER EASTER MESSAGE TO THE BELIEVERS WHO CELEBRATE 1 APRIL 2018

Belgrade, 30 March 2018 – On the occasion of Easter, the greatest Christian holiday, His Royal Highness Crown Prince Alexander sent his warm congratulations to all believers who celebrate it according to the Gregorian calendar: “Resurrection of Christ gives us a hope and belief that our fate is intended from high above, it is the source of faith and confidence with which we deal with all life’s challenges. In the days when we celebrate the victory of life over death, of eternal over ephemeral, I wish to all of you who celebrate the Resurrection of Christ according to the Gregorian calendar, all those who pray to God and obey His laws, to all people of goodwill, happy Easter holidays”, said HRH Crown Prince Alexander in his message.

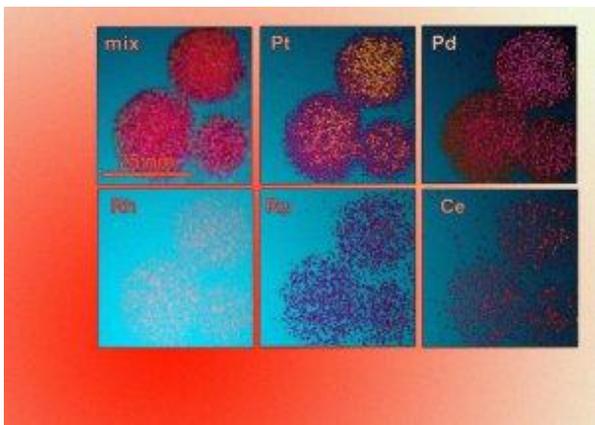
Public Relations

The Royal Palace, Belgrade 11040, Serbia
Tel: +381 11 306 4000 Fax: +381 11 306 4040
E-mail: pr@dvor.rs Please visit www.dvor.rs





Тепловой шок помог равномерно смешать восемь металлов в одной наночастице



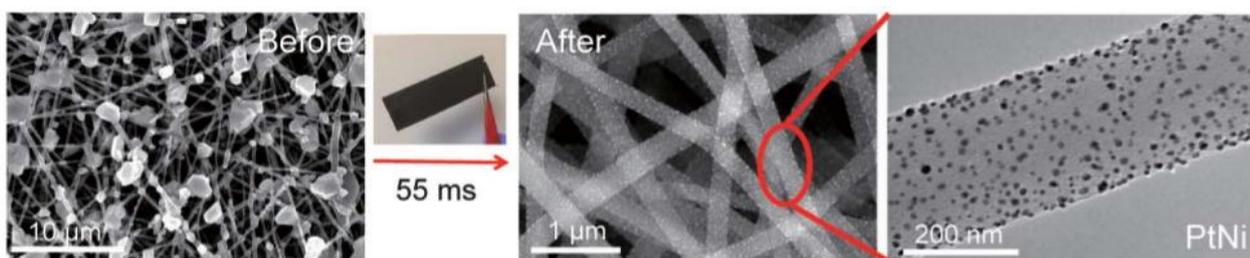
Y. Yao et al./ Science, 2018

Ученые предложили способ синтеза сложных наночастиц, состоящих из восьми различных металлов, которые при этом смешиваются друг с другом, равномерно распределяясь по объему частицы. Как написали ученые в Science, в основе предложенного подхода лежит метод теплового шока, при котором раствор солей нужных металлов на очень короткое время нагревается до двух тысяч градусов Цельсия, а потом – резко охлаждается обратно.

Для электронных наноустройств или катализа часто требуются наночастицы, которые содержат в себе сразу несколько различных металлов. При этом в зависимости от способа использования у них должна быть определенная структура: или металлы должны располагаться в частице слоями, или в виде

отдельных фаз, или быть равномерно распределены по частице. Поскольку металлические сплавы и твердые растворы часто образуются лишь при определенном соотношении элементов, а в наночастицах часто содержится только несколько тысяч атомов, контролировать фазовый состав, структуру частиц, а также следить за однородностью распределения элементов довольно сложно.

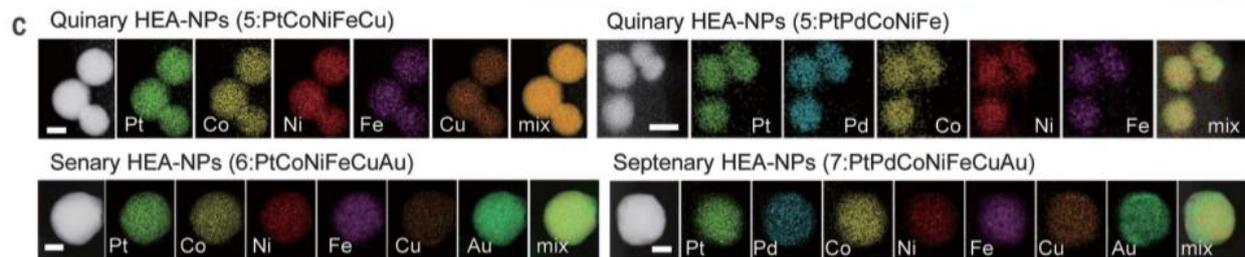
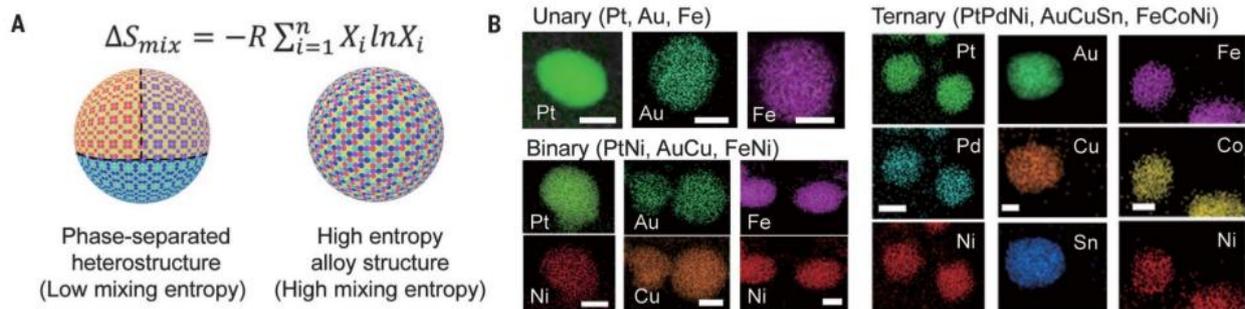
Для того чтобы синтезировать наночастицы, состоящие из равномерно распределенных по объему нескольких металлов, американские ученые под руководством Лянбина Ху (Liangbing Hu) из Мэриленского университета в Колледж-Парке предложили применять метод теплового шока. Для этого смесь растворов солей всех нужных металлов помещалась на специальную подложку, состоящую из отдельных углеродных нановолокон. После этого подложка очень быстро (со скоростью 100 тысяч градусов Цельсия в секунду) нагревалась до двух тысяч градусов и сразу же с такой же скоростью охлаждалась, так что суммарное время, в течение которого раствор был подвержен высокой температуре, составляло всего 55 миллисекунд. Капельки раствора на углеродных волокнах во время нагрева быстро испарялись, образуя однородные металлические наночастицы, в которых все металлы были равномерно распределены по их объему.



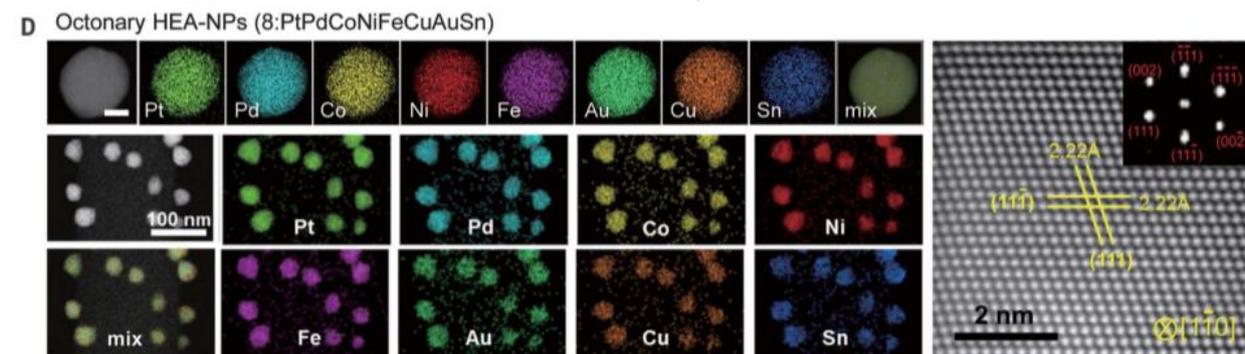
Микрофотографии волокон углеродной подложки до и после температурной обработки
Y. Yao et al./ Science, 2018

Двумя важными условиями синтеза были возможность смешивания металлов друг с другом с образованием твердых растворов и использование таких изначальных солей, которые при нагреве образуют только металл, а все остальные компоненты при этом оказываются в газовой фазе. В качестве

таких металлов ученые брали, например, платину, палладий, кобальт, никель, железо, медь, золото, олово и иридий, из которых в результате удалось успешно синтезировать частицы, содержащие в своем составе от одного до восьми металлов.



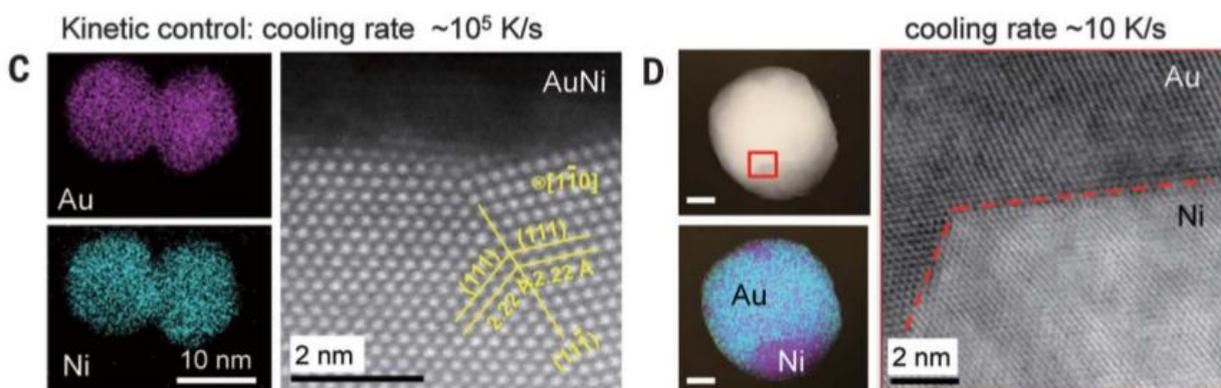
В левом верхнем углу схематически изображены два возможных типа наночастиц: многофазная и в виде однородного твердого раствора. На фотографиях представлены элементные карты наночастиц, полученных из разного количества металлов – от одного до семи
Y. Yao et al./ Science, 2018



Микрофотографии наночастиц, полученных с помощью предложенного способа сразу из восьми различных металлов. Карта распределения по частице каждого из металлов обозначена своим цветом. Справа приведена фотография атомной структуры отдельной частицы
Y. Yao et al./ Science, 2018

Изменяя параметры нагрева: температуру, длительность воздействия, скорость нагревания и охлаждения – ученые могли варьировать состав и размер образующихся частиц, а также однородность их распределения. Так, если охлаждение проводить со скоростью 100 тысяч градусов в секунду, то образуется

частица из однородного твердого раствора нескольких металлов, а если за секунду уменьшать температуру только на 10 градусов, то формируется многофазная частица, и разные металлы оказываются в различных областях частицы.



Наночастицы из золота и никеля, полученные при разных скоростях охлаждения: слева – полученные быстрым охлаждением однородные наночастицы, справа — синтезированные при медленном охлаждении многофазные частицы. *Y. Yao et al./ Science, 2018*



Авторы работы отмечают, что, несмотря на простоту предложенного метода, раньше для получения наночастиц использовать его не пытались. Для того чтобы доказать применимость метода для получения действительно полезных функциональных наночастиц, ученые синтезировали таким образом нанокатализатор, состоящий из сплава платины, рутения, родия и церия. С помощью этого катализатора удалось провести реакцию окисления аммиака до оксида азота с выходом более 99 процентов. Ис-

следователи считают, что в перспективе предложенный ими метод будут применять в качестве основного способа синтеза катализаторов.

Подбор металлов, которые в форме наночастиц можно использовать для катализа, – отдельная трудоемкая задача. Для ускорения этого процесса американские химики даже синтезировали целую библиотеку наночастиц, включающую в себя частицы как из отдельных металлов, так и из некоторых сплавов этих металлов.

nplus1.ru



На 3D-принтере впервые напечатали оптические стекла



Оптическое стекло, созданное при помощи 3D-принтера
Jason Laurea/LLNL

Ученым удалось с помощью 3D-принтера создать стекла, пригодные для оптических приборов. Авторы технологии утверждают, что получившиеся приборы соответствуют по параметрам доступным сегодня на рынке стеклам, полученным традиционным способом, но потенциал у технологии намного выше. Результаты изложены в журнале *Advanced Materials Technologies*.

Во многих областях науки, техники и медицины нужны стекла, зеркала и линзы оптического качества, то есть вносящие пренебрежимо слабые искажения в свет оптического диапазона. Для достижения таких параметров нужно, чтобы форма поверхности стекла выдерживалась с точностью не хуже длины волны, а распределение показателя преломления внутри тела было однородным. При 3D-печати вещество предварительно расплавляется, а так как преломление стекла зависит от процесса охлаждения, то

достичь необходимых характеристик в таком случае довольно сложно.

В новой работе ученые предлагают печатать деталь из специального пастообразного материала, а затем нагревать его целиком, превращая в стекло с однородным показателем преломления. «Напечатанные из плавленого стекла детали часто содержат текстуры – следы процесса создания, которые сохраняются в объеме вещества даже при полировке поверхности, – рассказал руководитель коллектива авторов Ребекка Дилла-Спирс из Ливерморской национальной лаборатории в США. – Наш подход позволяет получить однородное преломление, необходимое в оптике».

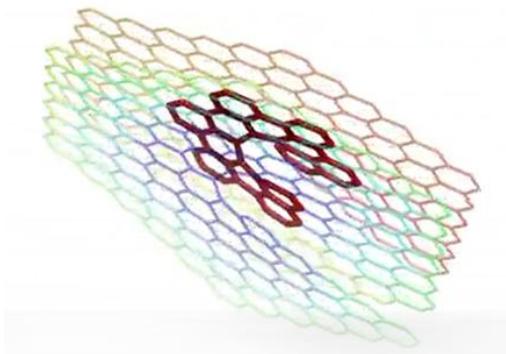
В работе исследователи использовали разработанные в самой Лаборатории смеси для печати изделий кварцевым или кварцево-титановым стеклом. В результате они смогли контролировать оптические, термические и механические свойства конечного предмета. В работе говорится о печати первых образцов относительно простых деталей, но с помощью разработанного метода можно создавать и намного более сложные изделия, в том числе с таким переменным составом и такой геометрической формы, которые недостижимы для альтернативных методов. В частности, можно создавать градиентные линзы – цилиндрические стекла, которые будут преломлять свет за счет переменного показателя преломления в объеме вещества, а не за счет различной длины пути в стекле, как в обычных линзах. Это позволяет сильно упростить полировку, так как плоскую поверхность выровнять намного проще, чем изогнутую.

indicator.ru



Японские химики свернули графен в спираль

Исследователи из университетов Киото и Осака синтезировали топологическую разновидность графена, ранее известную только в теории.



Полученная ими, вероятно, самая крошечная в мире геликоидная спираль является прообразом бу-

дущих индукционных нанокатушек и молекулярных пружин для наномеханизмов.

В статье для Journal of the American Chemical Society команда представила результаты рентгеновского кристаллографического анализа, убедительно подтверждающие геликоидную природу синтезированных конструкторов. Были обнаружены обе разновидности таких спиралей: закрученные по и против часовой стрелки.

«Этот геликоидный нанографен – первый в своём роде, – сообщил первый автор статьи Кендзи Матсуда (Kenji Matsuda). – Мы будем пытаться увеличить площадь поверхности этих геликоидов и сделать их длиннее. Я также рассчитываю обнаружить много новых физических свойств».

ko.com.ua



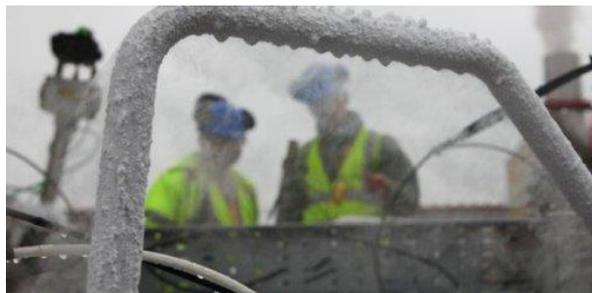
Сжиженный воздух – еще одна технология аккумулирования энергии из возобновляемых источников



Эффективность преобразования энергии, черпаемой из возобновляемых экологически чистых источников, таких как энергия ветра и солнечных лучей, растёт буквально с каждым днем. Однако эти источники энергии не отличаются постоянством, поэтому требуются устройства промежуточного хранения энергии, которые аккумулируют энергию в часы ее максимального производства и отдают в часы пикового потребления. Одним из видов технологий аккумулирования энергии является воздух, закачиваемый под давлением в подземные полости, но швейцарская компания Alcaes сделала следующий шаг в этом направлении. В разработанной ими

технологии полости в горных породах заполняются воздухом, охлажденным до жидкого состояния, что значительно увеличивает энергоёмкость и эффективность такого хранилища энергии.

Технология компании Alcaes отличается достаточно высокой эффективностью, но, к сожалению, использовать ее можно в местах, где имеются подходящие для этого подземные полости. Решение этой проблемы было найдено специалистами британской компании Highview Power Storage, которые заливают сжиженный воздух в термоизолированные от окружающей среды криогенные емкости, в которых этот воздух хранится при относительно низком давлении до момента его использования.



В настоящее время компания Highview Power Storage уже построила небольшую опытную установку аккумуляции энергии неподалеку от Манчестера. Для получения сжиженного воздуха и обратного преобразования в газообразное состояние используется энергия, получаемая от сжигания газа,

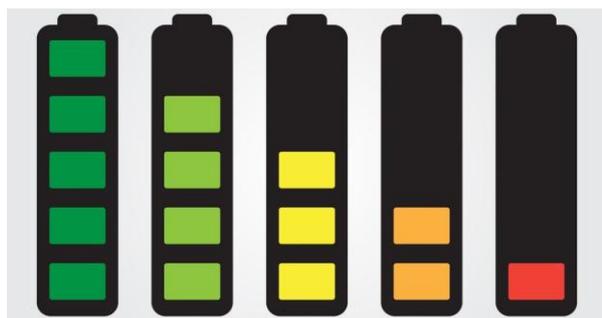
который выделяется из закопанного мусора. Превратившийся снова в газ воздух подается в турбину, которая вырабатывает электрическую энергию. Весной этого года опытная станция компании Highview Power Storage будет подключена к общей энергетической сети Великобритании.

«Нынешняя энергетика отчаянно нуждается в эффективных и недорогих технологиях аккумуляции и хранения экологически чистой энергии, которая в будущем поможет нам избавиться от сжигания ископаемого топлива», – рассказал Стюарт Нелмис (Stuart Nelmes), технический директор компании Highview Power Storage. – И разработанная нами технология может стать одной из ключевых технологий будущего».

dailytechinfo.org



Ученые обещают прототип квантовой батареи через три года



Итальянские физики предложили новую концепцию квантовой батареи на запутанных кубитах, которую можно реализовать на базе существующих технологий. Они надеются создать экспериментальный образец с пятью кубитами в течение трех лет. Статья с результатами опубликована в журнале *Physical Review Letters*.

Несколько лет назад физики предложили теоретическую идею квантовой батареи, которая будет хранить энергию не в виде химических соединений, а благодаря возбужденным состояниям квантовых объектов. Большинство из этих работ написали ученые, занимающиеся исследованиями по квантовой теории информации, которые интересуются фундаментальными теоремами о предельных уровнях хранения энергии и ее передачи. В новой работе физики предложили схему, которую можно реализовать на практике.

Итальянские физики предложили использовать в качестве кубитов сверхпроводниковые контуры или полупроводниковые квантовые точки. В рассмотренном авторами простейшем варианте они должны об-

ладать двумя энергетическими уровнями – основным и возбужденным. Все кубиты помещаются в общий оптический резонатор, где их можно одновременно перевести в возбужденное состояние и запутать одним воздействием, например, лазерным импульсом определенной энергии. В результате, по подсчетам ученых, мощность, с которой можно заряжать батарею, увеличивается пропорционально квадратному корню из кубитов. В то же время для батареи из массива кубитов в отдельных резонаторах эта величина не изменится при добавлении новых элементов.

Авторы отмечают, что предложенная система не нарушает никаких термодинамических законов, так как в ней используется более интенсивный поток энергии от источника к батарее, чем, допустим, для других устройств. Кроме того, физики отмечают, что подобные устройства не заменят современные аккумуляторы. Несмотря на близкую к теоретической скорость зарядки, они также будут разряжаться экстремально быстро – в масштабе наносекунд. По сравнению с химическими элементами у них крошечная емкость: типичная разница энергий между уровнями кубита составляет 0,001 электронвольта, в то время как современные аккумуляторы ноутбуков хранят около 10^{24} эВ. Поэтому основным полем применения подобных батарей может стать сфера квантовых вычислений. В этом случае батарея, находящаяся внутри квантового компьютера, будет работать в цикле: каждый кубит будет заряжаться, пока компьютер забирает энергию у следующего для проведения вычислений.

hi-news.ru





Саудовская Аравия построит крупнейшую солнечную электростанцию на 200 ГВт за \$200 млрд

На днях стало известно о том, что власти Саудовской Аравии и руководство японской корпорации SoftBank подписали договор о создании на территории страны крупнейшей в мире солнечной электростанции, мощность которой оценивается в 200 ГВт, а цена проекта составляет \$200 миллиардов долларов США. Создание такого объекта позволит саудитам создать около 100 тысяч новых рабочих мест.

Новая станция в три раза увеличит объем генерируемой в Саудовской Аравии энергии. На 2016 г. этот показатель для региона составил примерно 77 ГВт, причем две трети объема поставляемой энергии вырабатывается при сжигании природного газа, остальное – нефти. Несмотря на значительные показатели инсоляции, именно солнечная энергия используется в ОАЭ в минимальных объемах. Небольшие энергостанции работают, но это в большинстве случаев системы для личных нужд.

По словам представителей проекта, введение в строй самой крупной в мире солнечной электростанции позволит значительно увеличить совокупную мощность станций страны, а также выведет солнечную энергетику на первое место по объемам выработки энергии. Строительство, завершить которое планируется в 2030 г., будет разделено на несколько этапов.

К сожалению, технические подробности станции пока неизвестны. Сообщается только то, что станция

будет вырабатывать электроэнергию при помощи солнечных панелей, а не вогнутых зеркал, которые нагревают башню с соевым расплавом в верхней ее части. На данный момент наиболее производительные солнечные электростанции основаны на указанном выше принципе.

Показатель в 200 ГВт примерно в 100 раз превышает показатели проектной энергостанции, строительство которой запланировано в Австралии. Другая станция на 2 ГВт будет построена в Греции. Кроме того, немногим менее производительные станции в 1,3 ГВт, 1,18 ГВт, 1 ГВт будут созданы в ближайшие несколько лет в США, ОАЭ и Китае соответственно.

Кроме энергии строительство новой станции позволит создать около 100 тысяч рабочих мест и снизить расходы на электроэнергию. Станция достигнет максимальной производительности к 2030 году. Проект выгоден как для Саудовской Аравии, которой нужна энергия, так и для SoftBank, компании, которая постоянно инвестирует средства в новые проекты. В течение следующих 3–4 лет Softbank вложит примерно \$25 млрд в Саудовскую Аравию и ее проекты, что выгодно саудитам, поскольку принц Мохаммед, один из представителей нового поколения правителей, заявил о намерении диверсифицировать экономику региона, сняв его с «нефтегазовой иглы».



Помимо энергостанции японская компания собирается вложить около \$15 млрд в новый «умный» город, получивший название Неом, который собираются построить на побережье Красного моря.

В марте 2016 г. саудиты запустили установку Integrated Seawater Energy and Agriculture System

(ISEAS), которая получила такое название благодаря гибриднему производству – система производит как продукты питания, так и биотопливо без ущерба для окружающей среды. Эта установка работает в несколько этапов: 1) закачка воды в бассейны с мальками рыбы или планктоном; 2) обогащение продук-



тами жизнедеятельности рыб, затем вода отправляется на плантации растений, которые способны вынести сильно соленую воду без вреда для себя.

А уже после галофитов вода, потерявшая часть своей солености, а также получившая массу удобрений – продуктов жизнедеятельности – отправляется на мангровые плантации с солеустойчивыми растениями. Очищенная вода поступает в зону фильтрации, откуда попадает в океан.

Что касается биотоплива, то его можно получить рядом способов, включая илистые отложения, галофиты, мангровые заросли. Перегной с плантаций будет собираться и отправляться на установки по получению электричества и газа, а планктон и рыба в любое время могут быть использованы в пищевой промышленности. При этом электроника в системе работает на солнечной энергии.

geektimes.com



Географы МГУ оценили, как разработка золота в Монголии загрязняет озеро Байкал

Сотрудники географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова выявили параметры воздействия разработки россыпного месторождения золота в Монголии на речную систему и масштабы переноса загрязняющих веществ по речной сети в озеро Байкал. Результаты своего исследования ученые опубликовали в журнале CATENA.

«В течение 6 лет на уникальной мониторинговой сети проводились комплексные гидролого-геохимические и экологические исследования. Анализировалось более 200 параметров состава воды и взвешенных частиц (тяжелых металлов и металлоидов, биогенных и органических веществ), определялись их концентрации и объемы выноса с речным стоком, оценивалось влияние на водную фауну и растительность. Совмещение этих данных с модельными расчетами смыва вещества с нарушенных горными работами ландшафтов, а также учет климатических изменений позволили выявить параметры воздействия разработки на речную систему и мас-

штабы переноса загрязняющих веществ по речной сети из Монголии в Россию и далее в озеро Байкал», – рассказал Сергей Чалов, автор статьи, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Исследование проводилось в районе одного из крупнейших в Центральной Азии центров добычи россыпного золота Заамар, расположенного в долине монгольской реки Туул, относящейся к бассейну реки Селенги – основного притока озера Байкал.

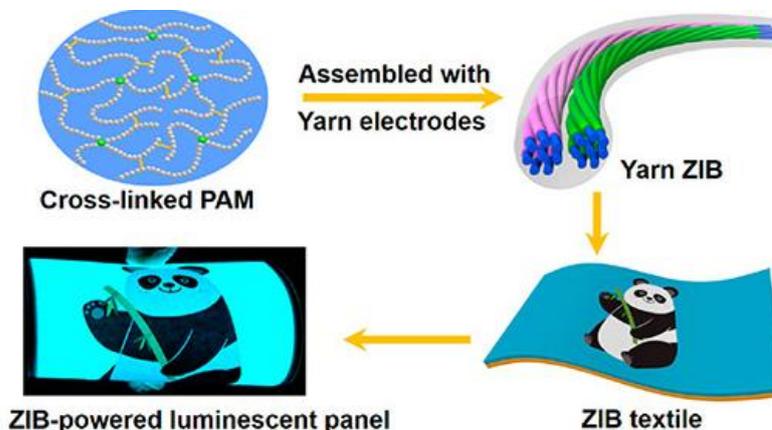
«Состояние реки Селенги и ее притоков играет определяющую роль для экосистемы озера, что обуславливает актуальность получения сведений о воздействии крупных хозяйственных центров на водные потоки. Дальнейшие работы должны быть направлены на изучение других притоков озера для охвата исследования всего водосбора Байкала, что позволит создать экологическую модель озера», – заключил ученый.

strf.ru



Гибкие батареи из нанотрубок работают, даже разрезанные на части

Тканые батареи могли бы быть идеальными источниками питания для интегрируемой в одежду электроники. В прежних исследованиях был достигнут некоторый прогресс путём комбинирования одномерных волокон с гибкими батареями на основе Zn-MnO₂, но такие устройства быстро теряли энергию и их нельзя было перезарядить.



Стабильный вариант тканых цинк-ионных батарей в публикации ASC Nano предложила группа инженеров из Китая и Гонконга. Учёные использовали пряжу, скрученную из волокон углеродных нанотрубок. Одни нити покрывали цинком, получая анод, а другие – оксидом марганца. Затем анод и катод скручивали вместе и наносили на них слой полиакриламидного электролита.

В испытаниях такие батареи продемонстрировали высокую удельную и объёмную энергоёмкость

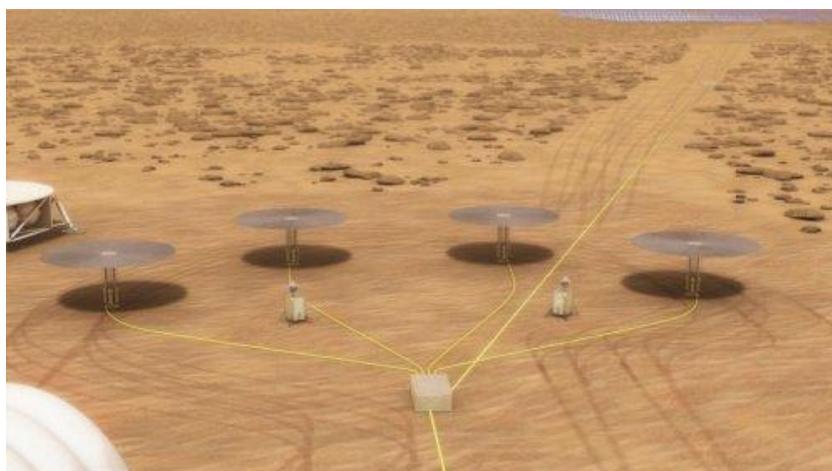
(302,1 мАч/г и 53,8 мВтч/см³) и циклическую стабильность (98,5 % после 500 циклов). Они также выдерживали растягивание с увеличением длины на 300 % и сохраняли 96,5 % первоначальной ёмкости после 12 часов работы под водой.

Кроме того, экспериментальный образец батареи разрезали на восемь частей и сплели в длинный лоскут, который обеспечил питание для гибкого экрана, состоящего из ста светодиодов.

nanonewsnet.ru по материалам ko.com.ua



Портативный ядерный реактор Kilopower успешно прошел испытания на максимальной мощности



Обладание достаточным количеством энергии является одним из главных условий для успешного совершения дальних космических полетов. Экспедиция на Марс, к примеру, будет нуждаться в гораздо большем количестве топлива, чем сможет поднять в космос даже самая мощная ракета, поэтому некоторое количество этого топлива должно быть произведено прямо на Марсе из местных ресурсов, на что потребуется большое количество энергии. Решением энергетической проблемы в космосе является компактный мобильный ядерный реактор Kilopower, разрабатываемый совместными усилиями специалистов НАСА, Национальной лаборатории в Лос-Аламосе и других организаций. Ранее в этом году были проведены предварительные испытания реактора Kilopower, а в течение марта этого года реактор успешно прошел первые испытания, во время которых он работал на своей максимальной мощности.

Малые ядерные реакторы серии Kilopower пока еще не способны обеспечить производство достаточного количества энергии, но их большие, 10-кВт варианты, работая в составе группы из четырех-пяти реакторов, могут обеспечить энергией обитаемую марсианскую базу даже в темное время марсианских

суток или во время песчаных бурь, перекрывающих доступ солнечным лучам.



В марте этого года исследовательская группа провела испытания, во время которых реактор Kilopower работал на полной мощности в течение 20 часов. Данный реактор еще не предназначен для запуска в космос, тем не менее его испытания проводились в условиях, которые максимально близко приближены к реальным условиям в космосе.



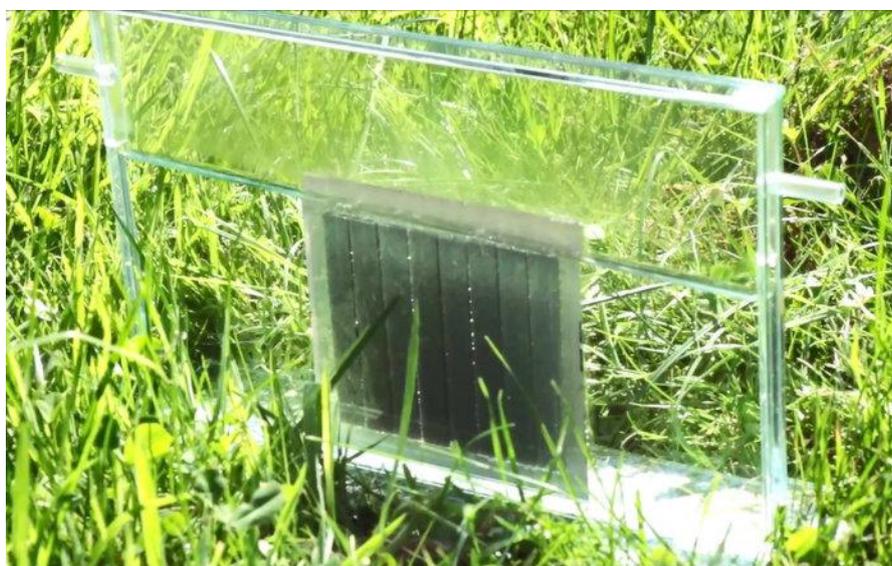
Несмотря на чрезвычайные условия испытаний, реактору Kilopower удалось удивить своих создателей. Количество выработанной им тепловой энергии превысило ожидаемый уровень, при этом и сам реактор, и поток отдаваемой им энергии находились в стабильном состоянии. Это указывает на то, что реактор способен пережить даже некоторые чрезвычайные ситуации, такие как внезапное отключение его системы охлаждения. Согласно расчетам, температура ядра реактора в этом случае должна повыситься максимум на 15 градусов, что не повлечет за собой никаких последствий.

Успешные испытания реактора Kilopower показали, что технологии, лежащие в его основе, уже готовы для использования в космических полетах. Это, в свою очередь, позволяет руководству НАСА начать планировать первый испытательный запуск такого реактора в космос, но пока рано говорить о каких-либо сроках. Известно только, что в следующие 18 месяцев исследователи должны разработать, изготовить и испытать новые средства и системы автоматического управления работой реакторов серии Kilopower разной мощности.

dailytechinfo.org



Искусственный фотосинтез воспользуется половиной энергии Солнца



Forschungszentrum Jülich/YouTube

Ученые создали новый полупроводник, который можно применять в системах искусственного фотосинтеза. Этот проводник уникален тем, что может использовать инфракрасную часть спектра Солнца для преобразования углекислого газа в угарный газ и кислород. На эту часть спектра приходится примерно половина приходящей к Земле энергии. Статья с описанием работы опубликована в журнале *Joule*.

Технологии искусственного фотосинтеза, использующие энергию солнечного света для превращения углекислого газа и воды в углеводы и кислород, высоко востребованы в связи с тем, что их можно задействовать в химическом синтезе. Некоторые из подобных систем уже обогнали многие растения по эффективности преобразования света, но пока что ни одной не удавалось использовать излучение инфракрасного диапазона.

«Со времени первого упоминания фотовосстановления углекислого газа в 1978 году, никому не удавалось использовать для этого инфракрасный свет, – говорит главный автор статьи И Се из Науч-

но-технического университета Китая. – Это связано с относительно небольшой энергией инфракрасных фотонов, которая не позволяет непосредственно запустить реакцию разделения диоксида углерода».

Ученые смогли преодолеть эти трудности благодаря слоистому полупроводнику из оксида вольфрама WO_3 , обедненного кислородом. Пустоты вместо атомов кислорода создают промежуточный уровень энергии, который позволяет реакции протекать, так как теперь ИК-фотону с длиной волны вплоть до тысяч нанометров хватает энергии для перевода электрона из валентной зоны на промежуточный уровень и с промежуточного уровня в зону проводимости. У других полупроводников с достаточно узкой для поглощения инфракрасного света шириной запрещенной зоны нет необходимого восстановительного потенциала для фотокаталитических реакций, таких как расщепление воды или восстановление углекислого газа.

В предварительных опытах каталитическая активность полупроводника не ухудшилась после трех



дней непрерывных экспериментов. Для того чтобы превратить полученный материал в коммерческий продукт, необходимо улучшить эффективность пре-

образования, однако работа в любом случае демонстрирует преодолимость препятствий перед использованием ИК-излучения в искусственном фотосинтезе.

indicator.ru



Электромобиль, напечатанный на 3D-принтере, поставят «на конвейер» уже в этом году



Автомобили уже давно стали полигоном для испытаний инновационных технологий. Сегодня автомобили могут ездить на электричестве, на автопилоте, приезжать по вызову в приложении смартфона, а скоро их будут печатать на 3D-принтерах.

Не так давно две компании анонсировали выпуск LSEV, небольшого электромобиля, каждый видимый компонент которого напечатан на 3D-принтере, кроме шасси, сидений и стекла. Небольшая машинка «три на полтора» похожа на Smart Car, но меньше.

LSEV – это детище шанхайского производителя материалов для 3D-принтеров Polymaker и итальянского стартапа, производящего электромобили, XEV. Автомобиль, как сообщается, может разогнаться до 80 километров в час и проходить до 150 километров на одном заряде аккумулятора. Относительно невысокая скорость означает, что LSEV будет хорош исключительно для внутригородских передвижений.

Итальянская почта уже заказала 5000 электромобилей LSEV для развоза корреспонденции и посылок. Другие 2 000 автомобилей заказала ARVAL – компания по лизингу автомобилей, принадлежащая французской банковской группе BNB Paribas.

Несмотря на то что LSEV не первый 3D-печатный автомобиль в истории – американские компании Local Motors и Divergent 3D опередили итало-шанхайскую группу, – но первым выйдет в массовое производство.

Производство LSEV начнется в конце 2018 года, а первые поставки европейцам начнутся в середине 2019 по цене 10 000 долларов за экземпляр. Производство частей и сборка занимают три дня. Производство обычного автомобиля занимает примерно 30–35 часов, но ведь это только начало. Зато LSEV состоит из 57 частей, в то время как обычный автомобиль содержит около 20 000 частей (считая каждый болтик).

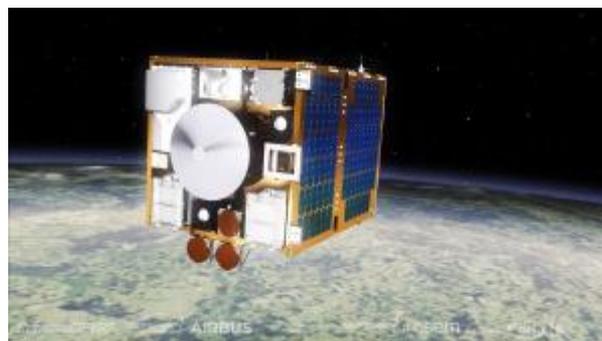
hi-news.ru

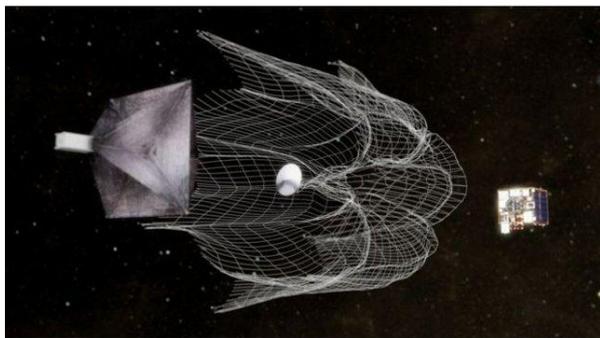


Британцы представили проект по удалению космического мусора вокруг Земли

Проблемой обломков спутников, которые угрожают будущим полетам в космос, занялись британские инженеры, представившие новый проект по удалению космического мусора. Этот проект включает в себя необычный аппарат, захватывающий отбросы огромной сеткой.

Проект называется RemoveDEBRIS и подразумевает несколько этапов. На первом этапе производится запуск «мусорщика» – назначен на 2 апреля. Стокилограммовую установку доставит в космос ракета Falcon 9, которая должна стартовать с базы ВВС США на мысе Канаверал. Во время второго этапа аппарат пройдет проверку на МКС и только в мае отправится на испытания.





Платформа RemoveDEBRIS имеет несколько отсеков. Первые два оснащены системой наведения и гарпуном – с его помощью инженеры надеются больше узнать о поведении объектов в условиях микрогравитации. Третий отсек содержит масштабную сетку, которая накрывает все обломки в округе. Из четвертого отсека аппарат должен выпустить «парус», который наполняется молекулами воздуха

из атмосферы, что замедлит движение платформы и заставит ее упасть на Землю.

Профессор Гульельмо Аглиетти, возглавивший проект, поделился подробностями с изданием BBC News: «Как вы знаете, многие предлагают иную концепцию – для сбора мусора лучше бы подошла роботизированная рука. Но у любой технологии есть свои достоинства и недостатки. К примеру, наша – то есть гарпун и сетка – очень простая и дешевая, но при определенных обстоятельствах может оказаться более рискованной. С другой стороны, если обломки будут двигаться слишком быстро, механическая рука не сможет их ухватить».

В прошлом году американские инженеры продемонстрировали манипуляторы, способные захватывать и удерживать объекты даже в условиях микрогравитации, которые, по их мнению, будут более эффективными в борьбе с космическим мусором.

naked-science.ru

Томские ученые разработали способ сохранения прочности циркониевой керамики

МОСКВА /ТАСС/. Ученые из Томского политехнического университета нашли способ обработки циркониевой керамики, который сохраняет ее прочность. Об этом рассказал ведущий научный сотрудник Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов ТПУ Сергей Гынгазов.

Рекомендации по обработке шлифованных керамических изделий ученые опубликовали в журнале Ceramics International при поддержке гранта Минобрнауки РФ.

Циркониевая керамика может потерять в прочности после шлифовки. «Шлифование изделий применяется, например, в стоматологии, где циркониевая керамика активно используется для протезирования. Оказалось, такое воздействие изменяет кристаллическую решетку керамики, уменьшая прочность материала. Мы предложили простой и дешевый способ победить этот негативный эффект – нагрев до 1 000 градусов в течение 30 минут», – сказал Гынгазов.

Циркониевая керамика обладает целым комплексом полезных физических свойств. Это сверхпрочный материал с низкой теплопроводностью, химически стабильный и биосовместимый. Свойства диоксида циркония делают его весьма перспективным для изготовления самых разных изделий – от кухонных ножей до зубных протезов, от микроэлектроники до современных изоляционных материалов на космических кораблях.

Готовые керамические изделия спекаются из порошка диоксида циркония. По словам Гынгазова, сейчас российские производители керамики используют материал зарубежных поставщиков. Ученые ТПУ разрабатывают технологии, которые улучшат качество отечественного продукта и минимизируют зависимость от импорта в этой сфере производства. Эти исследования ведутся в рамках проекта, поддержанного Российским научным фондом.

<http://tass.ru/nauka/5111779>

