

	Название статьи	Страницы	Цит.
	ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В НОВЕЙШИХ БЫТОВЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПОСРЕДСТВОМ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ <i>Везироглу Т.Н., Эшер В.Д.Д.</i>	10-29	0
	I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1-2-0-0 СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.		
	СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ САУДОВСКОЙ АРАВИИ <i>Алмогрэн С., Везироглу Т.Н.</i>	30-42	0
	ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	42	0
	I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА 1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА 1-4-0-0 НАЗЕМНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СТАНЦИИ		
	ПЕРВИЧНАЯ АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДВУХКООРДИНАТНОГО СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА <i>Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкасенов Д.К.</i>	43-54	0
	I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 1-5-1-0 СОЛНЕЧНЫЙ ДОМ.		
	ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ПАССИВНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ <i>Шепс Р.А., Головинский П.А., Щукина Т.В., Яременко С.А.</i>	55-62	0
	ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ: XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ"	62	0
	I. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. 2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА.		
	OPTIMAL ORTHOGONAL TURBINES OF LOW POWER IN THE INFINITE FLOW <i>Lyatkher V.M.</i>	63-85	0
	IV. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12. ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА. 12-4-6-0 ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМАХ.		
	ОБЗОР СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ БОРА И БОРИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ <i>Факиоглу Э., Юрум И., Везироглу Т.Н.</i>	86-94	0
	ИНФОРМАЦИЯ О ВЫСТАВКЕ И КОНФЕРЕНЦИИ: SOLIDS RUSSIA 2018	94	0
	XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ. АЭЭ 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-5-0-0 МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ.		
	THE EXHIBITION AND CONFERENCE "TECHNOLOGY, APPLICATIONS & OPPORTUNITIES"	95	0
	ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И XI МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА "ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ"	96-97	0
	IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ "ЭКОЛОГИЯ"	97-98	0
	XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-6-0-0 РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ.		
	ТАСС: ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ: РИСКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ	99	0
	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION: ASIA NEEDS NUCLEAR ENERGY TO SUPPLY CLEAN AND RELIABLE ELECTRICITY	99-100	0
	LLOYD'S REGISTER: TECHNOLOGY RADAR 2018	100-102	0
	BASF: НОВЫЕ СТАНЦИИ МЕТРО ПОСТРОЕНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	103-104	0



XXII. ИНФОРМАЦИЯ В ОБЛАСТИ АЭЭ. 41. ИНФОРМАЦИЯ. 41-10-0-0 ОТЗЫВЫ, ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ, КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ.



ОБЗОР МИРОВОЙ ВЕТРОИНДУСТРИИ ЗА 2016 ГОД



Долгошеев В.В., Коробатов Д.В., Мартьянов А.С., Мирошниченко А.А., Мужагитов Я.Р., Хвостов Д.А., Чиненов М.С. 105-113 0

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



НОВОСТИ

114-132 0



ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В НОВЕЙШИХ БЫТОВЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПОСРЕДСТВОМ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ*

(глава 5 из книги «Применение солнечной энергии в зданиях»)

Т.Н. Везироглу¹, В.Дж.Д. Эшер²

¹Институт чистой энергии, Университет Майами
а/я 248294, Coral Gables, Флорида 33124-0620, США

²Компания Escher Technology
Сент-Джонс, Мичиган, США

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.010-029

Заключение совета рецензентов: 15.06.17 Заключение совета экспертов: 18.08.17 Принято к публикации: 12.09.17



SOLAR ENERGY UTILIZATION IN ADVANCED RESIDENTIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS THROUGH HYDROGEN ENERGY

(Chapter 5 from "Solar Energy Application in Buildings")

T. Nejat Veziroğlu¹, William J.D. Escher²

¹Clean Energy Research Institute, Mechanical Engineering, University of Miami
P.O. Box 248294 Coral Gables, FL 33124-0620, USA

²Escher Technology Associates
St. Johns, Michigan, USA

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.010-029

Referred 15 June 2017 Received in revised form 18 August 2017 Accepted 12 September 2017

*Везироглу Т.Н., Эшер В.Дж.Д. Применение солнечной энергии в новейших бытовых и коммерческих установках посредством водородной энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):10-29.
Ранее: Copyright © 1979 by Academic Press, Inc. All rights of reproduction in any form reserved. ISBN 0-12-620860-3.



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 энергетики (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» (ISJAEЕ).

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, 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 (ISJAEЕ).

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 book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

1. Введение

Сегодня на фоне истощения запасов и подорожания традиционных ресурсов во многих странах мира ведутся работы по внедрению солнечных энергетических систем первого поколения, способных удовлетворить текущие потребности в отоплении и охлаждении помещений и нагреве воды. Такие системы основываются главным образом на плоских пластинчатых коллекторах, ограничивающих температуру рабочей жидкости в пределах 93,3 °С. Этот предел может быть значительно увеличен за счет использования вакуумных трубчатых коллекторов нового образца, применение которых, однако, сопряжено с дополнительными расходами на коллектор. В последнее время в свете решения задачи достижения высоких температур большой интерес вызывают концентрирующие коллекторы, несмотря на сложности, сопутствующие их применению.

В ретроспективе тенденция к повышению температуры рабочих жидкостей является прямым следствием необходимости достичь более высокой производительности и большей гибкости в работе солнечных энергетических систем. В дальнейшем поиск более гибкого и развернутого решения можно будет

сфокусировать на «универсальных» системах преобразования солнечной энергии. Это позволит решить не только проблему отопления помещений и нагрева воды, но и охлаждения, которое пока редко предлагается в современных низкотемпературных системах. Высокие температуры можно использовать в специальных процессах, таких, например, как высокотемпературное приготовление пищи. Кроме того, «универсальные» системы позволят связать расход электроэнергии с реальными потребностями. Появится топливо для переносных электростанций и даже легкого автомобильного транспорта. А потребности в охлаждении будут удовлетворены за счет систем контроля окружающей среды, следящих за уровнем отопления, охлаждения и влажности.

Однако реализация этих проектов требует значительно более продуманной системы преобразования солнечной энергии. Помимо этого, потребуются новые способы хранения и распределения энергии внутри системы. Такие традиционные способы, как нагрев воды больше не смогут решать все поставленные задачи.

Предполагается, что новым средством для достижения стоящих перед современными энергетическими системами целей может стать «водородная энер-



гия», которая подразумевает использование в качестве топлива газообразного водорода или водородно-кислородной смеси, полученной путем разложения воды на ее составляющие с помощью солнечной энергии.

В настоящей главе рассматриваются способы достижения этих целей в контексте новейших бытовых и промышленных систем преобразования солнечной энергии и связанных с ними технических требований.

Авторами обсуждаются вопросы: 1) получения солнечного водорода; 2) хранения и распределения водорода в солнечных энергетических системах; 3) использования водорода в качестве топлива; 4) разработки обогревателей, работающих на водороде; 5) разработки систем кондиционирования и охлаждения на основе водорода; 6) получения электроэнергии за счет водородных технологий.

2. Получение солнечного водорода

2.1. Общая концепция

Водород – это вторичное топливо, или синтетический вид энергии наподобие электричества, который можно получать за счет использования первичного энергоресурса. Традиционным способом является процесс разложения воды, например, хорошо известный электролиз, в результате которого происходит выделение как водорода, так и кислорода (составляющие воды) в виде свободного газа. В настоящее время ведутся исследования более сложных процессов, таких как многоступенчатый процесс термохимического разложения воды. В будущем они смогут дополнить и даже полностью заменить электролиз воды. Однако следует отметить, что и технология электролиза не стоит на месте и непрерывно совершенствуется.

Несомненно, среди первичных источников энергии, которые используются для получения водорода, солнце еще долгое время будет оставаться основным кандидатом. Получение солнечного водорода по своей сути сводится к захвату и преобразованию энергии солнечного излучения в целях разложения воды, выступающей в качестве «исходного сырья», на водород и кислород. Этот процесс можно представить как технологический, в том или ином виде, или как биологический. В последнем случае можно наблюдать, что процесс фотосинтеза в значительной степени обусловлен расщеплением воды в довольно сложном биоцикле. В настоящей работе рассматриваются только «технологические» процессы.

В работе было уделено внимание двум принципиально разным масштабам получения солнечного водорода: крупномасштабному «заводскому» производству (в тоннах полученной продукции) и мелкомасштабному «распределенному» производству (в киловаттах и меньше).

В настоящей главе рассматривается небольшой масштаб производства, которое подходит как для

бытового, так и для коммерческого применения. Другими словами, использование энергии солнца для получения водорода (и кислорода) из воды посредством электролиза воды (единственный существующий на сегодня метод) рассматривается в контексте новейшей системы преобразования солнечной энергии, которую можно использовать в бытовых и коммерческих целях, а также в легкой промышленности.

2.2. Электролиз воды

Электролиз воды – это электрохимический процесс, протекающий в специальных устройствах, которые называются электролизерами. На мировом рынке представлены различные модели электролизеров, выпускаемые такими компаниями, как Lurgi AG, Asea Brown Boveri Ltd, DeMag, The Electrolyser Corporation, а также DeNora и Teledyne Energy Systems. Электролизер преобразует электрическую энергию в водородную энергию, а эффективность его работы, колеблющаяся на сегодняшний день в диапазоне 65 ÷ 75 %, зависит от типа и рабочих характеристик устройства. Это определение основывается на высшей теплотворной способности полученного водорода по отношению к мощности постоянного тока, подаваемого на электролизные ячейки.

Описание методики использования электролизеров воды выходит за рамки настоящей работы, кроме краткого упоминания основных процессов. При определенных условиях постоянный ток, проходя через воду между двумя электродами, вызывает разложение воды на ее составляющие. При наличии такого электролита, как гидроксид калия (вода сама по себе является слабым проводником электричества) образуются ионы водорода и гидроксила (H^+ и OH^-). Положительные ионы водорода мигрируют к катоду или отрицательному электроду, где они объединяются с электронами и образуют молекулы водорода H_2 . Собираясь на поверхности электрода, молекулы отрываются от него и в виде пузырьков поднимаются к поверхности электролита, где газ может быть собран. Аналогичным способом ионы гидроксила притягиваются к положительному электроду, или аноду, где электрон отдается с образованием воды и кислорода. Кислород переходит в свою молекулярную форму O_2 и собирается точно таким же способом, как и водород.

На сегодняшний день существуют два основных подхода к конструкции электролизеров: монополярный и биполярный. Первый иногда называют электролизером «бункерного» типа, а второй – фильтр-прессного типа. Схематические изображения этих типов электролизеров представлены на рис. 1. В обоих случаях напряжение, которое подается на каждую отдельную ячейку, а также на повторяющийся элемент, включающий анод и катод, на разделитель (выполненный, как правило, из асбеста) и электролит, составляет порядка 2,0 В. При этом чем меньше напряжение, тем выше общая эффективность устройства, соответствующая в среднем около 1,48 В на 100 % КПД преобразования.



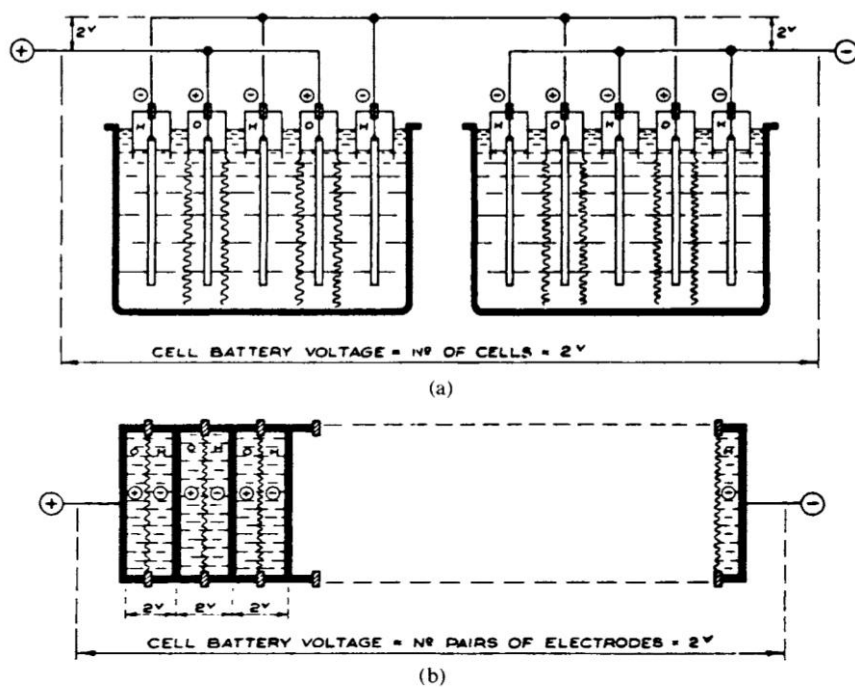


Рис. 1 – Схематические изображения монополярного (а) и биполярного (б) электролизера (предоставлено компанией The Electrolyser Corporation Ltd)
 Fig. 1 – Schematic diagrams of (a) unipolar and (b) bipolar electrolyzer construction. (Courtesy of The Electrolyser Corporation Ltd.)

На рынке представлены портативные электролизеры различных производителей. Например, производительность электролизера компании Electrolyser Corporation составляет $0,57 \text{ м}^3/\text{ч H}_2$. Для сравнения стандартный сварной цилиндр для хранения водорода под давлением 2 250 psi вмещает около $6,23 \text{ м}^3$, или $0,4536 \text{ кг H}_2$. Большие промышленные установки рассчитаны на входные мощности порядка $1 \div 2 \text{ МВт}$ электроэнергии с перспективой их увеличения в будущем до $5 \div 20 \text{ МВт}$ на каждую установку. Электролизная система фирмы Asea Brown Boveri Ltd, установленная на Асуанском гидроузле в Египте и задействующая множество агрегатов, дает в общей сложности около 150 МВт электроэнергии.

В отдаленной перспективе стоит вопрос не столько разработки крупных проектов для промышленного производства водорода, сколько повышения эффективности и окупаемости электролизеров будущего поколения. Эффективность на уровне более 90 % будет весьма ощутима вместе со снижением себестоимости с сегодняшнего уровня $\$250/\text{кВт}$ электроэнергии до порядка $\$100/\text{кВт}$. Следует отметить, что значительная часть затрат связана с «процессом преобразования» поступающего переменного тока в требуемый для подачи на ячейки постоянный ток. В этот процесс вовлечено множество устройств, таких как выпрямители, преобразователи, как правило, дорогие, а также управляющие устройства, переключатели и прочие приборы. При использовании локального источника генерации энергии, его будет достаточно для соблюдения всех условий, необходимых для функционирования ячеек. Например, исследования показали, что выработка постоянного тока и прямое подключение к электролизеру могут вдвое сократить расходы по сравнению с использо-

ванием переменного тока, требующего «преобразования». Как будет показано, выработка постоянного тока может стать практическим шагом на пути к сокращению расходов и повышению общей эффективности преобразования применительно к устройству, рассматриваемому в рамках настоящей работы.

2.3. Генерация солнечной электроэнергии для электролиза

Как уже отмечалось, для процесса расщепления воды требуется электроэнергия. Существует множество способов получения электроэнергии с помощью солнечных энергосистем: некоторые из них уже проверены и широко применяются, в то время как другие существуют пока только в теории, хотя технически могут быть признаны целесообразными. Мы остановимся только на двух основных методах, работающих в пилотном режиме: фотоэлектрическое (прямое) преобразование и использование тепловых двигателей или генераторов. С развитием фотоэлектрического, термоэлектрического, термоэлектронного и ряда других смешанных методов преобразования их можно будет применять в солнечноводородных системах.

2.4. Фотоэлектрические системы

Так называемые солнечные элементы (фотоэлементы) хорошо изучены и имеют практическое применение непосредственно для генерации электроэнергии из солнечного излучения. Впервые этот метод был продемонстрирован в качестве способа снабжения электроэнергией искусственного спутника земли и ракетоносителя Авангард-1, запущенного в 1958 г. С тех пор данный метод нашел применение в ряде наземных проектов в области солнечной энер-



гетики, например, в устройствах удаленной связи, на буйках в море.

Существует несколько видов фотоэлектрических устройств: кремниевые элементы; тонкопленочные структуры, например, на основе сульфида кадмия; ячейки из более сложных трехкомпонентных материалов. Все они достаточно дорогие и обладают ограниченной в некоторой степени эффективностью порядка $10 \div 15$ %. Тем не менее перспективы технологии массового производства в свете снижения издержек и повышения эффективности выглядят вполне обнадеживающими, хотя полное развертывание систем преобразования солнечной энергии для бытового и коммерческого использования будет ограничено до появления соответствующих разработок. Положительным аспектом фотоэлектрического преобразования является то, что вырабатываемый постоянный ток можно напрямую подключать к электролизным системам без необходимости во вспомогательном оборудовании и процессах, увеличивающих издержки и снижающих эффективность. Эксперименты с фотоэлектрическими/электролизными системами, проведенные в калифорнийской Лаборатории реактивного движения, показали неплохие результаты с точки зрения сочетаемости компонентов.

2.5. Тепловые двигатели и генераторы

При наличии действующих среднетемпературных и высокотемпературных солнечных коллекторов тепловые двигатели, работая на солнечной энергии, могут вырабатывать мощность на валу, которую, в свою очередь, можно использовать для питания стандартных генераторов, вырабатывающих электроэнергию для электролиза. Несмотря на то что генераторы обладают, как правило, высокой эффективностью (порядка 90 % и выше в зависимости от типа и размера устройства), КПД теплового двигателя ограничен температурными факторами (С. Карно), а также эффективностью механической системы. Вместе с тем, в зависимости от выбора конкретной системы, общий уровень эффективности выработки электроэнергии может быть значительно выше, чем у аналогичных фотоэлектрических установок. Ключевым моментом в данном случае является обеспечение высокой температуры рабочей жидкости на выходе из солнечного коллектора, что предполагает использование фокусирующих коллекторов.

Таким образом, в любой эффективной системе преобразования солнечной тепловой энергии в мощность на валу присутствуют фокусирующие коллекторы, способные отслеживать солнце. С достижением высоких температур можно выбрать соответствующий термодинамический цикл и подходящее механическое оборудование.

В большинстве случаев применяются циклы двигателей внешнего сгорания, например, цикл Стирлинга, цикл Ренкина и цикл Брайтона. Здесь уместно отметить параболоцилиндрический зеркальный концентратор с системой слежения за солнцем и уста-

новленным в его фокусе теплоприемником двигателя Стирлинга. Такая система может обеспечить температурные условия на уровне $815,6 \div 982$ °С, требуемые для работы двигателя с КПД вала порядка 40 %.

На высокотемпературном конце может применяться также газовая турбина цикла Брайтона, использующая в качестве рабочей жидкости инертные газы и даже воздух. В таком случае в фокус концентрирующего коллектора того или иного типа, обладающего высокой концентрацией, также устанавливается теплообменное устройство.

При необходимости в получении более низких температур можно применять установки, работающие по циклу Ренкина, например, паросиловую установку, функционирующую в температурном диапазоне рабочей жидкости от 260 °С до 538 °С и вырабатывающую мощность на валу со средним и высоким значением КПД. Эффективность таких систем составит порядка $25 \div 35$ % в зависимости от условий охлаждения или отвода тепла. В малых проектах могут применяться поршневые расширители, обеспечивающие работу по циклу Ренкина, в частности, стандартные паровые двигатели.

Ключевое значение приобретает выбор генераторов, наиболее подходящих к тепловому двигателю. Следовательно, как отмечалось в главе об электролизерах, оптимальное электрическое соответствие ячейкам обеспечит значительное снижение издержек и позволит повысить эффективность работы. Таким образом, ожидается, что выработка постоянного тока будет играть важную роль в солнечно-водородных энергоустановках будущего поколения.

3. Хранение и распределение водорода в солнечных энергоустановках

3.1. Введение

Для солнечных энергоустановок, задействующих энергию водорода в качестве накопителя энергии и несущей среды, необходимо разработать способы хранения водорода (и, возможно, кислорода) и его распределения в требуемых условиях до места использования, например, нагревательных установок. Аналогичным образом функционируют современные системы газоснабжения, которые сегодня применяются в гораздо больших масштабах.

На данный момент подземные газохранилища используются для «поддержания уровня нагрузки» систем производства и транспортировки с учетом резких сезонных колебаний спроса на газ в течение календарного года. После поставки газа в городскую сеть, где обычно происходит одоризация и падение давления, его необходимо доставить до всех конечных потребителей. Поэтому частные дома и организации должны быть оснащены специальным газовым оборудованием, включая газовые трубы, клапаны, регуляторы и счетчики. В солнечной энергосистеме большинство этих функций будет выполняться за счет водородных технологий.



Итак, в данном контексте должны рассматриваться системы хранения и распределения водорода и кислорода. Система хранения требуется для обеспечения соответствия между темпом производства водородной энергии, который ограничен максимальной продолжительностью солнечного излучения, и «пиковым» спросом на водородную энергию со стороны конечного потребителя. Система распределения требуется для транспортировки водорода и кислорода до точки потребления при соответствующих значениях давления и скорости потока, а также для обеспечения безопасности процесса на всех его этапах.

3.2. Системы хранения

Системы хранения водорода и кислорода для солнечных энергосистем бытового и коммерческого назначения, вероятно, ограничены установками, способными оперировать с этими составляющими в газообразной форме. В случаях когда для удобства хранения и использования требуется жидкая форма (как в некоторых типах систем транспортировки), может быть применено криогенное сжижение. В целом для систем рассматриваемого в работе масштаба это оказалось экономически невыгодно, поэтому криогенный водород и кислород не будут рассматриваться.

Водород и кислород в газообразном состоянии можно хранить в различных видах контейнеров или баллонов высокого давления при разных значениях давления. Кроме того, существует отдельный способ хранения водорода, предоставляющий значительные преимущества с точки зрения повышения плотности хранения при низких и средних значениях давления. В этом случае используется металлгидридная система хранения, которая будет рассматриваться ниже.

3.3. Хранение водорода и кислорода в баллонах высокого давления

Некоторые типы электролизеров могут вырабатывать водород при повышенном давлении (около 100 psi), однако большая часть из них генерирует газ при давлении чуть выше атмосферного, что требует сжатия водорода до уровня максимального значения давления хранения. Вероятно, это значение окажется ниже уровня 2 250 psi, который требуется при коммерческой поставке в баллонах, что обусловлено трудностью сжатия водорода с высоким коэффициентом давления. Кислород, обладающий более высокой молекулярной массой, является гораздо более плотным газом и сжимается легче, поэтому «задавать выбор» верхнего уровня давления будет водород.

Баллоны высокого давления для хранения водорода бывают металлические и неметаллические. Традиционный металлический резервуар состоит из бесшовных сварных или цельных труб с приварен-

ными на каждом конце полусферическими головками. При высоких давлениях используются такие же кованые «трубные пучки», как и при промышленных поставках газа. В неметаллических баллонах применяются эпоксидные стекловолоконные структуры с последующей установкой герметизирующего вкладыша внутри резервуара. Одно из преимуществ эпоксидной стекловолоконной структуры заключается в невозможности появления в ней трещин, которые могут возникнуть в металлических баллонах.

Отдельную проблему водородных технологий представляет водородное охрупчивание – процесс разрушения некоторых металлов вследствие воздействия атомарного водорода, особенно в местах возникновения локальной текучести материала. Это приводит к потере эластичности и прочности поврежденных структур. Большинство металлов, за исключением алюминиевых сплавов и сплавов на основе меди, восприимчиво к этому явлению, поэтому при разработке резервуаров такого типа нужно учитывать опыт эксплуатации баллонов высокого давления.

3.4. Металлогидридные системы хранения водорода

Значительный интерес вызывает другой способ хранения газообразного водорода, который с помощью отдельных металлических сплавов и интерметаллических соединений обеспечивает плотность хранения, в объемном исчислении значительно превосходящую хранение в баллонах высокого давления. Специалисты Брукхейвенской национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory, BNL) в США получили такое металлгидридное соединение – железотитановый гидрид. Несмотря на то что это соединение слишком тяжело для применения в большинстве типов систем транспортировки (имеются исключения), его можно уверенно использовать в стационарных системах хранения водорода, рассматриваемых в рамках настоящей работы.

Экспериментальная установка для хранения водорода на основе железотитанового гидрида, разработанная в Брукхейвенской национальной лаборатории по заказу Государственной электрической и газовой компании Нью-Джерси (Public Service Electric and Gas Company, PSE&G), вмещает около 5,9 кг водорода. Установка (рис. 2) содержит примерно 408 кг сплава Fe-Ti в твердой форме. Под давлением водород насыщает металл, а теплота образования гидрида отводится охлажденной водой (см. многочисленные водоотводы в правой части устройства на рис. 2).



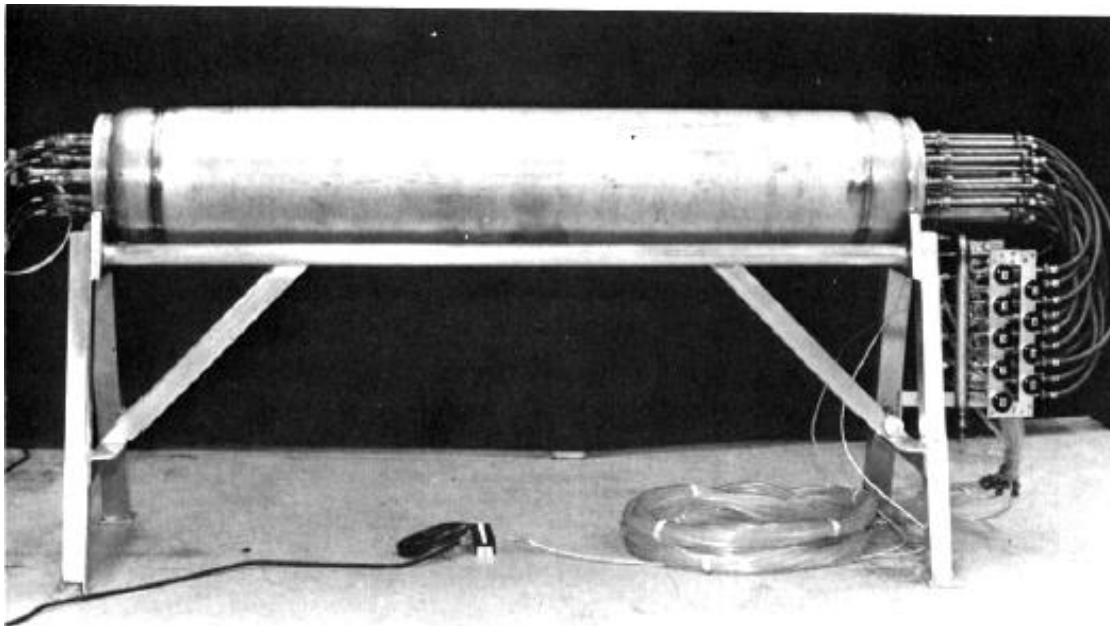


Рис. 2. – Экспериментальная установка для хранения водорода на основе железотитанового гидрида (фотография предоставлена Брукхейвенской национальной лабораторией)
Fig. 2 – Experimental iron titanium hydride hydrogen storage unit (Brookhaven)
 (Courtesy of Brookhaven National Laboratory.)

Водород выделяется по требованию за счёт нагретой воды, циркулирующей в каналах сквозь гидридный слой. В большинстве случаев избыточное тепло, выделяемое в смежных процессах, можно использовать для подачи подогретой воды с сохранением, как правило, тепловой энергии. Гидридный слой прошел множество циклов в экспериментальном контуре хранения электроэнергии, оснащённом электролизером и топливным элементом. Более подробная информация об этой установке и ее работе была представлена Брукхейвенской национальной лабораторией.

3.5. Системы распределения

Для солнечной энергосистемы, использующей водород, как и для небольшой газовой системы требуются трубы, соединительные элементы, клапаны и задвижки, а также другое соответствующее оборудование для транспортировки водорода и, при необходимости, кислорода, от электролизера в хранилище, а затем из хранилища – к работающим в системе устройствам, таким как воздухонагреватели и водонагреватели.

В целом оборудование для газораспределения считается хорошо отработанным и доступным. Однако сегодня на рынке отсутствуют качественные и недорогие устройства для домашнего и коммерческого производства наподобие газовых приборов.

Очевидно, активная разработка и внедрение таких устройств начнется тогда, когда в отрасли с достаточной силой заработают рыночные механизмы.

Между тем работа в данном направлении ведется в ряде исследовательских лабораторий. Наибольший интерес представляет проект Института газовых технологий, реализуемый при финансовой поддержке Управления энергетических исследований и разработок США. Специалисты института разработали серию испытательных контуров для бытовых и коммерческих устройств, применяющихся сегодня в современной газораспределительной системе, но работающих на газообразном водороде. Основная задача заключается в оценке эффективности и надежности газового производственного оборудования в условиях потока водорода. Экспериментальная конструкция состоит из датчиков, регуляторов, клапанов, задвижек, труб и других элементов (металлических и пластиковых), скрепленных между собой и смонтированных посредством различных технологий, что обеспечивает циркуляцию водорода в системе при реальных значениях рабочего давления. Испытательный контур бытового устройства представлен на рис. 3.

Следует отметить, что все оборудование для испытаний предоставлено производителями и рядом газовых компаний, которым направят результаты по итогам проекта, стартовавшего весной 1977 г.

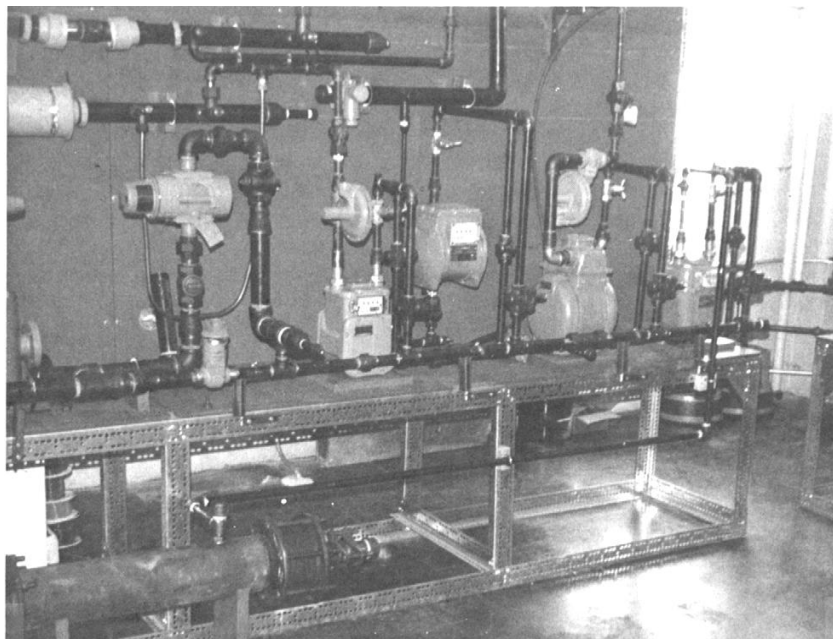


Рис. 3 – Экспериментальная бытовая установка с испытательным водородным контуром (предоставлено Институтом газовых технологий, США)

Fig. 3 – Experimental residential system hydrogen test loop (IGT) (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



По всей видимости, кроме вопросов, связанных с разработкой и испытаниями, требования к распределительной системе в новейшей солнечной энергоустановке не вызывают затруднений.

4. Водород в качестве топлива

4.1. Общие положения

Сегодня водород, несмотря на перспективу занять ведущую позицию в качестве синтетического топлива или «энергоносителя», редко используется как газообразное топливо. Несмотря на то что в технологическом контексте водород является высококачественным чистым топливом, его стоимость значительно превышает стоимость ископаемого топлива, в частности природного газа (преимущественно метана и его производных). Это обусловлено тем, что на земле не существует водорода в свободном состоянии. Практически весь водород находится в виде химических соединений, например воды. Но по мере истощения запасов жидкого ископаемого топлива с последующим повышением его стоимости обозначатся явные конкурентные преимущества водородных технологий. Кроме того, разработка эффективных методов серийного производства водорода посредством одного или более процессов «расщепления воды» выйдет на новый более плодотворный уровень, что приведет к снижению стоимости водорода по сравнению с сегодняшним уровнем цен.

С другой стороны, можно отметить тенденцию к широкому применению газообразного топлива со значительным содержанием водорода. В качестве примера можно привести сегодняшний «низкокалорийный природный газ», получаемый путем газификации угля, а также промышленный или городской газ, использовавшийся несколько десятилетий назад. Последний был вытеснен природным газом в 30-40-х

гг. XX в. во многих промышленно развитых странах. Сегодня на производственных и перерабатывающих установках, где в качестве отходящего газа образуется нечистый водород, его иногда используют как топливо, например, в бойлере для образования пара.

Североамериканская производственная компания (North American Manufacturing Company), занимающаяся строительством линий для подачи природного газа и поставкой топочного оборудования, разработала несколько систем сжигания водорода, включая специальные средства контроля. Рабочие элементы системы, подобранные специальным образом под работу с водородом, продемонстрировали хорошие характеристики.

В последнее время водород стал экспериментально применяться в качестве топлива для электростанций на базе поршневых и роторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также топлива для газотурбинной установки. В данной работе авторы рассматривают перспективу использования водорода в качестве транспортного топлива. Кроме способности к длительной эксплуатации, водород, получаемый из воды с помощью неископаемых первичных энергоресурсов, таких как солнечная энергия, обладает неплохими техническими характеристиками. Например, водород рассматривается в качестве отличной альтернативы авиационному топливу. В криогенном (сжиженном) состоянии водород обладает энергией на единицу массы, в 2,8 раз превышающей этот показатель для используемых сегодня видов углеводородного топлива. Это особенно важно в авиации, поскольку вес и рабочие характеристики самолета крайне чувствительны к гравиметрической теплотворной способности (теплота сгорания) топлива. С другой стороны, помимо достоинств, у водорода есть и недостатки: слишком низкое значение объемной теплоты сгорания, чрезвычайно низкая температура и крайне неустойчивый характер (в криогенном состоянии).



В настоящее время водород применяется в основном в качестве химического посредника и технологического раствора в химической промышленности и нефтепереработке. В частности, для производства аммиака требуется получить водород из углеводородного сырья на этапе производства синтез-газа.

Возвращаясь к перспективам использования водорода в качестве топлива для бытовых и коммерческих устройств, следует отметить ряд исследовательских центров, разрабатывающих опытные образцы приборов на водороде, и пилотные системы распределения водорода. К числу таких центров относятся лаборатории Американской ассоциации газовой промышленности (англ. American Gas Association (AGA) Laboratories) в Кливленде и Огайо, а также Институт газовых технологий в Чикаго. Результаты работы, ведущейся в этих исследовательских центрах, будут рассмотрены в соответствующих разделах данной главы.

4.2. Значимые характеристики водородного топлива

Нижний (обедненный) предел воспламеняемости водорода в воздухе составляет около 4 % (по объему), в то время как верхний (обогащенный) предел – приблизительно 75 %. Этот диапазон значений воспламеняемости значительно шире, чем у природного газа (около 5 % и 15 % соответственно). Однако у некоторых видов топлива, применяемых сегодня (особенно у жидкого топлива), нижний предел значительно ниже, чем у водорода. В случае аварийной утечки или разлива такое значение нижнего предела означает возможность возникновения пожара или взрыва. В этом отношении водород может оказаться более безопасным топливом, чем жидкое горючее (например, бензин).

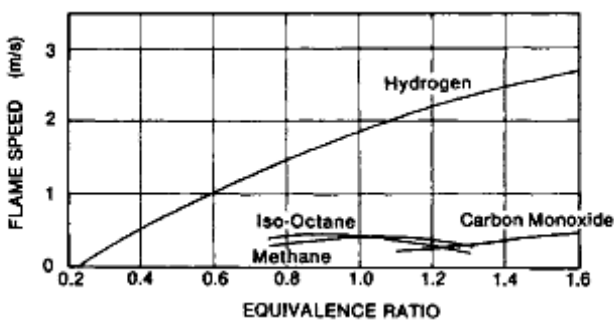


Рис. 4 – Сравнительные характеристики скорости распространения пламени
(из Journal of Chemical & Engineering, № 4, 226 (1959))
Fig. 4 – Comparative fuel laminar flame speed characteristics
[From J. Chem. Eng. 4, 226 (1959).]

Рабочие характеристики газа в таких системах сгорания, как горелки приборов, обусловлены тремя ключевыми техническими аспектами: скоростью распространения ламинарного пламени, дистанцией гашения и минимальной энергией зажигания. Характеристики водорода в сравнении с другими видами топлива представлены на рис. 4, 5 и 6 соответствен-

но. Графики показывают, что водород ведет себя совершенно уникально.

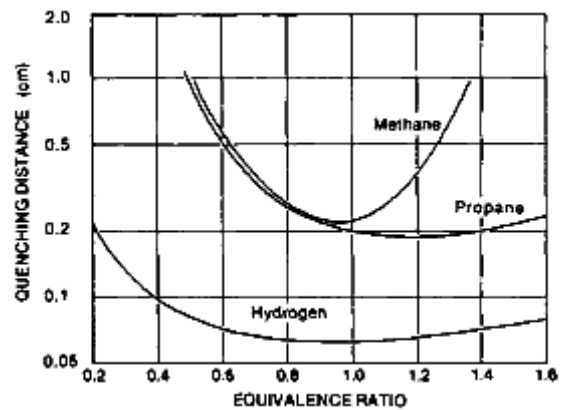


Рис. 5 – Сравнительные характеристики дистанций гашения топлива
(из Journal of Chemical & Engineering, №15, 798 (1947))
Fig. 5 – Comparative fuel quench distance characteristics.
[From J. Chem. Phys. 15, 798 (1947).]

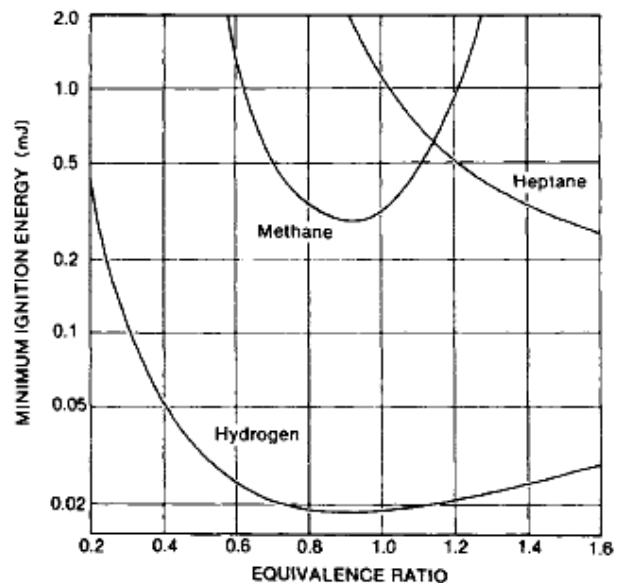


Рис. 6 – Минимальный уровень энергии зажигания различных видов топлива
(из журнала Journal of Chemical Physics, №15, 798 (1947))
Fig. 6 – Comparative fuel minimum ignition energy characteristics. [From J. Chem. Phys. 15, 798 (1947).]

Применительно к практическому применению таких устройств, как, например, бытовые газовые приборы, можно назвать два следствия этого поведения водорода:

1. Устройства, предназначенные для работы на традиционном топливе, в частности природном газе, не совсем подходят для использования водорода и могут демонстрировать неудовлетворительные рабочие характеристики или вовсе не работать.

2. Устройства, разработанные специальным образом для использования всех преимуществ водорода, способны продемонстрировать превосходные



рабочие характеристики и маневренность в эксплуатации. Более того, использование водорода в таких устройствах открывает значительные возможности для упрощения системы и снижения затрат.

На рис. 4–6 показано, как практически подойти к выбору конструкции устройств, работающих на водороде, с точки зрения вышеизложенных выводов.

Скорость распространения пламени

Чрезвычайно высокая скорость распространения пламени водорода в очень широком диапазоне стехиометрии (соотношение топливо/воздух от обедненного до обогащенного состояния) является прямым следствием высокой реактивности водорода в качестве топлива (см. рис. 4). В системах, работающих на предварительно смешанных топливно-воздушных смесях, такие водородно-воздушные смеси сгорают очень быстро (короткое интенсивное пламя), и пламя может выходить за расчетные пределы распространения, то есть может возникнуть эффект «обратного потока» в канале предварительного перемешивания.

Дистанция гашения

По сравнению с другими видами топлива, пламя водорода может распространяться сквозь более узкие отверстия и проходы, не угасая вследствие теплопроводности и других поверхностных эффектов. Поэтому пламегасящие и другие устройства подобного типа, хорошо взаимодействующие с другими видами топлива, не могут надежно функционировать с водородом или могут вовсе не работать, поскольку их действие основано на принципе гашения. Это также обусловлено эффектом обратного потока водородно-воздушных смесей (см. рис. 5).

Энергия зажигания

Минимальный уровень энергии зажигания водорода на порядок ниже аналогичного показателя для других видов топлива: 0,02 МДж по сравнению с 0,3 МДж (рис. 6).

С одной стороны, это сводится к проблеме безопасности в случае утечки газа в устройствах. Общее правило относительно утечек водорода обязывает автоматически признать возникновение пожароопасной ситуации. С другой стороны, это свойство легкой воспламеняемости водорода способствует внесению ряда усовершенствований в конструкцию систем зажигания, таких как отведение пламени пилотной горелки и другие способы высокоэнергетического зажигания. Далее будет продемонстрировано, что для работы с водородом подходят исключительно системы каталитического зажигания.

4.3. Сжигание водорода в сравнении с другими видами топлива

Как будет показано, существует две базовые модели сжигания водорода в соединении с кислородом в воздухе или в качестве чистого реагента: пламенное и каталитическое сжигание. Мы рассмотрим тот факт, что среди прочих видов топлива только водород хо-

рошо подходит для каталитического сжигания, а на этом методе базируется ряд интересных экспериментальных проектов. Тем не менее, в силу наибольшей популярности и распространенности метода пламенного сжигания, будет полезно ознакомиться в первую очередь с основами пламенного сжигания водорода.

Возможно, наиболее значимым качеством водородного пламени является его *прозрачность* и отсутствие цвета. В условиях дневного света пламя водорода полностью невидимо, его можно обнаружить только по образованию «тепловых полос» – следствие изменения плотности и индекса преломления в зависимости от температуры продуктов горения и нагретого воздуха. В ночное время, а также внутри помещений с плохим фоновым освещением водородное пламя обретает мягкое приглушенное сияние, которое в большинстве случаев можно отслеживать по микропримесям и другим газам в потоке водорода.

Невозможность обнаружения пламени водорода повышает риск непреднамеренного воспламенения, влекущего за собой телесные повреждения и порчу имущества. Для решения этой задачи часто предлагается включение *дополнительного источника света* в систему подачи водорода. Такое дополнение позволит придать цвет и светимость, что будет аналогично добавлению одорантов в природный газ. По сути, для того чтобы получить средство обнаружения утечек и визуализации пламени в водородных системах, необходимо подобрать правильное сочетание одоранта с дополнительным источником света. При выборе подобного дополнительного компонента нужно помнить, что каталитические устройства весьма чувствительны к отравлению и другим разрушительным эффектам вследствие особого состава компонента. Это может свести на нет преимущества каталитического сжигания.

Ввиду высокой скорости распространения (см. рис. 4), форма пламени водорода может резко отличаться от формы пламени других видов топлива с меньшей скоростью распространения. Например, в простой бунзеновской горелке, работающей стандартно на природном газе, использование водорода даст более короткое и интенсивное пламя при тех же параметрах воздушного отверстия. Кроме того, как уже отмечалось, могут возникнуть проблемы, связанные с обратным потоком. Это характерно для всех типов горелок с полным предварительным смешением газа с воздухом, в частности, для стандартного элемента верхнего предела или газовой горелки, изображенной на рис. 7. Этот тип горелок работает на природном газе, подаваемом в газовое сопло при низких давлениях, то есть порядка нескольких 5 ÷ 8 см.

По данным Института газовых технологий и компании Billings Energy Corporation (г. Прово, Юта), в традиционном газовом оборудовании, модифицированном для работы на водороде, необходимо перекрыть все отверстия первичного воздуха и обеспечить хорошее уплотнение во избежание попадания воздуха, чтобы пламя водорода не смогло проник-



нуть в смесительную камеру (центральный патрубок, выводящий вверх потоки от отверстий горелки). Но даже в этом случае сотрудниками института были обнаружены шумы при зажигании (включении) и отключении (гашении). Пламегаситель здесь, возможно, не подойдет из-за сопротивления потоку, создаваемого в системе реально низкого давления. В качестве решения этой проблемы группой ученых из Института газовых технологий (ИГТ) предложено уменьшить внутренний объем горелки, что в действительности означает модификацию ее конструкции для использования водорода.

Однако в горелках, работающих на предварительно подготовленной смеси (например, в бунзеновской горелке), длину пламени можно уменьшить, повысив давление подачи газа. По оценкам ИГТ, десятикратное увеличение способно привести пламя в исходную форму. Другим важным аспектом пламенного сжигания водорода является образование побочных продуктов и выбросов, влияющих на поддержание качества воздуха, что имеет принципиальное значение в бытовых неветилируемых приборах и устройствах с открытым пламенем. Водород в сво-

ем составе вообще не имеет углерода, поэтому он абсолютно свободен от оксида углерода и несгоревшего углеводородного пара, а единственными отходами, остающимися в устройстве на основе водорода в случае неполного сгорания или невоспламенения, будет несгоревший водород. Вероятность образования оксидов углерода и выбросов будет существовать до тех пор, пока не решены такие проблемы, как сгорание смазки в водородном двигателе внутреннего сгорания. В свете вышеизложенного можно отметить, что метод пламенного сжигания водорода может эффективно применяться в неветилируемых и бестопливных системах, которые будут выбрасывать, как правило, только водяной пар.

К сожалению, существует одна проблема – образование *оксида азота*. Это единственный «загрязняющий фактор», которому в устройствах на основе водорода придается особая важность. Более того, в процессе пламенного сжигания водорода при несколько более высоких температурах, чем, например, метана (аналог природного газа) уровень выброса оксидов азота (NO_x) водородных устройств будет значительно выше.

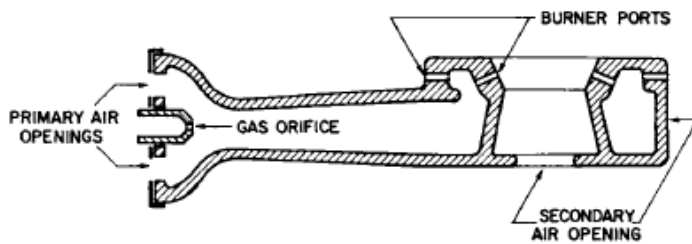


Рис. 7 – Вид стандартной атмосферной горелки в разрезе (предоставлено Институтом газовых технологий, США)
 FIG. 7 – Sectional view of a typical atmospheric range-top burner. (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

По сути, высокая локальная температура, достигаемая пламенем, приводит к образованию из азота и кислорода, содержащихся в воздухе, оксида азота (NO), который впоследствии может быть окислен до NO_2 (обозначаются как « NO_x »). Тенденция к образованию выбросов NO_x усиливается с повышением температуры. Сотрудникам лаборатория Американской ассоциации газовой промышленности удалось определить количество выбросов NO_x , которые осу-

ществляют устройства на основе природного газа, модифицированные для работы на водороде, и сравнить результаты с показателями традиционных газовых приборов. В табл. 1 представлены показатели по выбросам NO_x , где уровень природного газа оценен в $80 \div 100$ частей на миллион (ppm), а данные по конверсии водорода открытым пламенем разбиты по двум типам исходного воздушного отверстия или воздушной заслонки (рис. 7).

Выбросы NO_x из водородной горелки¹

Таблица 1

NO_x Emissions from Hydrogen Burner

Table 1

Воздушная заслонка	NO_x (ppm)	Повышение (%) по сравнению с природным газом ²	
		Макс. значение	Мин. значение
Полностью открыта	257	221	157
Полностью закрыта	335	319	235

¹ Данные, предоставленные лабораторией Американской ассоциации газовой промышленности.
² Оценивается на уровне $80 \div 100$ ppm.

Таким образом, в случаях, требующих удержания выбросов оксидов азота на крайне низком уровне, могут возникнуть определенные проблемы с пламенным сжиганием водорода, по крайней мере, в устройствах, традиционно работающих на газе. По всей видимости, было бы неплохо разработать специальные

системы пламенного сжигания водорода, способные существенно сократить выбросы NO_x , однако в научной литературе пока нет сведений о проектах подобного рода. В остальном можно отметить, что пламенное сжигание водорода является экологически чистым процессом и эффективным способом преобразо-

вания химической энергии топлива в тепловую. Об этом позволяют судить скудные на сегодня экспериментальные данные, но впереди предстоит еще большая работа по созданию оптимального устройства на основе пламенного сжигания водорода.

4.4. Каталитическое сжигание водорода

Представляется очевидным, что ряд обозначенных выше проблем, связанных с устройствами на основе пламенного сжигания водорода, можно избежать или смягчить с помощью принципов *каталитического сжигания*. Как отмечалось ранее, среди прочих видов топлива только водород подходит для этого способа. В настоящей главе рассматриваются процессы каталитического сжигания с указанием преимуществ и недостатков этого метода. Далее, для иллюстрации возможностей каталитического сжигания, будет представлен ряд проектов, находящихся в настоящее время на стадии разработки опытных образцов.

Правильный выбор катализатора (например, платины в очень небольшом количестве), а также его нанесение на подходящий носитель или подложку способствует тому, что водород можно зажигать и сжигать с контролируемой температурой, что отличается от метода пламенного сжигания. Эта методика (рис. 8) разработана сотрудниками Института газовых технологий. На рис. 8 показано, как с добавлением водорода в катализируемую зону самопроизвольное повышение активности катализатора приводит к реакции взаимодействия водорода и кислорода в воздухе (или чистого кислорода) с образованием водяного пара. Повышение температуры, вызывающее полную активацию при постоянной температуре (1-й этап), ведёт к увеличению шага скорости (2-й этап). После этого температура продолжает повышаться. Если процесс выйдет из-под контроля, то начнется обычное пламенное сжигание (приблизительно в точке самовозгорания смеси), которого не следует допускать, поскольку в большинстве случаев это перечеркивает все преимущества метода каталитического сжигания и может постоянно выводить из строя горелку, разрушая, например, катализируемую зону.

Институтом газовых технологий подготовлен список рекомендаций относительно конструкции и рабочих характеристик водородных каталитических устройств:

1. Горелки должны обладать свойством самозапуска, но без задействования методов пламенного сжигания. Разработка стендовых установок или систем электрического зажигания считается нецелесообразной (отказ от них является значительным достижением с точки зрения энергосбережения, а также стоимости и надежности оборудования).

2. Необходимо разработать конфигурацию катализатора, которая позволяет (преимущественно) полностью сжигать топливо и включает множество параметров, требующих рассмотрения, такие как внешний вид горелки, активность и загрузка катализатора.

3. Требуется система, которая способствовала бы не только подаче воздуха в горелку, но и распространению топливно-воздушной смеси к поверхности катализатора, а также рассеиванию продуктов горения (водяной пар) с поверхности катализатора.

4. Обратное зажигание недопустимо. Оно возникает при превышении температуры воспламенения газообразного топлива. Пламя возникает и распространяется обратно к соплу коллектора топливного газа.

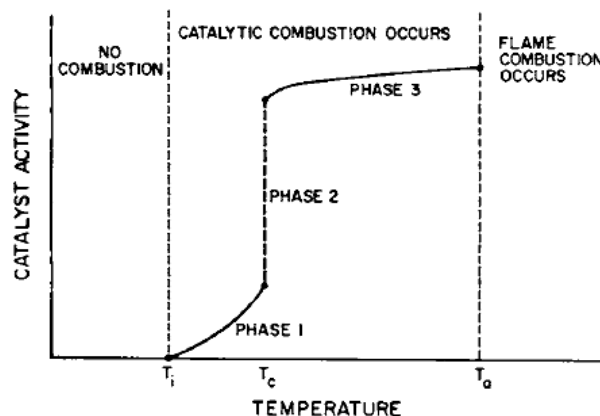


Рис. 8 – Этапы каталитического сжигания (предоставлено Институтом газовых технологий, США)

Fig. 8 – Phases of catalytic combustion.
(Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

В одном из своих патентов на разработку «Каталитического нагревателя на основе жидкого топлива» научные сотрудники Института газовых технологий дали следующее определение катализируемой поверхности (Патент США № 3 955 556): «Разработанная методика включает в себя метод анодирования, который заключается в электролитическом окислении алюминия до Al_2O_3 на поверхности металла. Затем на эту поверхность наносится платинохлористоводородная кислота, после чего платину можно восстановить мягким пламенем для получения высокоактивного самовоспламеняющегося катализатора» (подробное описание процесса приведено в патенте).

Можно выделить следующие преимущества метода каталитического сжигания по сравнению с пламенным сжиганием:

1. Процесс сжигания является самовоспламеняющимся, что обуславливает исключение отдельных систем зажигания, требующих затрат топлива, увеличения капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также снижающих надежность системы.

2. Температуру сжигания можно ограничить на уровне $260 \div 316$ °C, предотвращая образование NO_x – единственный компонент выбросов, вызывающий озабоченность с точки зрения качества воздуха (см. раздел, посвященный пламенному сжиганию).

3. Можно добиться полного сгорания, используя по максимуму энергию топлива и устраняя любые угрозы, связанные с потоком свободного водорода.

4. Можно обеспечить точный всеохватывающий контроль над процессом выделения тепла, чтобы наилучшим образом отвечать требованиям энергопотребления системы.

5. Умеренная температура продуктов горения, которую можно контролировать с помощью каталитического сжигания, позволяет довольно просто обеспечивать в бытовых приборах, например, водонагревателях, конденсат водяного пара и регенерацию сопутствующего тепла.

Другая форма каталитического сжигания, продемонстрированная специалистами компании Billings Energy Corporation, предусматривает использование модифицированной системы пламенного сжигания. В 1974 г. компания опубликовала результаты экспериментов с опытными образцами горелок на основе водорода. Вокруг газоотводной секции стандартной горелки, работающей на природном газе, поместили нержавеющую сталь из тонколистового материала, внешне напоминающую «стальную стружку». После воспламенения водород горел в каталитическом режиме над нержавеющей сталью, нагревая ее до красного каления без заметного эффекта пламени. Тепло было перенесено в помещенную над горелкой термopосуду как с потоком горячего газа, так и с помощью инфракрасного излучения от раскаленной стальной стружки. Эту технологию можно легко и недорого применять в целях конвертации.

5. Водородные нагревательные устройства и приборы

5.1. Водородные водонагреватели. Введение

Существует два основных типа бытовых и небольших промышленных водонагревателей: накопительные и проточные (ненакопительные), – которые отличаются наличием водяного бака большой емкости для нагретой воды. Ненакопительные водонагреватели обеспечивают «мгновенный подогрев» холодной воды по требованию до заданной температуры. Хранение горячей воды в такой системе не предусмотрено. При этом у каждого типа есть свои характерные достоинства и недостатки, и оба являются работоспособными.

Водородные водонагреватели бывают обоих типов в силу схожести сжигания водорода с процессом сжигания природного газа и других видов используемого сегодня топлива. Более того, как обсуждалось в предыдущем разделе, в устройстве на основе водорода можно применять либо пламенное, либо каталитическое сжигание. Водородные водонагреватели на основе пламенного сжигания очень похожи на устройства, работающие на углеводороде (с различием в деталях конструкции горелки), поэтому здесь мы сосредоточимся исключительно на водонагревателях на основе каталитического сжигания. Напомним, что эти устройства обладают такими значительными преимуществами, как самовоспламенение (не требует стендо-

вых испытаний), ничтожно малый уровень выбросов NO_x и максимальная эффективность сжигания.

Ненакопительные водонагреватели на основе каталитического сжигания водорода

Эта концепция, реализованная недавно в экспериментально-демонстрационном режиме в Институте газовых технологий, предусматривает мгновенный подогрев проточной холодной воды в системе сжигания/теплообмена до температуры, показанной на управляемом чувствительном элементе (датчике) на выходе горячей воды. На катализируемой поверхности возникает процесс горения водорода с воздухом, обеспечивая теплопередачу к водяному контуру для быстрого нагрева.

На рис. 9 представлена рабочая модель ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода, разработанная Институтом газовых технологий.

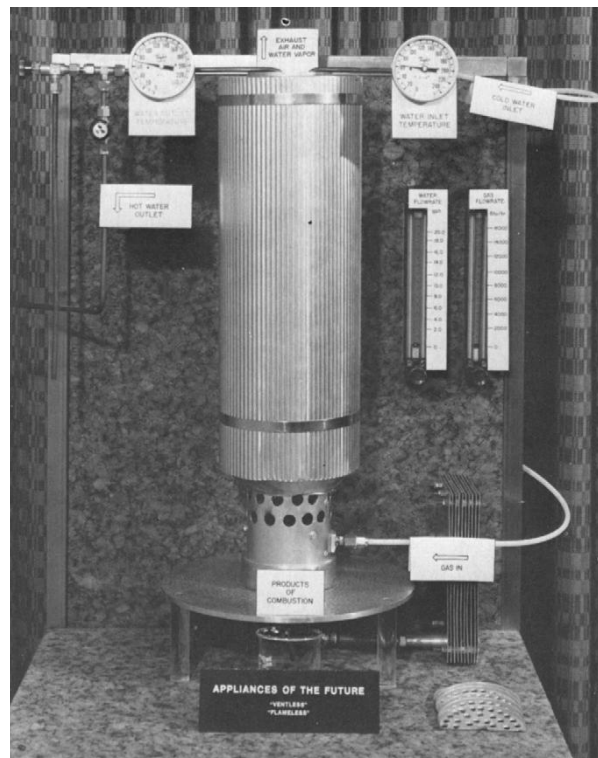
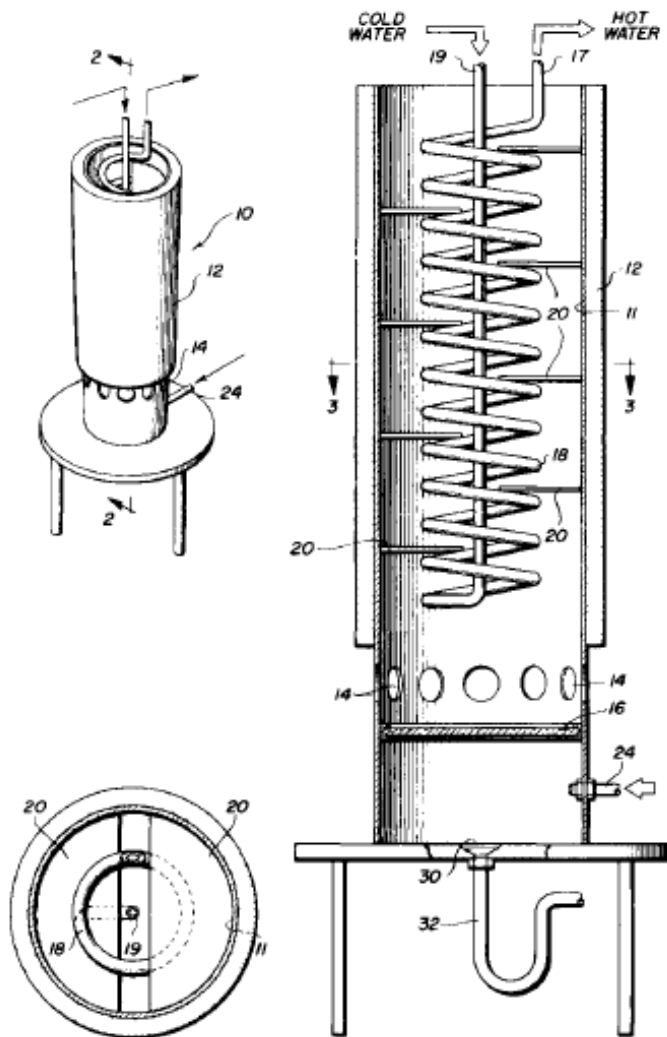


Рис. 9. – Экспериментальная рабочая модель ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
Fig. 9 – Experimental working model of a catalytic combustion hydrogen-fueled nonstorage water heater (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Установка была спроектирована и собрана в 1975 г. при финансовой поддержке Газовой компании Южной Калифорнии (англ. Southern California Gas Company) и запатентована в США (патент № 3 910 255).

Для описания работы этого устройства можно использовать патентный чертеж, представленный на рис. 10.

Рис. 10. – Вид ненакопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода в разрезе (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
Fig. 10 – Sectional view of a catalytic combustion Hydrogen-fueled nonstorage water heater design (IGT/Southern California Gas Company).
 (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



Водород напускается в условиях регулируемого потока в нижней части хорошо изолированного цилиндрического корпуса 24, затем проходит сквозь пористую распределительную пластину 16 и поднимается вверх, смешиваясь с воздухом, попавшим через входные отверстия 14 под действием естественной тяги. Полукруглые металлические перегородки, катализируемые с нижней стороны, расположены в шахматном порядке вдоль цилиндрического корпуса, а в целях обеспечения теплоотдачи их монтируют в водный циркуляционный контур (змеевик). В разделительных перегородках проделаны отверстия для того, чтобы конденсат, образовавшийся из продуктов сгорания, попадал в нижнюю часть устройства.

Процесс каталитического сжигания происходит постепенно по мере подъема водородно-воздушной смеси в установке. Выделяемое тепло посредством конвекции и теплопроводности передается на змеевик. Нагретый поток воздуха поднимается вверх, создавая эффект естественной тяги и пропуская в

устройство больше воздуха для сжигания. Как отмечалось выше, на трубах холодной воды часть водяного пара в продуктах горения конденсируется в жидкость, которая в конечном счете собирается в нижней части устройства и отводится 32 с целью ее возможного использования в качестве дистиллированной воды, например в утюгах.

Накопительные водонагреватели на основе каталитического сжигания водорода

В рамках отмеченной программы, Институтом газовых технологий была также разработана и испытана рабочая модель накопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода. Патентные чертежи устройства представлены на рис. 11 (патент США № 3 995 556). Конструкция представляет ряд концентрических кольцеобразных отсеков для воды с направлением потока снаружи к центру, а именно, два кольцеобразных контейнера 12 и 13, установленных концентрично вокруг центрального цилиндрического корпуса 11. Холодная вода поступает



снаружи 24, а горячая извлекается из верхней мертвой точки хранилища 27. Между контейнерами с водой

образуются кольцеобразные пространства, в которых происходят процессы каталитического сжигания.

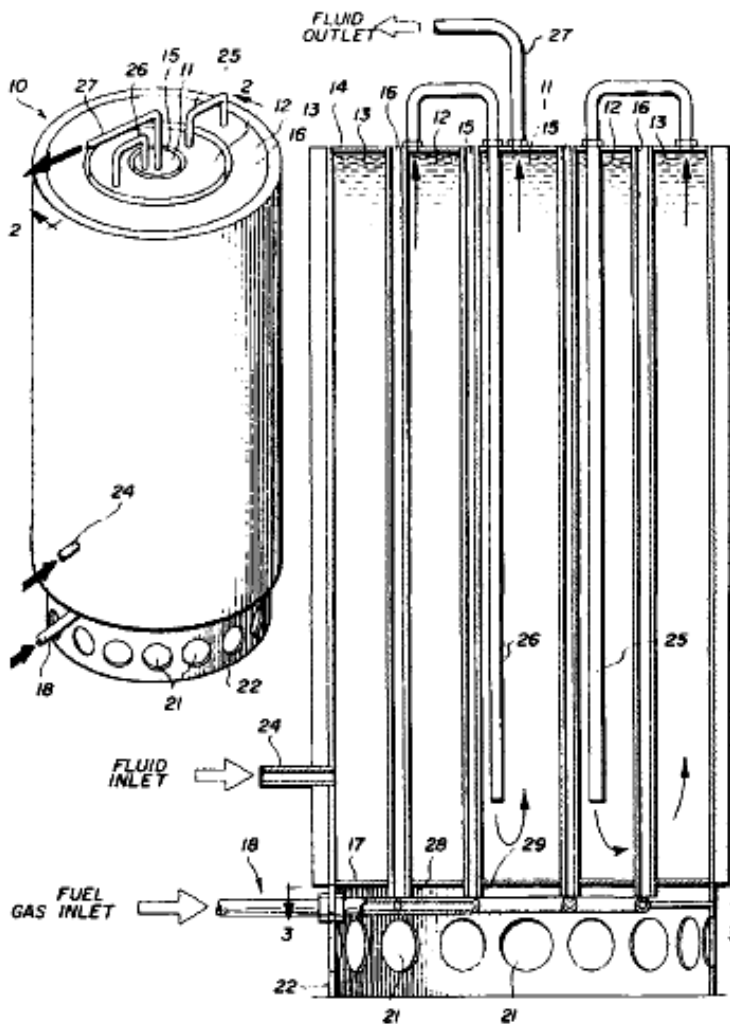


Рис. 11. – Вид накопительного водонагревателя на основе каталитического сжигания водорода в разрезе (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
Fig. 11 – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, storage water heater design (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Водород напускается через расположенные соответствующим образом в нижней части пространства кольцевые коллекторы. Водород смешивается с воздухом, проникшим под действием естественной тяги через отверстия 21. Катализу подвергается только одна поверхность каждого кольцеобразного пространства, в котором происходит сжигание, в то время как другая выполняет функцию конденсирующей поверхности для водяного пара (который отдает свою теплоту испарения на нагрев воды). Как обсуждалось выше, катализируемая поверхность обеспечивает самовоспламенение, высокую эффективность и равномерное сжигание водорода. На рис. 11 не показано, что конденсат воды можно также собирать для дальнейшего использования, как в ненакопительных нагревателях. Оба устройства классифицируются как «невентилируемые» приборы и, как правило, не требуют вытяжки при условии организации циркуляции таким образом, чтобы в систему сжигания поступало достаточное количество свежего воздуха.

Концепция накопительного водонагревателя на основе сжигания водородно-кислородной смеси

С доступностью кислорода и водорода для работы нагревательных приборов появится возможность реализации и других концепций. Проиллюстрируем это на примере нагревателя накопительного типа, хотя на сегодня еще не все теоретические расчеты подтвердились экспериментально. Сжигание водородно-кислородной смеси бывает пламенным и каталитическим, аналогично водородно-воздушным системам, рассмотренным выше. Общеизвестным примером может служить кислородно-водородная горелка, применяемая в резке и сварке под водой. Такер (Tucker) еще в 1924 г. запатентовал кислородно-водородный парогенератор, в котором вода подается по направлению кислородно-водородного пламени, функционируя в стехиометрической точке (то есть при правильном химическом соотношении, предотвращающем образование избыточного водорода и кислорода).

Концепция накопительного водонагревателя должна включать в себя резервуар для горячей воды

с погружной водородно-кислородной горелкой в объеме воды. Такая горелка не требует воздуха для сжигания и, следовательно, вообще не образует никаких газообразных выбросов. Передача тепла к воде осуществляется напрямую, а не сквозь металлические поверхности. Вода для сжигания полностью перерабатывается в регулируемой системе. Таким образом, вся высокая теплотворная способность водорода преобразуется в нагрев воды с условием полного сжигания при установлении должного контроля за водородно-кислородной смесью.

Это устройство будет весьма компактным, обладать чрезвычайно высоким быстродействием и, как уже отмечалось, максимально возможной эффективностью. Устройства на основе сжигания водородно-кислородных смесей представляют особый интерес для солнечных энергоустановок.

5.2. Водородные каталитические обогреватели воздуха для отопления помещений

Каталитическое сжигание на поверхности, описанное в предыдущем разделе для водонагревателей, можно использовать для прямого обогрева воздуха, как в системах отопления помещений. Основной принцип представлен на чертеже образца для испытаний на каталитическую устойчивость (рис. 12). Это устройство разработано и подвергнуто тщательным испытаниям в Институте газовых технологий. Как показано на рис. 12, водород поступает сквозь отверстия из коллектора между двумя катализируемыми поверхностями, где H_2 смешивается с воздухом и воспламеняется, а на поверхности происходит его каталитическое сжигание. Воздух нагревается непосредственно пламенем и, косвенным образом, посредством переноса тепла от противоположной стороны металлического образца.

Принцип, проиллюстрированный на рис. 12, был запатентован Институтом газовых технологий (патент США № 3 916 869) и применен к разным моделям обогревателей воздуха. На рис. 13 показано ци-

линдрическое устройство, представляющее собой двухповерхностную каталитическую камеру сгорания, похожую на образец, изображенный на рис. 12.

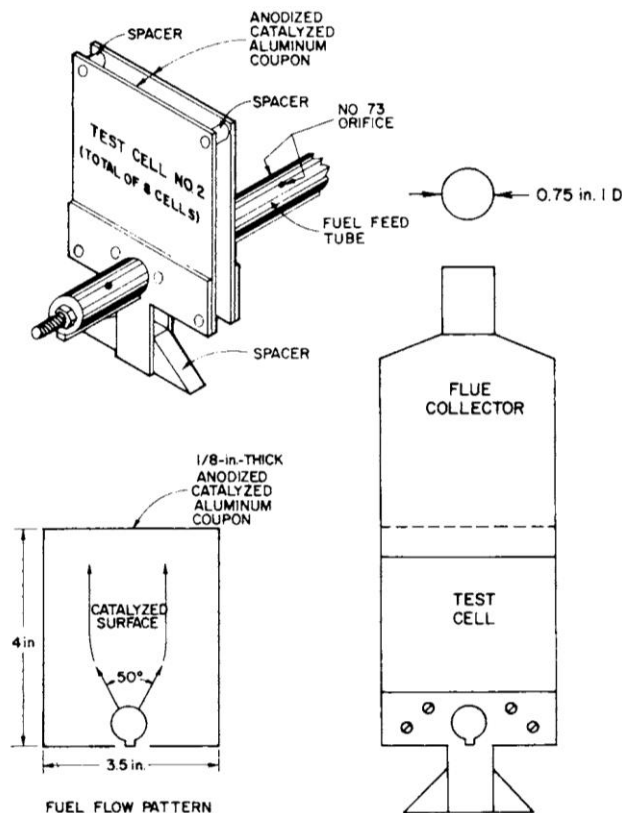


Рис. 12. – Чертеж экспериментального устройства для оценки каталитического сжигания (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
 Fig. 12 – Sketch of experimental catalytic combustion evaluation unit (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

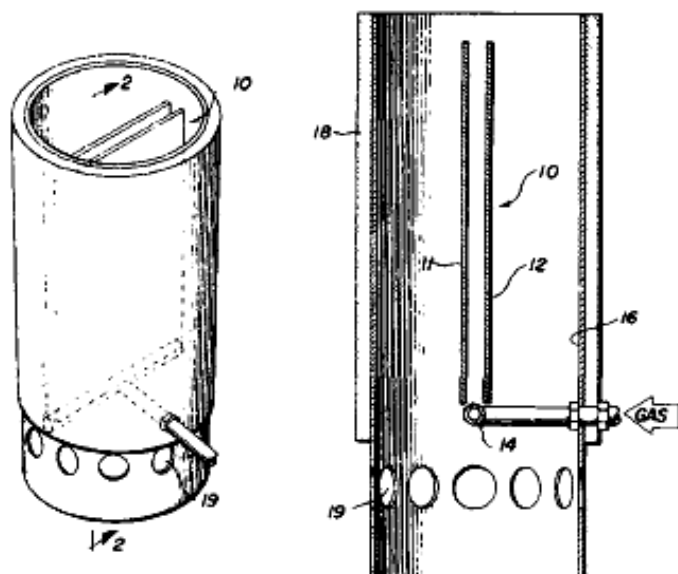


Рис. 13 – Вид в разрезе обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания водорода, предусматривающего прямое бездымное отопление помещений (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
 Fig. 13 – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing flueless direct space heating (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)



На рис. 14 представлена прямоугольная модель с несколькими такими поверхностями сжигания. В таком устройстве поток циркулирует непосредственно в пространство для нагрева без вытяжки или других наружных отводов.

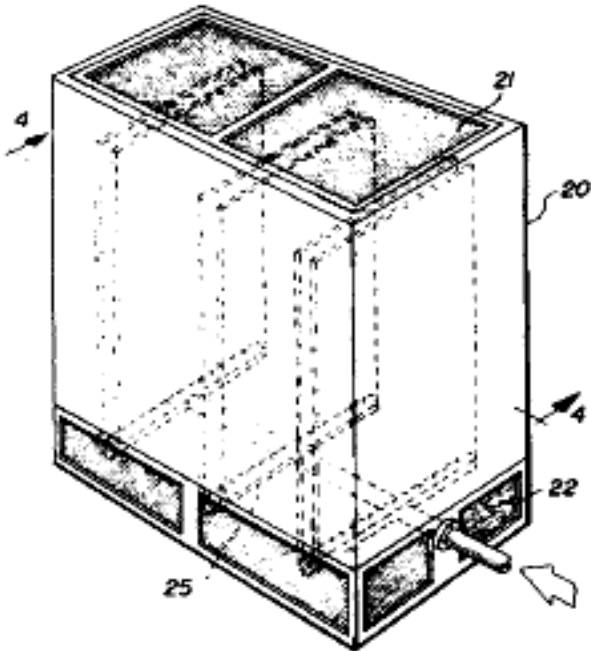


Рис. 14 – Вид в разрезе обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания водорода, предусматривающего прямое бездымное отопление помещений (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)

Fig. 14 – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing flueless direct space heating (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

В конструкции, изображенной на рис. 15, поток из камер сгорания уносится через вытяжку 30, а в качестве альтернативы чистой конвекционной циркуляции показано использование воздухоподводящего устройства. Такая конструкция полностью совместима с современными системами центрального отопления с принудительной циркуляцией воздуха для жилых помещений. С другой стороны, обогреватели воздуха на основе каталитического сжигания водорода подойдут, очевидно, для систем индивидуального (покомнатного) отопления, поскольку эти модели могут быть неветилируемыми.

5.3. Водородная плита верхнего диапазона на основе каталитического сжигания

Как уже отмечалось, компании Billings Energy Corporation удалось преобразовать углеводородный

газ в работу водорода, поместив вокруг стандартной горелки сетку из нержавеющей стали, что обеспечило приемлемое качество каталитического сжигания и работы обогревателя. Институтом газовых технологий разработано несколько моделей устройств на основе каталитического сжигания, в которых используются те же принципы, что и в водонагревателях, рассмотренных выше.

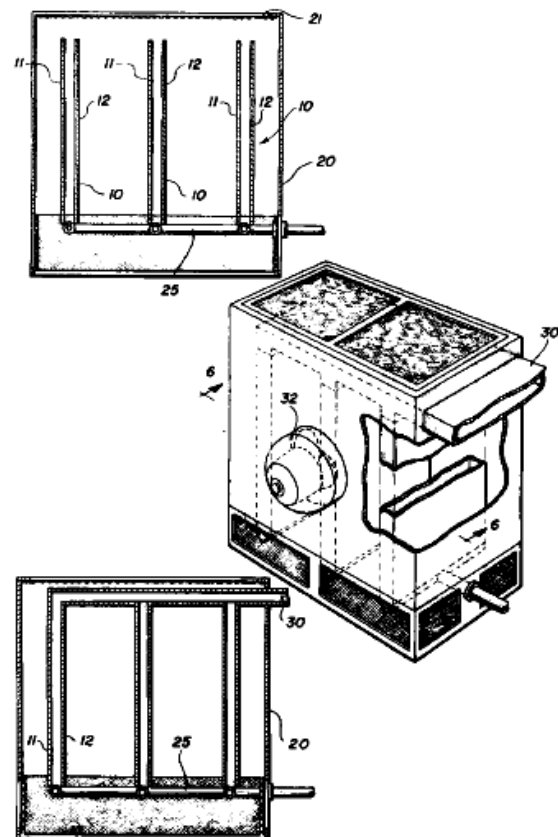


Рис. 15 – Вид в разрезе водородного обогревателя воздуха на основе каталитического сжигания с вытяжкой и принудительной подачей воздуха (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)

Fig. 15 – Sectional view of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, air heater design employing a flue and providing direct space heating with forced air (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

На рис. 16 представлена одна из моделей таких установок. В конструкции устройства используется катализируемая алюминиевая поверхность, присоединенная напрямую к пластине из армированной стали. Стальная поверхность поддерживает нагретое состояние. Авторами испробовано множество вариантов расположения отверстий и циркуляции потока, прежде чем было достигнуто требуемое воспламенение и функционирование.

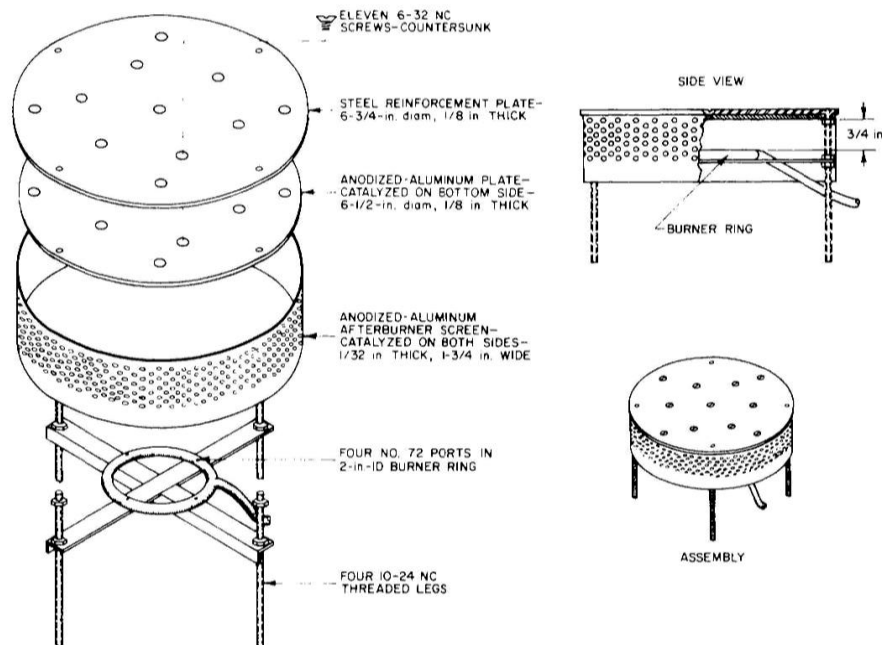


Рис. 16 – Изображение экспериментальной водородной плиты на основе каталитического сжигания (совместный проект Института газовых технологий и Газовой компании Южной Калифорнии) (предоставлено Институтом газовых технологий)
Fig. 16 – Several views of a catalytic combustion, hydrogen-fueled, experimental range-top cooking unit (IGT/Southern California Gas Company). (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

Другое устройство, разработанное Институтом газовых технологий, было продемонстрировано Американской ассоциации газовой промышленности в 1970-х гг. на выставке «Дом будущего». В этом устройстве обеспечены требуемое распределение водорода и контроль, а катализатор размещен непосредственно с обратной стороны керамической панели. Новинка была представлена вместе с другими водородными устройствами, такими как настенный обогреватель, поддон с подогревом и домашняя система экологического контроля.

6. Водородное кондиционирование и охлаждение воздуха

6.1. Введение

В течение длительного времени газовая энергия широко используется на рынке домашних и коммерческих систем кондиционирования. В дополнение к системам «охлаждения» абсорбционного типа, работающим на топливе и/или использующим рекуперацию тепла для кондиционирования, появился ряд новых системных подходов к применению газовой энергии, обеспечивающих «полный контроль над окружающей средой». В целом эти концепции ориентированы на природный газ, широко применяемый в настоящее время в бытовых и коммерческих системах. Как представляется, водород, полученный путем преобразования солнечной энергии, может вполне заменить его и дать ряд уникальных преимуществ. Далее

рассмотрим проекты, находящиеся сегодня на стадии разработки и их типичное применение.

6.2. Система контроля над окружающей средой фирмы Munters

Система, использующая газовую энергию для кондиционирования (охлаждения) воздуха, отопления и контроля над влажностью (англ. MEC), разработана компанией Munters, Швеция, и известна многим под названием «Лицензия». Эта система была запатентована в США и ряде других стран. Обладателем патента с правом на дальнейшее техническое и коммерческое развитие является дочерняя структура Института газовых технологий компания Gas Development Corporation (GDC).

Подробное описание системы MEC выходит за рамки настоящей главы, подробные сведения можно найти на официальных сайтах компании GDC и Института газовых технологий.

На рис. 17 представлено графическое и эскизное изображение этой системы. Принцип работы устройства основан на параллельных встречных потоках воздуха – поступающего снаружи и отработанного воздуха из жилого помещения, – а два вращающихся колеса из пористого материала обеспечивают регулирование влажности и теплообмена между ними.

В режиме охлаждения отработанный воздух в системе MEC нагревается с помощью теплообменного колеса с дальнейшим нагревом сушильного колеса из секции газовой горелки. При использовании природного газа обычным способом можно поставить водородную горелку пламенного или каталитического типа. Описание таких горелок представлено выше.



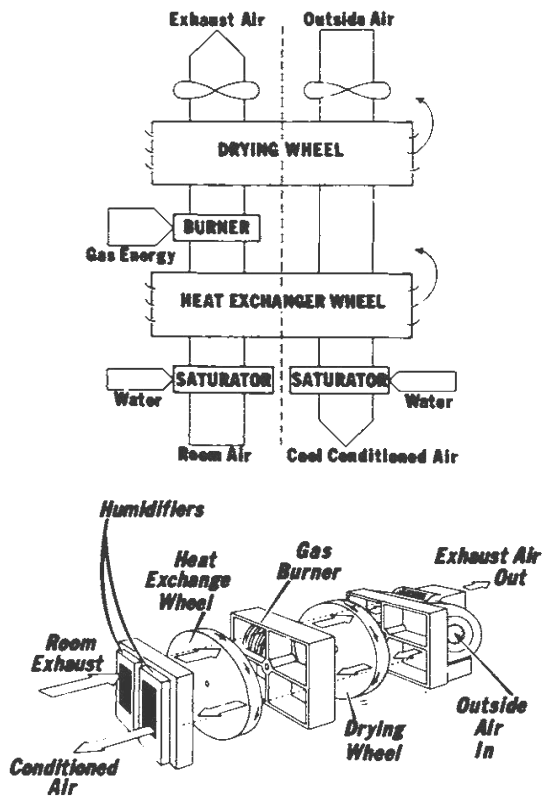


Рис. 17 – Принципиальная схема и расположение элементов системы контроля окружающей среды MEC (предоставлено Институтом газовых технологий)
 Fig. 17 – Flow schematic and component layout of Munters Environmental Control (MEC) system. (Courtesy of the Institute of Gas Technology.)

6.3. Система охлаждения Servel

Системы охлаждения, работающие на природном газе, широко применяются на протяжении долгого времени. Системы Servel оснащены устройством нагрева хладоносителя газовым пламенем и работают без движущихся частей, что обеспечивает повышенный срок эксплуатации и простоту в обслуживании. Снова можно представить водородный контур охлаждения, работающий аналогичным образом.

6.4. Механическое охлаждение в сравнении с тепловыми двигателями на основе водородной энергии

Водород, будучи превосходным топливом для двигателей внутреннего сгорания, двигателей Ренкина, Стирлинга, а также для газотурбинных установок (работающих в цикле Брайтона), служит средством для передачи мощности на валу к механическим системам кондиционирования стандартного типа. Подобным образом могут работать теплонасосные установки, обеспечивающие нагревание и охлаждение. В силу сложной конструкции тепловых двигателей, эта технология больше подойдет для крупных промышленных проектов, в частности, для комплексных энергосистем, где относительно низкая эффективность теплового двигателя компенсируется рекуперацией отработанного тепла.

7. Выработка электричества с помощью водородной энергии

7.1. Общие сведения

Множество исследований показало, что в случае необходимости хранения энергии в системе электрического устройства можно использовать водород или водородно-кислородную смесь, которые являются эффективным и гибким средством хранения химической энергии для ее последующего преобразования (повторного преобразования) в электричество. Подобным образом можно хранить водородную энергию в солнечных энергоустановках, требуемых для круглосуточного удовлетворения потребностей в электричестве. Как предполагается, максимальную выработку и своевременную поставку электроэнергии для соответствующих солнечных энергосистем можно обеспечить в периоды инсоляции. Такие способы хранения и преобразования энергии потребуются для решения проблемы энергетических пиков и, что более важно, выработки электроэнергии в периоды отсутствия инсоляции. В качестве альтернативы могут применяться нехимические средства хранения, например, маховиковые накопители энергии. Для сравнения базового подхода можно привести стандартный электрический (электрохимический) аккумулятор.

Ниже будут рассмотрены два основных способа получения электроэнергии из водорода: топливный элемент и тепловой двигатель/генератор. Следует отметить, что можно использовать как водородно-воздушную, так и водородно-кислородную смесь, отдавая предпочтение последней в силу большего количества уникальных преимуществ, хотя этот метод изучен меньше всего. На основании общих сведений сложно судить, сможет ли водород в действительности заменить собой остальные альтернативные варианты, поскольку для этого требуется проведение определенных исследований, но, с технической точки зрения, это выполнимо.

7.2. Топливные элементы

Топливные элементы осуществляют прямое преобразование химической энергии в электрическую с помощью электрохимического преобразования. По этой причине на них не действуют «ограничения цикла Карно» тепловых двигателей, и, следовательно, они обладают достаточно высокой эффективностью. В идеальных условиях КПД устройства может достигать порядка 90 %. Несмотря на то что теоретически тепловые элементы могут работать на разных видах топлива, безусловно, водород является первым кандидатом на применение, поскольку он легко и непосредственно вступает в электрохимическую реакцию с кислородом, содержащемся в воздухе, или с подаваемым чистым кислородом. Примечательно, что топливные элементы, разработанные для эксплуатации на природном газе и легком углеводородном топливе (например, керосин и другие средние дистилляты), фактически используют водород, полученный из этих углеводородов. В так называемый топливный элемент TARGET на природ-

ном газе перед топливной ячейкой включен этап парового риформинга метана для получения реформированного газа, преимущественно водорода с незначительными примесями углекислого газа.

В системах, где водород поступает с самого начала, можно избавиться от процедуры «подготовки» топлива, а также добиться повышения общей эффективности и снижения расходов на оборудование и обслуживание. Таким образом, водород является наиболее подходящим топливом для топливных элементов.

Как правило, топливные элементы, использующие воздух для поддержания процесса «сжигания» водорода, базируются на системах с кислым электролитом, таким как фосфорная кислота. Несмотря на то что щелочные топливные элементы значительно проще и эффективнее, они, при прочих равных условиях, страдают от следующего недостатка: вступающий в реакцию атмосферный углекислый газ способствует снижению производительности устройства.

Таким образом, необходимо использовать бесщелочные топливные элементы на основе водородно-воздушной смеси. В случаях когда наряду с водородом возможно применение чистого кислорода, можно использовать щелочной электролит, что приведет к повышению эффективности и снижению расходов. Это также является важным вопросом получения водорода с помощью процессов разложения воды, как в случае с электролизом воды. Учитывая, что кислород гораздо легче хранить и обрабатывать, чем водород, топливные элементы на основе водородно-кислородных смесей выглядят предпочтительней водородно-воздушных систем. Тем не менее за последнее время второй вариант был значительно доработан.

Топливные элементы на основе водородно-кислородных смесей разрабатываются для применения в авиации и оборонном комплексе. Например, эти элементы обеспечивали электроэнергией космические корабли Аполлон, использовавшиеся в американских программах полетов на Луну. Несмотря на то что топливные элементы, предназначенные для этих целей, являются достаточно дорогими и имеют ограниченный срок эксплуатации, по всей вероятности, фундаментальная технология может быть применена к окончательной доработке коммерческих топливных элементов, в частности, для новейших систем преобразования солнечной энергии. Плановые издержки и прогнозируемые показатели эффективности разработанного топливного элемента на основе водородно-кислородной смеси составляют соответственно \$200/кВт электроэнергии и 70 % высшей теплотворной способности (ВТС).

7.3. Тепловые двигатели/генераторы

Другим вариантом получения электроэнергии из водорода является применение теплового двигателя для выработки мощности на валу, чтобы привести в действие стандартный генератор. В принципе водород, в силу его гибкости, можно использовать во

всех тепловых двигателях как внутреннего, так и внешнего сгорания. Тип двигателя определяется выбором оптимального соотношения между эффективностью и себестоимостью с учетом габаритов, рабочего цикла и других системных требований к узлу системы, генерирующему электроэнергию.

На рынке представлено множество моделей водородных двигателей внутреннего сгорания преимущественно с упором на использование в качестве основной тяги автомобиля. Предрасположенность к чрезвычайно бедному горению, при котором достигаются высокие значения эффективности, а также другие факторы, связанные с процессом сжигания, позволяют водородным двигателям внутреннего сгорания добиться более высоких показателей, чем при работе на углеводородном топливе. Аналогично водородные газотурбинные установки, разработанные специальным образом для максимального использования свойств водорода (например, его превосходящие охлаждающие свойства применительно к охлаждению лопастей турбины), могут продемонстрировать более высокие показатели эффективности и иметь более компактные размеры, чем в случае применения традиционных видов топлива, за счет повышения температур на выходе из турбины.

В рамках космической программы устройства на основе водородно-кислородной смеси, передающие мощность на валу, получили ограниченную разработку в качестве дополнительных источников питания. Проект представляет особый интерес в связи с потенциально высокой эффективностью, простотой и компактностью паровой турбины/турбинной установки на водородно-кислородной смеси, преимущественно паровой турбины, работающей по циклу Ренкина, где образование пара происходит в плотной топочной камере, и требования к условиям этого процесса не отличаются от стандартных условий парообразования в традиционных бойлерах. Кроме того, можно достичь значительно более высоких температур, чем в традиционных устройствах, что ведет к повышению эффективности до 55 % в крупных конденсационных вакуумных системах, которые также являются экологически чистыми и гибкими в эксплуатации.

Благодарности

Авторы выражают признательность Институту газовых технологий (Чикаго, США) за поддержку и предоставление материалов, использовавшихся при подготовке статьи. Особую благодарность авторы выражают доктору Джону Б. Пэнгборну, Вальтеру Дж. Язиновски и Дейлу Г. Джонсону за их ценные советы и рекомендации.

Фотографии предоставлены Институтом газовых технологий и Брукхейвенской национальной лабораторией.

Acknowledgments

The authors are pleased to acknowledge the support of the Institute of Gas Technology, Chicago, for information supplied in support of the preparation of this chapter. Particularly helpful were the advisements and contributions of Dr. Jon B. Pangborn, Walter J. Jasionowski, and Dale G. Johnson.

Photographs were supplied by the Institute of Gas Technology and Brookhaven National Laboratory.





СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 09.06.17. Ред. рег. № 2601-2

The article has entered in publishing office 09.06.17. Ed. reg. No. 2601-2

УДК 662.769.21

**СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ САУДОВСКОЙ АРАВИИ****С. Алмогрен, Т.Н. Везироглу*

Институт чистой энергии, Университет Майами
а/я 248294, Coral Gables, Флорида 33124-0620, США
тел.: +1(305)284-46-66; факс: +1(305)284-47-92
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.030-042

Заключение совета рецензентов: 15.06.17 Заключение совета экспертов: 18.08.17 Принято к публикации: 12.09.17

Авторами разработана модель солнечно-водородной энергетической системы для Саудовской Аравии путем определения соотношений между основными и второстепенными энергетическими характеристиками. В течение некоторого периода времени проводились исследования масштаба и тенденций данных характеристик с внедрением и без внедрения водородных технологий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в ближайшие тридцать-сорок лет нефтяных запасов Саудовской Аравии будет недостаточно для обеспечения собственных энергетических потребностей и реализации экспортной политики. Результаты также показывают, что выбор в пользу солнечно-водородной энергетической системы обеспечит экономию нефтяных запасов, снизит уровень загрязнения окружающей среды и сформирует устойчивую энергетическую систему в стране. Кроме того, Саудовская Аравия сумеет на длительное время закрепить за собой статус экспортера водорода.

Ключевые слова: солнечный водород; энергия водорода; водородная энергетика в Саудовской Аравии.

SOLAR-HYDROGEN ENERGY SYSTEM FOR SAUDI ARABIA*S. Almogren, T.N. Veziroğlu*

Clean Energy Research Institute, Mechanical Engineering, University of Miami
P.O. Box 248294 Coral Gables, FL 33124-0620, USA
tel.: +1 305 284 46 66; факс: +1 305 284 47 92
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.030-042

Referred 15 June 2017 Received in revised form 18 August 2017 Accepted 12 September 2017

* Алмогрен С., Везироглу Т.Н. Солнечно-водородная энергетическая система для Саудовской Аравии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):30-42.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2004;29:1181-1190. ©2003 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

A model for solar-hydrogen energy system for Saudi Arabia has been developed by obtaining relationships for and between main energy and energy-related parameters. The parameters' magnitude and trends with and without hydrogen introduction have been investigated over a period of time. The results indicate that the oil resources of Saudi Arabia would not be enough to meet the domestic and export markets starting in three to four decades. The results also show that adopting the solar-hydrogen energy system would extend the availability of oil resources, reduce pollution, and establish a permanent energy system for Saudi Arabia. They also indicate that Saudi Arabia could become an exporter of hydrogen forever.

Keywords: solar hydrogen; hydrogen energy; hydrogen for Saudi Arabia.



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 энергетики (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» (ISJAEЕ).

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, 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 (ISJAEЕ).

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 book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

1. Введение

Саудовская Аравия – крупнейшее государство на Ближнем Востоке, расположенное на Аравийском полуострове. Это государство граничит с Персидским заливом и Красным морем, занимая между ними территорию общей площадью 1 960 582 км², что составляет чуть более одной восьмой территории США. Саудовская Аравия характеризуется суровым, сухим пустынным климатом с большими перепадами температуры и нулевой или низкой облачностью. Эта огромная территория получает колоссальное количество солнечного излучения.

Население Саудовской Аравии составляет 24 000 000 человек, ВВП на душу населения – \$10 600. В основе экономики Саудовской Аравии лежит нефтяная промышленность: страна располагает самыми богатыми запасами нефти (26 % разведанных мировых запасов) и является крупнейшим экспортером нефти – 75 % доходов бюджета приносит экспорт нефтепродуктов [1].

Солнечный пояс Земли – это территория, расположенная между 40° северной и 40° южной широты, на которую падает колоссальное количество солнечной энергии. Географический центр Саудовской Аравии находится на 25° северной широты, где яркий световой день длится в среднем 8,89 ч, а по данным, по-

лученным на 41 станции за период более 10 лет, суммарное солнечное излучение, попадающее на горизонтальную поверхность, составляет $5\,591\text{Втч м}^{-2}$ [2]. Водород является одним из наиболее перспективных энергоносителей будущего, и на концепцию солнечно-водородной энергетической системы возлагаются большие надежды. Среди преимуществ данной системы можно выделить экологическую безопасность и возобновляемость.

В настоящей работе изучены перспективы и преимущества применения солнечно-водородной энергетической системы в Саудовской Аравии. Авторами предпринята попытка оценить будущую роль такой энергосистемы в обеспечении энергетических потребностей страны, в экспорте водорода и экономии ископаемых энергоресурсов.

Список обозначений	
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
<i>A</i>	Константа
<i>B</i>	Константа; энергопотребление на душу населения
<i>C</i>	Константа; цена на топливо
<i>D</i>	Константа
<i>E</i>	Энергопотребление
<i>F</i>	Объем производства (потребления) ископаемого топлива
<i>G</i>	Валовой продукт
<i>H</i>	Объем производства (потребления) водорода
<i>K</i>	Константа
<i>L</i>	Качество жизни
<i>P</i>	Загрязнение; экологический ущерб
<i>Q</i>	Численность населения
<i>R</i>	Ископаемые ресурсы
<i>t</i>	Время
<i>U</i>	Загрязнение от ископаемого топлива на единицу энергии
<i>V</i>	Безразмерный модификатор времени удвоения
<i>W</i>	Безразмерный модификатор роста
yr	Год
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
Δ	Разница
γ	Функция потребления топлива
δ	Количество ежегодно добываемого ископаемого топлива
ε	Соотношение загрязнения от водорода и ископаемого топлива
θ	Время удвоения, время двукратного увеличения
η	Соотношение эффективности применения водорода и ископаемого топлива
<u>Индексы верхние</u>	
<i>a, b, c</i>	постоянные степени
<i>u, w, x, y, z</i>	малые постоянные степени
<u>Индексы нижние</u>	
<i>c</i>	Составной
<i>d</i>	Потребность
<i>e</i>	Энергия
<i>f</i>	Ископаемое топливо
<i>g</i>	Валовой продукт
<i>h</i>	Водород
<i>n</i>	Количество (лет)
<i>o</i>	Изначальный год
<i>p</i>	Производство
<i>q</i>	Население
<i>r</i>	Безразмерное соотношение
<i>t</i>	Всего
<i>w</i>	Мировой
<i>x</i>	Экспорт
<u>Аббревиатуры</u>	
BTU	Единица измерения тепловой энергии в английской системе мер (англ. British Thermal unit)
KACST	Центр науки и технологий имени короля Абдул-Азиза, Саудовская Аравия
ВВП	Валовой внутренний продукт
\$	Доллар США



2. Солнечно-водородная энергетическая установка

Авторами разработана модель солнечно-водородной энергетической установки для Саудовской Аравии. Эта установка представлена в виде непрерывного динамического взаимодействия между показателями численности населения, энергетики, экономики и ресурсов, которые связаны между собой одинаково зависящими от времени соотношениями, выражающими изменения в главных и вспомогательных переменных. Для построения модели были выбраны такие переменные, как: численность населения; энергопотребление; выработка энергии; производство водорода; стоимость энергии; ВВП; экологический ущерб; качество жизни. Перечисленные параметры будут связаны посредством математических уравнений и их взаимодействиями [3].

2.1. Население

Первоначальное значение численности населения и темпы его роста, или время двукратного увеличения, позволяют определить численность населения в более поздний период времени. Численность населения в любой момент времени рассчитывается посредством сложения количества населения в предыдущий момент времени и фактического значения демографических изменений за прошедший период. Уравнение для определения численности населения запишем в экспоненциальной форме:

$$Q_n = Q_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n / \theta_{qo}], \quad (1)$$

где Q_n – численность населения в n году; Q_{n-1} – численность населения в $n-1$ году; $\Delta t_n = (t_n - t_{n-1})$ – шаг времени, равный 1 году; W_n – модификатор прироста населения за период времени Δt_n ; θ_{qo} – время удвоения в годах. Уравнение (1) может быть применено как в масштабе всего мира, так и на уровне Саудовской Аравии или любой другой страны.

Модификатор прироста W_n – это безразмерная функция, заданная как соотношение времени двукратного прироста мирового населения в изначальный момент времени и соответствующего значения в момент времени n ($W_{nw} = \theta_{qo} / \theta_{qn}$), учитывающая воздействие других системных компонентов на прирост населения. Статистическое исследование показало, что величина W_{nw} может соотноситься со значениями безразмерного коэффициента численности мирового населения $Q_{rw}(=Q_w/Q_{wo})$, показателем ВВП на душу населения $G_{rw}(=G_w Q_{wo}/G_{wo} Q_w)$ и степенью загрязнения окружающей среды $P_{rw}(=P_w/P_{wo})$. Общая форма такого соотношения может быть записана в следующем виде:

$$W_{nw} = A - B(G_{rw})^a (P_{rw})^b (G_{rw})^c - C / [(G_{rw})^a (P_{rw})^b (Q_{rw})^c], \quad (2)$$

где A , B , C , a , b , c – безразмерные константы, рассчитанные с помощью доступных статистических

данных по всему миру и отдельным крупным регионам.

Саудовская Аравия связана с миром через множество каналов, важнейшим из которых является ископаемое топливо, поэтому в настоящую работу включены данные по мировым показателям. Постоянные величины в уравнении (2) рассчитаны с помощью статистических данных по всему миру и пяти крупнейшим регионам за последние двадцать лет. Наиболее оптимальное уравнение можно записать в виде:

$$W_w = 1,3 - 0,22 G_{rw} P_{rw}^{0,1} Q_{rw}^{0,5} - 0,08 / (G_{rw} P_{rw}^{0,1} Q_{rw}^{0,5}), \quad (3)$$

где значения W_w , G_{rw} , P_{rw} и Q_{rw} в начальный год равны единице. Как следует из уравнения (3), модификатор прироста W_w в значительной степени зависит от показателя ВВП на душу населения таким образом, что увеличение G_{rw} приведет к росту показателя W_w до максимального значения, а затем к его медленному снижению до нуля – это приведет параметры в устойчивое состояние. Такое же, но менее заметное воздействие демонстрируют показатели экологического загрязнения и коэффициента численности населения.

Уравнение (3) получено с использованием данных по миру и пяти крупнейшим регионам для выявления наилучшего способа прогнозирования возможных взаимодействий мировых показателей. Применение уравнения (3) непосредственно к отдельно взятой стране считается неправомерным, так как приводит к переоценке или недооценке показателей на страновом уровне, а также в сравнении их с мировыми показателями. Для Саудовской Аравии уравнение (3) необходимо откорректировать. Таким образом, оно примет следующий вид:

$$W_n = 1,3 - 0,22 K G_m P_m^{0,1} Q_m^{0,5} - 0,08 / (K G_m P_m^{0,1} Q_m^{0,5}), \quad (4)$$

где

$$K = 0,475. \quad (5)$$

2.2. Энергопотребление

Значение энергопотребления E , как и численность населения, растет с экспоненциальной скоростью. Темп его роста выше темпа прироста населения, что обусловлено стремлением людей к достижению высокого уровня жизни. Следовательно, энергопотребление характеризуется меньшим временем двукратного увеличения по сравнению с численностью населения. Соотношение времени удвоения энергопотребления со временем двукратного демографического прироста можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{\theta_{et}} = \frac{1}{\theta_e} + \frac{1}{\theta_q}, \quad (6)$$

где θ_{et} – общее время удвоения энергопотребления, включающее две составляющие: θ_q – время двукратного демографического прироста и θ_e – время удвоения энергопотребления за счет улучшения качества жизни в результате технического прогресса. Предполагается, что модификатор прироста населения W оказывает определяющее воздействие на энергопотребление. Окончательное уравнение примет следующий вид:

$$E_n = E_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n (1/\theta_{qo} V_{qn} + 1/\theta_{eo} V_{en})], \quad (7)$$

где E_n, E_{n-1} – энергопотребление (ископаемое топливо и водород) в n и $n-1$ годах; V_q, V_e – безразмерные модификаторы времени удвоения θ_q и θ_e соответственно.

Рост энергопотребления, обусловленный приростом населения, происходит медленнее, чем рост населения вследствие снижения бытового и коммерческого потребления в пересчете на человека, а количество энергии, потребляемой населением, пропорционально уменьшается. Таким образом, модификатор двукратного демографического прироста считается слабой функцией коэффициента численности населения (Q_m),

$$V_{qn} = Q_m^x, \quad (8)$$

где показатель степени x – крайне малое число ($x \leq 0,1$).

По мере истощения запасов ископаемого топлива, величина θ_e , обозначающая время удвоения энергопотребления за счет улучшения качества жизни, будет снижаться, так как для добычи ресурсов потребуются больше энергии. Значение этой компоненты будет также уменьшаться с ростом энергопотребления на душу населения. Повышение мировых цен на ископаемое топливо ведет к увеличению времени удвоения. Таким образом, соотношение модификатора времени удвоения примет вид:

$$V_{en} = C_{cr}^y R_m^z / B_m^v, \quad (9)$$

где C_{cr} – соотношение цен на ископаемое топливо и водород; $R_m = R_n/R_o$ – соотношение жидких ископаемых; $B_m = E_m/Q_m$ – энергопотребление на душу населения, нормированное в соответствии со своими начальными значениями. Показатели степени y, z, v – крайне малые числа ($\leq 0,1$).

В случае наличия неограниченных запасов ископаемого топлива, постоянный экспоненциальный темп роста энергопотребления (7) сопровождался бы непрерывным увеличением объемов экспорта. Однако запасы ископаемого топлива ограничены, и с течением времени их добыча усложняется ввиду большой разбросанности и дорогостоящего процесса извлечения. Следовательно, максимальный объем добычи ископаемого топлива, идущего на потребление

и экспорт в определенный момент времени, можно представить в виде функции оставшихся ресурсов R_n :

$$F_{pn} = \delta R_n, \quad (10)$$

где F_p – максимально возможный ежегодный объем добычи ископаемых ресурсов; δ – количество ежегодно добываемого ископаемого топлива. Таким образом, общий объем энергии, вырабатываемой в определенный год за счет ископаемого топлива и водорода, не может превышать значение $F_p + H$, где H – объем производства водорода.

2.3. Получение солнечного водорода

Энергетические потребности Саудовской Аравии и в значительной степени ее национальный доход полностью зависят от ископаемого топлива. За последние двадцать лет энергопотребление страны (рис. 1) резко выросло. За период с 1980 г., когда общее энергопотребление составляло 1,7 квадриллионов ВТУ (квадов), по 2000 г. энергопотребление страны увеличилось практически в три раза – до 4,6 квадов. В целом энергопотребление Саудовской Аравии составляет 1,1 % мирового потребления энергии. Такое высокое энергопотребление с учетом экспорта требует серьезного подхода к солнечной энергии [4].

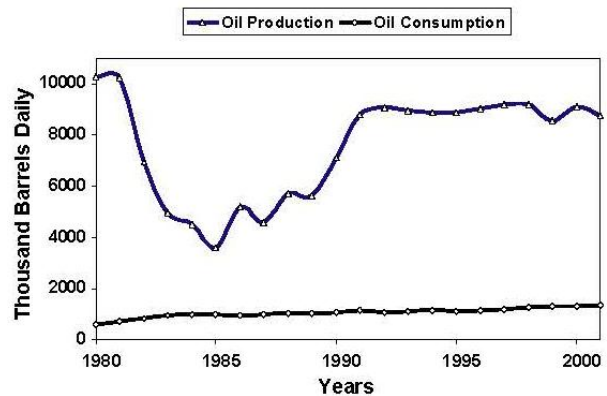


Рис. 1 – Производство и потребление нефти в Саудовской Аравии, 1980–2001 г.
Fig. 1 – Saudi Arabia oil production and consumption, 1980–2001

Среди разнообразных альтернативных источников энергии солнечная энергия выглядит наиболее привлекательной для Саудовской Аравии, так как страна получает солнечную энергию в количестве, превышающем энергию других видов возобновляемых источников.

С 1986 г. Королевство Саудовская Аравия сотрудничает с Германией в области исследований, разработок и экспериментов по получению и использованию солнечного водорода. Работы ведутся на экспериментальной установке Hysolar Project мощностью 350 кВт, разработанной и установленной в Цен-

тре науки и технологий имени короля Абдул-Азиза (KACST) в Саудовской Аравии (в 50 км к северо-западу от Эр-Рияда). Солнечная электростанция, которая была запущена 19 августа 1993 г., использует постоянный электрический ток из 350 кВт, вырабатываемых фотоэлементами. Водород в ежедневном объеме 463 м³ получают с помощью модифицированного электролизера щелочной воды (площадь электрода – 0,25 м², 120 элементов), работающего при нормальном давлении на солнечном электричестве [5].

Солнечная энергия является источником для производства электролизного водорода. Проектом Hysolar Project предусмотрено возведение в пустыне на территории Саудовской Аравии двух электростанций на двигателях Стирлинга мощностью 50 кВт. Полученная электроэнергия будет передаваться на установку мощностью 350 кВт для получения солнечного водорода. Наиболее перспективным способом получения водорода в Саудовской Аравии является именно электролиз. Первая в мире солнечно-водородная установка, работающая в Саудовской Аравии, постоянно совершенствуется в свете последних технологических достижений.

Солнечную энергию можно преобразовать в электрическую и/или тепловую энергию разными способами, среди которых предусмотрено использование фотоэлементов, установок башенного типа, концентрирующих коллекторов и т.д. Тем не менее, в свете прогнозируемой экономической выгоды, в настоящей работе рассматривается только фотоэлектрическая технология как способ производства электроэнергии и электролиз воды как способ получения водорода. Водород как энергоноситель способен стать связующим звеном между солнечной энергетикой и сектором энергопотребления благодаря таким качествам, как чистота, возобновляемость, способность к длительному хранению и транспортировке. Водород имеет высокий КПД и в ближайшем будущем окажется экономически рентабельным.

Существует несколько различных способов расщепления воды на водород и кислород с помощью солнечной энергии, из которых для Саудовской Аравии наиболее оптимальным является электролиз воды в силу следующих причин:

1) фотоэлектрическая технология позволяет непосредственно вырабатывать постоянный электрический ток, являясь в долгосрочной перспективе одним из наиболее многообещающих направлений;

2) электролизеры можно напрямую подключать к солнечному фотоэлектричеству;

3) технология электролиза полностью отработана.

Постепенное внедрение водородной технологии в энергетическую систему Саудовской Аравии, как и в мировую энергосистему, преследует следующие цели:

1) снижение потребления ископаемого топлива и, как результат, уменьшение количества вредных веществ, ежегодно выбрасываемых в биосферу;

2) сбережение запасов жидких ископаемых, являющихся ценнейшим сырьем для химической промышленности и предметом экспорта;

3) создание обоснованной устойчивой энергетической системы до полного отказа от ископаемого топлива.

Скорость внедрения была выбрана как экспоненциальная для того, чтобы отслеживать темп экспоненциального роста энергопотребления, который можно записать в виде:

$$H_n = H_{n-1} \{ \exp \ln 2 \Delta t_n / \theta_{hm} \}, \quad (11)$$

где H_n and H_{n-1} – объемы производства водорода в n и $n - 1$ годах соответственно, а θ_{hm} – время удвоения производства водорода. Последнее считается переменным значением, полученным как:

$$\theta_{hm} = D_1 + D_2(n-1), \quad (12)$$

где D_1 и D_2 – независимые постоянные, всевозможные комбинации которых создадут разнообразные сценарии внедрения водорода. Уравнение (12), представленное в таком виде, дает основание полагать, что с ростом производства водорода увеличивается время удвоения, что сокращает потребность в капитальных вложениях.

Необходимо отметить, что единица водородной энергии обладает более высоким коэффициентом использования, чем единица традиционной энергии. Другими словами, для выполнения одной и той же работы водородной энергии требуется меньше, чем традиционной, что можно записать как:

$$F = \eta H \quad (13)$$

или

$$H = \frac{1}{\eta} F, \quad (14)$$

где η – КПД использования водорода, разделенный на КПД использования ископаемого топлива.

При рассмотрении вопроса внедрения водорода необходимо учитывать, насколько производство водорода отстает или опережает энергопотребление в Саудовской Аравии. Если объем производства водорода меньше или равен уровню внутреннего энергопотребления, то есть при

$$\eta H_{pm} \leq E_n, \quad (15)$$

то значения внутреннего потребления ископаемого топлива F_{dn} , внутреннего потребления водорода H_{dn} и объема экспорта ископаемого топлива F_{xn} могут быть записаны как:



$$F_{dn} = E_n - \eta H_{pn}, \quad (16)$$

$$H_{dn} = H_{pn}, \quad (17)$$

$$F_{xn} = F_{pn} - F_{dn}, \quad (18)$$

где E_n – внутреннее энергопотребление (Саудовская Аравия). Если объем производства водорода превышает уровень внутреннего энергопотребления, то есть при

$$\eta H_{pn} > E_n, \quad (19)$$

то значения внутреннего потребления ископаемого топлива F_{dn} , внутреннего потребления водорода H_{dn} и объема экспорта водорода H_{xn} могут быть записаны как:

$$F_{dn} = 0, \quad (20)$$

$$H_{dn} = \frac{1}{\eta} E_n, \quad (21)$$

$$F_{xn} = F_{pn}, \quad (22)$$

$$H_{xn} = H_{pn} - H_{dn}. \quad (23)$$

2.4. Запасы ископаемого топлива

На сегодняшний день ископаемое топливо удовлетворяет большую часть мировых энергетических потребностей, но в результате его запасы быстро истощаются [6]. Наиболее оптимальным решением станет отказ от сжигания этого вида топлива и рациональное использование исключительно в качестве не имеющего альтернативы сырья для химической промышленности.

Солнечно-водородная энергетическая система позволит сохранить часть запасов ископаемого топлива для использования в качестве промышленного сырья. Оставшийся запас ископаемого топлива в Саудовской Аравии можно рассчитать следующим образом:

$$R_n = R_{n-1} - F_{pn} \Delta t_n. \quad (24)$$

2.5. Стоимость энергии

Доходность и спрос на энергию являются ключевыми факторами, влияющими на стоимость энергии. Предполагается, что эти факторы будут играть главную роль в разработке моделей долгосрочного энергопотребления [7]. В связи с той значимостью, которую они имеют в экономике Саудовской Аравии, в них включена стоимость традиционной и водородной энергии. На основании статистических данных соотношение стоимости жидкого ископаемого топлива (нефть и газ) можно записать как [8]:

$$C_{rjn} = 0,33 + 0,67 G_{rwn}^{0,2} F_{rwn}^{0,5} / R_{rwn}^{0,5}, \quad (25)$$

где $C_{rjn}(=C_{jn}/C_{jo})$ – соотношение стоимости ископаемого топлива (а именно, стоимость ископаемого топлива в n году, разделенная на стоимость ископаемого топлива в начальном году); $G_{rwn}(=G_{wn}/G_{wo})$ – соотношение мирового ВВП; $F_{rwn}(=F_{wn}G_{wo}/F_{wo}G_{wn})$ – соотношение мирового потребления ископаемого топлива на душу населения; $R_{rwn}(=R_{wn}/R_{wo})$ – соотношение мировых запасов ископаемого топлива.

Аналогичным путем соотношение мировых цен на водород запишем в виде:

$$C_{rhn} = 0,2 + 0,8 G_{rwn}^{0,2} F_{rwn}^{0,4} / H_{rwn}^{0,3}, \quad (26)$$

где $C_{rhn}(=C_{hn}/C_{ho})$ – соотношение стоимости водорода; $H_{rwn}(=H_{wn}/H_{wo})$ – соотношение объема мирового производства водорода.

Соотношение составной стоимости энергии можно записать как:

$$C_{rcn} = \gamma_{jn} C_{rjn} + \gamma_{hn} C_{rhn}, \quad (27)$$

где $C_{rcn}(=C_{rn}/C_{ro})$ – соотношение составной стоимости энергии; $\gamma_{jn}(=F_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления ископаемого топлива; $\gamma_{hn}(=\eta H_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления водорода (от общего объема мирового энергопотребления).

2.6. Валовой внутренний продукт (ВВП)

Темп роста ВВП в большинстве случаев выше, чем темп роста энергопотребления. Другими словами, время его удвоения несколько короче времени удвоения энергопотребления. Эту разницу можно объяснить постоянным развитием и совершенствованием технологий, способствующих повышению эффективности процессов преобразования энергии и производительности труда.

ВВП Саудовской Аравии делится, как правило, на две основные части в соответствии с его происхождением: 1) ВВП за счет обычной экономической деятельности населения G ; 2) ВВП за счет экспорта энергии на внешний рынок G_e . Первая часть характеризуется экспоненциальным темпом роста, что можно выразить как:

$$G_n = G_{n-1} \exp[\ln 2 \Delta t_n W_n \times (1/\theta_{go} V_{qn} + 1/\theta_{eo} V_{en} + 1/\theta_{go} V_{gn})], \quad (28)$$

где G_n и G_{n-1} – ВВП за счет обычной экономической деятельности в n и $n-1$ годах соответственно; θ_{go} – компонент времени удвоения изначального роста, учитывающий вклад технологического прогресса в экономический рост; V_{gn} – его модификатор, который соотносится со значениями времени двукратного демографического прироста, энергопотребления и ВВП следующим образом:



$$1/\theta_{gt} = 1/\theta_g + 1/\theta_q + 1/\theta_e, \quad (29)$$

где θ_{gt} – время удвоения роста ВВП.

Значение компонента времени удвоения будет уменьшаться с увеличением значения мирового ВВП на душу населения, так как последнее способствует развитию научно-исследовательской деятельности. Таким образом, значение модификатора V_{gn} можно записать как:

$$V_{gn} = 1/(G_{rn})^w, \quad (30)$$

где w – предположительно малое число ($w \leq 0,1$).

Вторая часть – ВВП за счет экспорта энергии – напрямую связана со стоимостью жидкого ископаемого топлива и объемом его экспорта, обусловленными мировым потреблением ископаемого топлива и доступностью его запасов в Саудовской Аравии. Предполагается, что по мере истощения запасов ископаемого топлива его постепенно заменит водород, способствуя таким образом увеличению ВВП за счет экспорта энергии. Это можно записать в следующем виде.

Если

$$\eta H_{pm} \leq E_n, \quad (31)$$

то

$$G_{en} = F_{xn} C_{fn}. \quad (32)$$

Если

$$\eta H_{pm} > E_n, \quad (33)$$

то

$$G_{en} = F_{xn} C_{fn} + H_{xn} C_{hm}, \quad (34)$$

где C_f and C_h – мировые цены на жидкое ископаемое топливо и водород. Эта составляющая ВВП подвержена колебаниям, порой резким, вследствие принятых на государственном и международном уровне решений, влияющих на цену, производство и т.д. Таким образом, ВВП Саудовской Аравии можно записать как:

$$G_m = G_n + G_{en}. \quad (35)$$

2.7. Экологический ущерб и качество жизни

Ископаемые виды топлива широко применяются в транспортной сфере, а также для выработки тепла и электроэнергии. Экологический ущерб прямо пропорционален объему потребления ископаемого топлива,

поэтому уравнение, описывающее это соотношение для Саудовской Аравии, примет следующий вид [9]:

$$P_n = U[F_{pn} - F_{xn} + \varepsilon(H_n - H_{xn})], \quad (36)$$

где P_n – объем экологического ущерба в n году; U – константа пропорциональности в единицах экологического ущерба на единицу энергии; ε – безразмерное соотношение экологического ущерба, нанесенного производством водорода на единицу водородной энергии, с экологическим ущербом, нанесенным производством традиционной энергии на единицу энергии.

Качество жизни меньше поддается определению и измерению. Более того, в каждой общественной формации может быть свое представление о нем, что подразумевает множество нюансов. В настоящей работе рассматриваются только четыре фактора, непосредственно влияющие на качество жизни: ВВП, запасы ресурсов, численность населения и экологический ущерб. Используя эти факторы в безразмерном виде, получаем показатель качества жизни:

$$L_n = (G_m R_m) / (P_m Q_m). \quad (37)$$

Уравнение (37) позволяет предположить, что показатель качества жизни прямо пропорционален ВВП и объему запаса ресурсов и косвенно пропорционален уровню экологического ущерба и численности населения.

3. Данные и расчеты

Для изучения будущей динамики параметров, указанных в предыдущем разделе статьи, необходимо выбрать отправную точку – в настоящей статье 2000 г. Временной период Δt равен одному году. Значения, характеризующие условия в 2000 г., взяты из соответствующей литературы и/или рассчитаны с помощью соответствующих соотношений.

Для удобства данные разделены на два раздела: глобальные данные и данные по Саудовской Аравии.

3.1. Глобальные данные

Уравнения для численности мирового населения и времени двукратного демографического прироста (удвоения численности населения) запишем как:

$$Q_{wo} = 6,1 \cdot 10^9, \quad (38)$$

$$\theta_{qvo} = 55,38 \text{ уг}. \quad (39)$$

Значения энергопотребления (только ископаемое топливо; атомная энергия и гидроэнергия не включены) и компонента удвоения времени энергопотребления за счет улучшения качества жизни:



$$E_{wo} = 147,36 \cdot 10^6 TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (40)$$

$$\theta_{ewo} = 96 \text{ yr}. \quad (41)$$

Запасы ископаемого топлива и оставшаяся часть ископаемых ресурсов, добываемых ежегодно [9]:

$$R_{wo} = 5,99 \cdot 10^9 TJ, \quad (42)$$

$$\delta_w = 0,025 \text{ yr}^{-1}. \quad (43)$$

Соотношение объемов производства и коэффициентов использования водорода и ископаемого топлива [7]:

$$H_{wo} = 3,2 \cdot 6TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (44)$$

$$\eta = 1,35. \quad (45)$$

Стоимость жидкого ископаемого топлива и водорода [4]:

$$C_{fo} = \$4,57 GJ^{-1}, \quad (46)$$

$$C_{ho} = \$22,60 GJ^{-1}. \quad (47)$$

Мировой ВВП и компонент времени удвоения мирового ВВП за счет технологий [10]:

$$G_{wo} = \$31,5 \cdot 10^{12}, \quad (48)$$

$$\theta_{gwo} = 19 \text{ yr}. \quad (49)$$

Коэффициенты экологического загрязнения U и ε :

$$U_w = 5 \cdot 10^{-3} \text{ T } GJ^{-1} \text{ ископаемого топлива}, \quad (50)$$

$$\varepsilon = 0,04. \quad (51)$$

Экспоненты модификатора времени удвоения [9]:

$$u_w = w_w = x_w = y_w = z_w = 0,1. \quad (52)$$

3.2. Данные по Саудовской Аравии

Численность населения Саудовской Аравии и время двукратного демографического прироста:

$$Q_o = 2,07 \cdot 10^7, \quad (53)$$

$$\theta_{qo} = 28 \text{ yr}. \quad (54)$$

Потребление топлива и компонент времени удвоения потребления топлива за счет улучшения качества жизни:

$$E_o = 2,61 \cdot 10^6 TJ \text{ yr}^{-1}, \quad (55)$$

$$\theta_{eo} = 96 \text{ yr}. \quad (56)$$

Запасы ископаемого топлива и оставшаяся часть ископаемых ресурсов, добываемых ежегодно:

$$R_o = 1,5 \cdot 10^9 TJ, \quad (57)$$

$$\delta = 0,012 \text{ yr}^{-1}. \quad (58)$$

Объем производства водорода:

$$H_o = 32 \cdot 10^3 TJ \text{ yr}^{-1}. \quad (59)$$

Следуя за Войтом (Voight) [11], допустим, что производство солнечного водорода началось в 2000 г. с мощностью, рассчитанной из уравнения (60).

Рассмотрим два сценария внедрения водорода, рассчитанных из значений времени удвоения внедрения водорода:

1-й сценарий:

$$\theta_h = 2 + 0,15(n-1) \text{ yr}; \quad (60)$$

2-й сценарий:

$$\theta_h = 4 + 0,15(n-1) \text{ yr}. \quad (61)$$

ВВП за счет естественного темпа роста и компонента времени удвоения ВВП за счет достижений технологии и повышения производительности:

$$G_o = \$16,83 \cdot 10^{10}, \quad (62)$$

$$\theta_{go} = 14,2 \text{ yr}. \quad (63)$$

Коэффициенты экологического загрязнения U и ε [9]:

$$U = 5 \cdot 10^{-3} \text{ T } GJ^{-1} \text{ ископаемого топлива}, \quad (64)$$

$$\varepsilon = 0,04. \quad (65)$$

Экспоненты модификатора времени удвоения:

$$u = w = x = y = z = 0,1. \quad (66)$$

3.3. Расчеты

Данные, представленные выше, использовались при расчетах в Фортране двух сценариев внедрения водорода с целью вычисления параметров солнечно-водородной энергетической системы для Саудовской



Аравии (и всего мира) за период времени с 2000 г. по 2120 г. Кроме того, был произведен ряд расчетов для сценария использования всех видов топлива, не предполагающего внедрение водорода.

4. Результаты и их обсуждение

Некоторые результаты представлены на рисунках вместе с другими прогнозами и оценками, сделанными в настоящей работе с целью проверки работоспособности модели.

На рис. 2 дан прогноз численности населения в Саудовской Аравии вместе с прогнозом Всемирного банка [10]. До 2035 г. они практически совпадают.

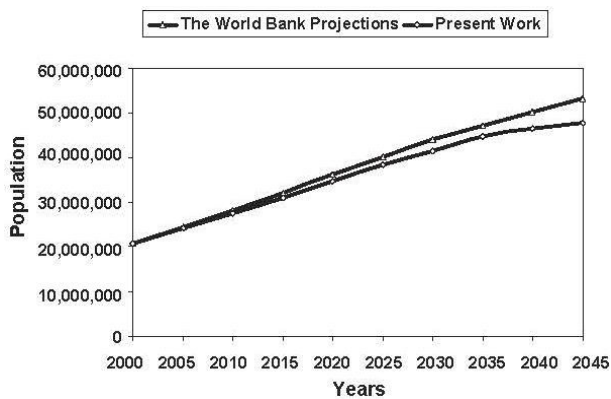


Рис. 2 – Прогноз численности населения Саудовской Аравии
Fig. 2 – Saudi Arabia population projections

На рис. 3 показано, что согласно прогнозам, численность населения Саудовской Аравии стабилизируется на уровне 49 млн человек. К этому приведет улучшение качества жизни.

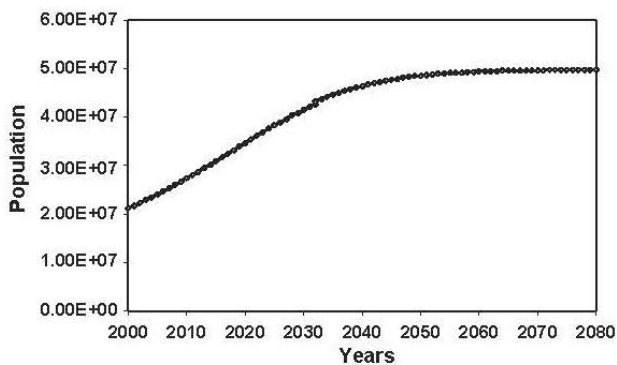


Рис. 3 – Прогноз численности населения Саудовской Аравии
Fig. 3 – Population projections for Saudi Arabia

На рис. 4 показан постепенный рост энергопотребления Саудовской Аравии в результате улучшения качества жизни и демографического роста.

На рис. 5 представлен прогноз энергопотребления и нефтедобычи в Саудовской Аравии до 2120 г. Следует отметить, что:

1) параллельно с численностью населения уровень энергопотребления стабилизируется на значении $7,9 \cdot 10^9 \text{ GJ yr}^{-1}$; 2) после 2067 г. объема добываемой нефти будет не хватать для удовлетворения своих внутренних потребностей, поэтому без внедрения солнечно-водородной энергетической системы страна может превратиться в чистого импортера энергии.

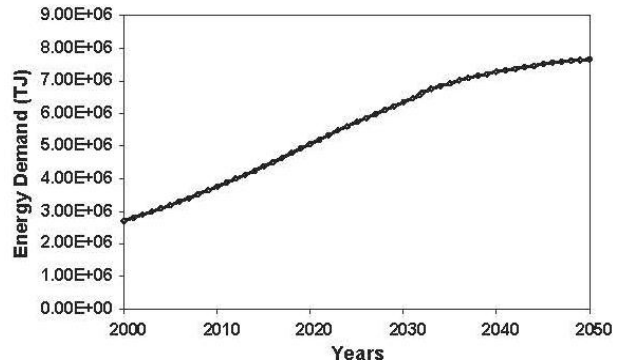


Рис. 4 – Прогноз энергопотребления Саудовской Аравии
Fig. 4 – Energy demand projections for Saudi Arabia

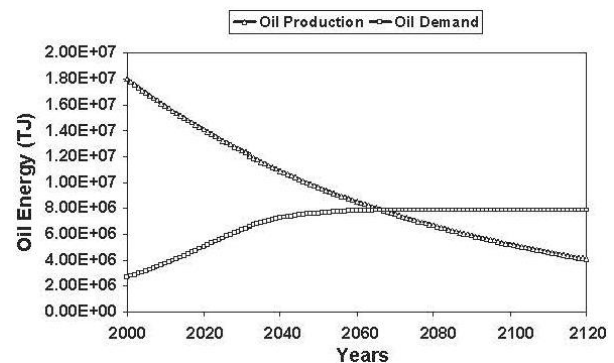


Рис. 5 – Спрос на нефть и ее производство в Саудовской Аравии
Fig. 5 – Oil energy demand and production for Saudi Arabia

Прогноз соотношения цен на нефть (рис. 6) говорит об их росте, что обусловлено повышением спроса на этот ресурс и сокращением его запасов.

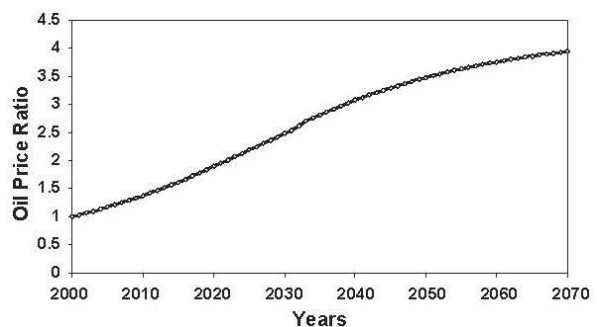


Рис. 6 – Прогноз стоимости нефти
Fig. 6 – Oil price projections



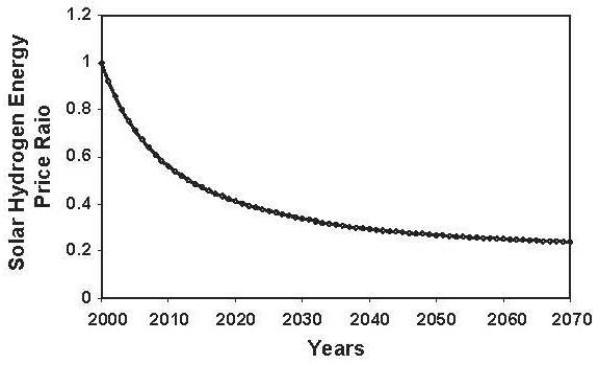


Рис. 7 – Прогноз стоимости солнечного водорода
Fig. 7 – Solar hydrogen price projections

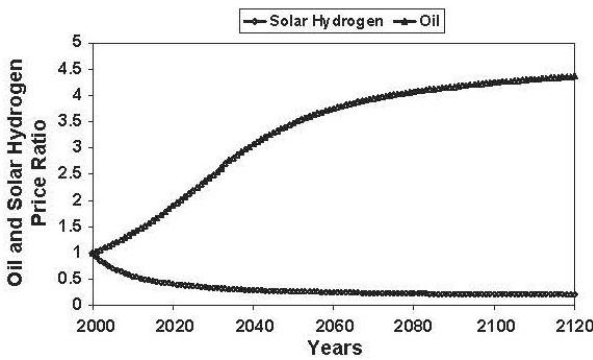


Рис. 8 – Прогноз стоимости нефти и солнечного водорода
Fig. 8 – Oil and solar hydrogen price projections

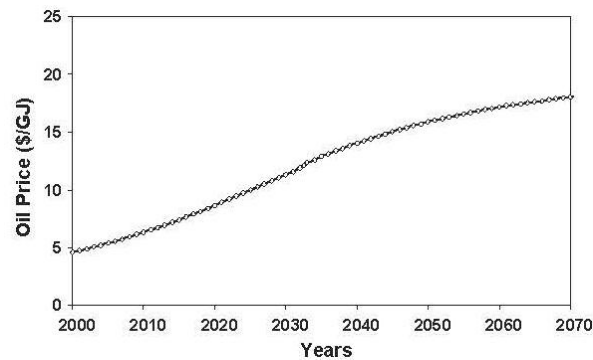


Рис. 9 – Прогноз цен на нефть
Fig. 9 – Oil price projections

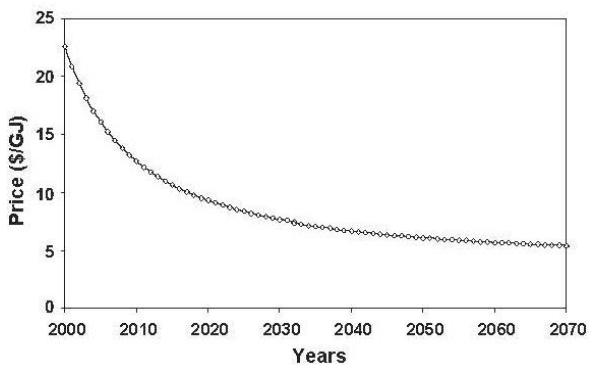


Рис. 10 – Прогноз стоимости солнечного водорода
Fig. 10 – Solar hydrogen price projections

Соотношение стоимости солнечного водорода демонстрирует обратную тенденцию в сторону понижения (рис. 7).

На рис. 8 показано соотношение цен на нефть и водород вплоть до 2120 г., а на рис. 9 и 10 эти цены представлены в долларах.

Можно отметить, что стоимость ископаемого топлива демонстрирует тенденцию к росту, в то время как цены на водород характеризуются снижением, и, как показано на рис. 11, в районе 2021 г. эти кривые пересекутся на уровне $9GJ^{-1}$. Но, поскольку водород обладает более высоким коэффициентом применимости ($\eta = 1,35$), в районе 2010 г. его стоимость сможет конкурировать со стоимостью ископаемого топлива.

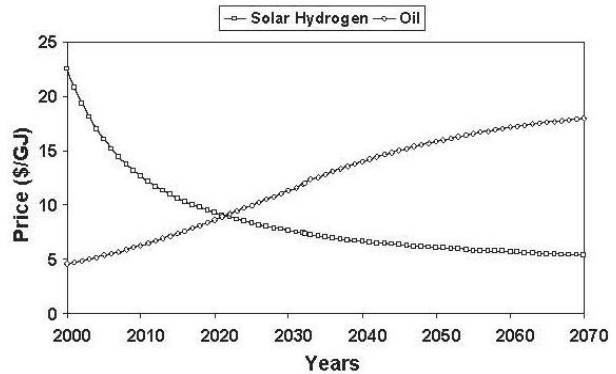


Рис. 11 – Прогноз цен на нефть и солнечный водород
Fig. 11 – Oil and Solar hydrogen price projections

На рис. 12 представлено соотношение ВВП, зависящего от экспорта неископаемого топлива, в расчете на душу населения (то есть показатель ВВП, зависящего от экспорта неископаемого топлива, в расчете на душу населения за определенный год, разделенный на аналогичный показатель 2000 г.) в зависимости от времени.

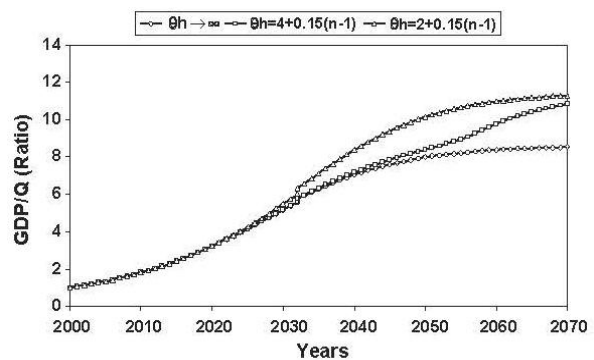


Рис. 12 – Соотношение ВВП Саудовской Аравии, зависящего от экспорта неископаемых видов топлива, в расчете на душу населения
Fig. 12 – Non oil export-dependent gross domestic product per capita ratio productions for Saudi Arabia

На рис. 12 видно, что при экономическом сценарии с использованием всех видов ископаемого топ-

лива (то есть $\theta_h = \infty$ без внедрения солнечно-водородной энергетической системы и с потребностью в импорте ископаемого топлива после 2067 г.) показатель ВВП на душу населения достигнет значения, в 8,5 раз превышающего тот же показатель в 2000 г, но с внедрением водородной технологии – в 11,3 раза.

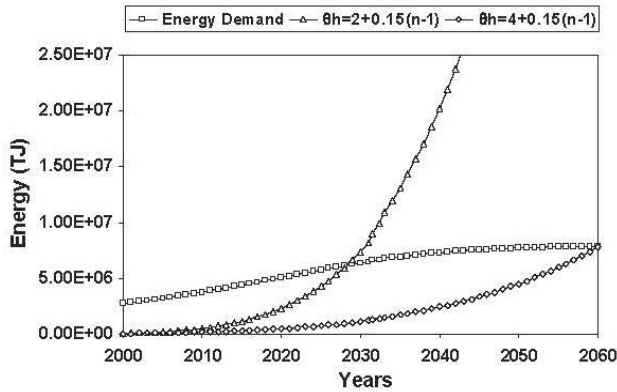


Рис. 13 – Прогноз энергопотребления и объемов производства солнечно-водородной энергии в Саудовской Аравии

Fig. 13 – Projections for Saudi Arabia energy demand and Solar hydrogen energy production

На рис. 13 представлен прогноз энергопотребления Саудовской Аравии и объем производства солнечно-водорода. При значениях объемов производства и энергопотребления, показанных на рис. 13, Саудовская Аравия сможет обеспечивать солнечно-водородной энергией свои внутренние энергетические потребности в 2028 г. при 1-ом сценарии: $\theta_h = 2 + 0,15(n - 1)$ уг и в 2060 г. при 2-ом сценарии: $\theta_h = 4 + 0,15(n - 1)$ уг. Кроме того, в определенный период времени после обеспечения внутренних энергетических потребностей у страны появится больше водорода на экспорт.

На рис. 14 представлено безразмерное соотношение экологического загрязнения ($P_n = P_o$) в качестве функции времени.

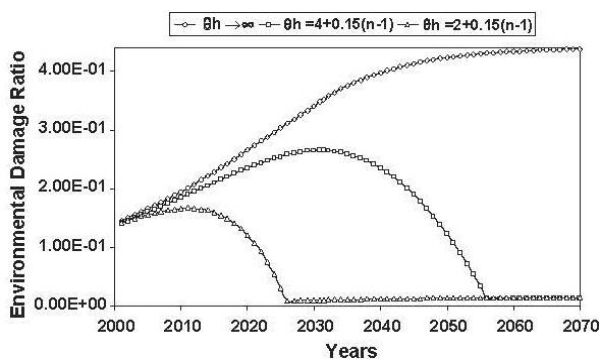


Рис. 14 – Прогноз соотношения экологического ущерба в Саудовской Аравии

Fig. 14 – Environmental damage ratio projections for Saudi Arabia

Видно, что без внедрения водорода показатель загрязнения воздуха будет повышаться и к 2070 г. достигнет уровня, в три раза превышающего показатель 2000 г. Внедрение водорода позволит сократить этот уровень в 0,1 раз по сравнению с 2000 г. Замедленный темп внедрения растянет этот процесс еще на 30 лет.

5. Заключение

Доходная часть бюджета Саудовской Аравии формируется преимущественно за счет экспорта ископаемого топлива, запасы которого ограничены и стремительно истощаются. В ближайшие шестьдесят лет Саудовская Аравия столкнется с энергетическим дефицитом. Поскольку солнечная энергия – наиболее распространенный природный ресурс, имеющийся в изобилии, для Саудовской Аравии крайне важно начать его использование. Для того чтобы решить эту задачу, можно наладить в стране производство солнечно-водорода с его дальнейшим использованием в качестве энергоносителя и предмета экспорта в другие страны.

Это решение обеспечит Саудовскую Аравию чистой и стабильной энергетической системой, а также позволит повысить уровень ВВП и качество жизни в целом.

Список литературы

- [1] CIA-The World Factbook 2002, Saudi Arabia.
- [2] Mohands, M. Use of the radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation [Text] / M. Mohands [et al.] // Solar Energy. – 2000. – Vol. 68. – No 2. – P. 161–168.
- [3] ElJrushi, G.S. Solar-hydrogen energy system for Libya [Text] / G.S. ElJrushi, T. Veziroglu // Int. J. Hydrogen Energy. – 1990. – Vol 15. – No 12. – P. 885–894.
- [4] Energy Information Administration (EIA). Saudi Arabia Country Analysis Brief. – November, 2002.
- [5] Huraib, F.S. Lessons learned from solar energy projects in Saudi Arabia [Text] / F.S. Huraib, S.M. Hasnain, S. Alawaji // Int. J. Renew. Energy. – 1996. – Vol. 9. – No 1–4. – P. 1144–1147.
- [6] Awad, A.H. Hydrogen versus synthetic fossil fuels [Text] / A.H. Awad, T. Vezirglu // Int. J. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – P. 355.
- [7] Edmonds, J. Global energy: assessing the future, institute for energy analysis [Text] / J. Edmonds, J.M. Reilly. – Oxford and New York: Oxford University Press; 1985.
- [8] ElJrushi G.S. Solar-hydrogen energy model for Libya: Ph.D. thesis. – University of Miami, Coral Gables, FL. – June, 1987.
- [9] Veziroglu, T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system [Text] / T. Veziroglu, O.T. Basar // THEME Conference Proceedings. New York. – NY: PlenumPress, 1975.



[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight, C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets [Text] / C. Voight // Int. J. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – P. 491.

References

[1] CIA-The World Factbook 2002, Saudi Arabia.

[2] Mohands M., Balghonaim A., Kassas M., Rehman S., Halawani T.O. Use of the radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. *Solar Energy*, 2000;68(2):161–8.

[3] ElJrushi G.S., Veziroğlu T. Solar-hydrogen energy system for Libya. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1990;15(12):885–94.

[4] Energy Information Administration (EIA). Saudi Arabia Country Analysis Brief, November, 2002.

[5] Huraib F.S., Hasnain S.M., Alawaji S. Lessons learned from solar energy projects in Saudi Arabia. *Int. J. Renew Energy*, 1996;9(1–4):1144–7.

[6] Awad A.H., Vezirçolu T. Hydrogen versus synthetic fossil fuels. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:355.

[7] Edmonds J., Reilly J.M. Global energy: assessing the future, institute for energy analysis. Oxford and New York: Oxford University Press; 1985.

[8] ElJrushi G.S. Solar-hydrogen energy model for Libya. Ph.D. thesis, University of Miami, Coral Gables, FL, June, 1987.

[9] Veziroğlu T., Basar O.T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system. *THEME Conference Proceedings*. New York, NY: Plenum Press; 1975.

[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:491.



ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

13–16 сентября 2018

О конференции

Конференция посвящена фундаментальным и прикладным научным проблемам, относящимся к динамично развивающемуся сегодня направлению науки и техники – энергетике, основанной на возобновляемых ресурсах. Тематика конференции включает научные проблемы разработки новых материалов и новых подходов для создания таких устройств, как фотовольтаические преобразователи, устройства накопления, хранения и преобразования электрической энергии.

Тематика конференции

В ходе работы Конференции будет обсуждаться широкий спектр вопросов по научно-техническим и практическим проблемам возобновляемой энергетике, в том числе:

Аккумуляторы и суперконденсаторы

- Металл-ионные аккумуляторы (МИА)
- Литий-ионные аккумуляторы
- Катодные материалы для МИА
- Анодные материалы для МИА
- Электролиты для МИА
- Суперконденсаторы

Фотовольтаика

- Кремниевые солнечные элементы
- Тонкопленочные солнечные элементы
- Концентраторные солнечные элементы
- Новые материалы и принципы для солнечной энергетике
- Прикладные аспекты, вопросы энергоэффективности солнечной энергетике

Топливные элементы

- Способы получения, очистки и хранения водорода
- Твердополимерные электролиты и мембраны
- Высокоэффективные катализаторы для топливных элементов
- Суперионные проводники и электродные материалы
- Редокс-батареи

Энергоустановки

- Разработки
- Тенденции развития
- Экономика

<http://re2018.lssi.su>

[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight, C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets [Text] / C. Voight // Int. J. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – P. 491.

References

[1] CIA-The World Factbook 2002, Saudi Arabia.

[2] Mohands M., Balghonaim A., Kassas M., Rehman S., Halawani T.O. Use of the radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. *Solar Energy*, 2000;68(2):161–8.

[3] ElJrushi G.S., Veziroğlu T. Solar-hydrogen energy system for Libya. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1990;15(12):885–94.

[4] Energy Information Administration (EIA). Saudi Arabia Country Analysis Brief, November, 2002.

[5] Huraib F.S., Hasnain S.M., Alawaji S. Lessons learned from solar energy projects in Saudi Arabia. *Int. J. Renew Energy*, 1996;9(1–4):1144–7.

[6] Awad A.H., Vezirçolu T. Hydrogen versus synthetic fossil fuels. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:355.

[7] Edmonds J., Reilly J.M. Global energy: assessing the future, institute for energy analysis. Oxford and New York: Oxford University Press; 1985.

[8] ElJrushi G.S. Solar-hydrogen energy model for Libya. Ph.D. thesis, University of Miami, Coral Gables, FL, June, 1987.

[9] Veziroğlu T., Basar O.T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system. *THEME Conference Proceedings*. New York, NY: Plenum Press; 1975.

[10] The World Bank Group data for the World and for Saudi Arabia 2000, 2001.

[11] Voight C. Materials and energy requirements of solar-hydrogen planets. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1984;9:491.



ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

13–16 сентября 2018

О конференции

Конференция посвящена фундаментальным и прикладным научным проблемам, относящимся к динамично развивающемуся сегодня направлению науки и техники – энергетике, основанной на возобновляемых ресурсах. Тематика конференции включает научные проблемы разработки новых материалов и новых подходов для создания таких устройств, как фотовольтаические преобразователи, устройства накопления, хранения и преобразования электрической энергии.

Тематика конференции

В ходе работы Конференции будет обсуждаться широкий спектр вопросов по научно-техническим и практическим проблемам возобновляемой энергетике, в том числе:

Аккумуляторы и суперконденсаторы

- Металл-ионные аккумуляторы (МИА)
- Литий-ионные аккумуляторы
- Катодные материалы для МИА
- Анодные материалы для МИА
- Электролиты для МИА
- Суперконденсаторы

Фотовольтаика

- Кремниевые солнечные элементы
- Тонкопленочные солнечные элементы
- Концентраторные солнечные элементы
- Новые материалы и принципы для солнечной энергетике
- Прикладные аспекты, вопросы энергоэффективности солнечной энергетике

Топливные элементы

- Способы получения, очистки и хранения водорода
- Твердополимерные электролиты и мембраны
- Высокоэффективные катализаторы для топливных элементов
- Суперионные проводники и электродные материалы
- Редокс-батареи

Энергоустановки

- Разработки
- Тенденции развития
- Экономика

<http://re2018.lssi.su>

УДК 621.311.25

ПЕРВИЧНАЯ АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДВУХКООРДИНАТНОГО СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА*

С.В. Митрофанов¹, А.Ю. Немальцев², Д.К. Байкасенов¹

¹ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ),
д. 141, пр-т Победы, Оренбург, 460005, Россия
тел.: +7(3532)37-25-09; e-mail: mitser2002@mail.ru, baykasenov@bk.ru

²АО «Завод “Инвертор”»
д. 8, пр-д Автоматики, Оренбург, 460048, Россия
тел.: +7(3532)48-24-52; e-mail: nemalcev@sbp-invertor.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.043-054

Заключение совета рецензентов: 28.02.18 Заключение совета экспертов: 05.03.18 Принято к публикации: 12.03.18

Одной из причин высокой себестоимости электрической энергии, вырабатываемой стационарными солнечными электростанциями, является низкий коэффициент полезного действия фотоэлектрических преобразователей. Использование высокоточных систем непрерывного слежения за солнцем позволит решить данную проблему.

Приведено подробное описание разработанной модернизированной структуры автономной фотоэлектрической установки со статично и динамично расположенными модулями солнечных батарей и физической модели автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера. Представленная разработка повышает энергоэффективность использования солнечных батарей за счет точного наведения динамично расположенных солнечных модулей на солнце по двум координатам (азимуту и углу склонения) в течение дня. Кроме того, указана другая особенность данной гелиоустановки, заключающаяся в том, что статично и динамично расположенные фотоэлектрические модули комплектуются двумя типами солнечных батарей – монокристаллическими и поликристаллическими, что приводит к дополнительному выигрышу в выработке электрической мощности независимо от облачности. Отмечены реализованные способы повышения надежности работы автономной солнечной электростанции. Также рассмотрены существующие системы слежения за солнцем как в Российской Федерации (Оренбургская, Томская, Челябинская области), так и за рубежом (Соединенные Штаты Америки, Индия, Иран, Турция, Тайвань) и обоснована необходимость внедрения фотоэлектрических установок с солнечными трекерами. Авторами статьи успешно проведены первичные испытания разработанной автономной солнечной электростанции, суть которых заключалась в экспериментальном сравнении выработки электроэнергии с помощью статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей. Результаты проведенных опытов показали, что применение солнечного модуля с высокоточной системой слежения по двум осям, по сравнению со статично расположенным модулем, позволяет увеличить коэффициент полезного действия фотоэлектрической установки на 50 %. Таким образом, экспериментально доказана эффективность применения автоматизированных следящих систем. Работа может быть полезна при проектировании энергоэффективных фотоэлектрических установок с системами непрерывного слежения за солнцем.

Ключевые слова: двухкоординатный солнечный трекер; системы слежения за солнцем; повышение энергетической эффективности автономных солнечных станций; солнечные станции Оренбургской области; альтернативная энергетика в Оренбуржье.

*Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкасенов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):43-54.



PRIMARY TESTING OF AUTOMATED DUAL-AXIS SOLAR TRACKER IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE ORENBURG REGION AS THE PROSPECTS FOR THE ESTABLISHMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX

S.V. Mitrofanov¹, A.U. Nemaltsev², D.K. Baykasenov¹

¹Orenburg State University
141 Pobeda Ave., Orenburg, 460005, Russia
tel: +7 3532 37 25 09; e-mail: mitser2002@mail.ru, baykasenov@bk.ru
²JSC "Invertor Factory"
8 Avtomatika Dr., Orenburg, 460048, Russia
tel.: +7 3532 48 24 52, e-mail: nemalcev@sbp-invertor.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.043-054

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

One of the reasons for the high cost of electricity generated by statically located solar power plants is the low efficiency of photoelectric converters. Using high-precision solar tracking system will solve this problem.

The paper provides a detailed description of the developed modernized structure of an autonomous solar power station with statically and dynamically located modules of solar batteries and a physical model of an automated dual-axis solar tracker. The presented development allows us to increase energy efficiency of solar batteries by precision pointing dynamically located solar modules on the Sun in two coordinates (azimuth and declination angle) during the day. In addition, it is shown that another feature of this photovoltaic system is that statically and dynamically located photoelectric modules are equipped with two types of solar cells – monocrystalline and polycrystalline that leads to an additional gain in the generation of electrical power regardless of the clouds. The ways of increasing the reliability of the autonomous solar power plant operation are mentioned. We have considered the solar tracking systems in the Russian Federation (Orenburg, Tomsk, Chelyabinsk regions) and abroad (United States of America, India, Iran, Turkey, Taiwan), and have justified the necessity of using photovoltaic systems with solar trackers. Moreover, we have successfully tested the developed autonomous solar power plant; the essence of the tests is in an experimental comparison of power generation using statically and dynamically located solar cell modules. The results of the experiments have showed that the use of a solar module with a precision dual-axis solar tracking system, in comparison with a statically located module, makes it possible to increase the efficiency of a photovoltaic installation by 50 %. Thus, experimental evidence of the effectiveness of the automated tracking system application has been obtained. The work can be useful in the design of energy-efficient photovoltaic installations with the solar tracking system.

Keywords: dual-axis solar tracker; solar tracking systems; improving the energy efficiency of autonomous solar power plants; solar power plants in the Orenburg Region; alternative energy in the Orenburg Region.



*Сергей Владимирович
Митрофанов
Sergey Mitrofanov*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, декан электроэнергетического факультета ФБГОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Образование: Оренбургский государственный университет (1996 г.).

Область научных интересов: энергосбережение; электромагнитная совместимость; качество электрической энергии; возобновляемые источники энергии.

Публикации: 68.
h-index 3

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Dean of Faculty of Electrical Power Engineering, Orenburg State University.

Education: Orenburg State University, 1996.

Research interests: energy saving; electromagnetic compatibility; electric power quality; renewable energy sources.

Publications: 68.



Александр Юрьевич
Немальцев
Alexander Nemaltsev

Сведения об авторе: ведущий инженер по работе с проектными институтами АО «Завод «Инвертор»».

Образование: Оренбургский государственный университет: бакалавр (2015 г.), магистр (2017 г.).

Область научных интересов: автоматизированные энергетические системы и комплексы; устройства для измерения и тестирования фотоэлектрических установок.

Публикации: 11.
h-index 1

Information about the author: Leading Engineer for work with project institutes, JSC "Inverter Factory".

Education: Orenburg State University: bachelor, 2015; master, 2017.

Research interests: automated energy systems and complexes; devices for measuring and testing photovoltaic systems.

Publications: 11.



Дамир Куандыкович
Байкашенов
Damir Baykashenov

Сведения об авторе: студент магистратуры Оренбургского гос. университета (электроэнергетический факультет).

Образование: Оренбургский государственный университет (2017 г.).

Область научных интересов: солнечная энергетика; возобновляемые источники энергии; энергосбережение.

Публикации: 14.
h-index 1

Information about the author: Student of Master's program at Orenburg State University (Faculty of Electrical Power Engineering).

Education: Orenburg State University, 2017.

Research interests: solar power engineering; renewable energy sources; energy saving.

Publications: 14.



1. Введение

Созданная человечеством техносфера способствует постепенному истощению природных ресурсов, загрязнению окружающей среды, а также ухудшению здоровья людей. С целью сохранения экологии и обеспечения энергетической независимости, большинство развитых стран (Германия, США, Дания, а в последние годы – Россия) стали наращивать мощности ВИЭ. На данный момент наибольшее внимание уделяется развитию гелиоэнергетики, поскольку энергия солнца – неисчерпаема, распространена повсеместно и является экологически чистой по сравнению с традиционными источниками.

Солнечные электростанции (СЭС) обладают как достоинствами (повсеместное распространение, неисчерпаемость и экологичность энергоисточника), так и недостатками. Главным недостатком – низкий КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) (около 28 %), что является причиной высокой себестоимости генерируемой электроэнергии. Солнечные панели в стационарном положении получают основную долю энергии солнца в полдень, хотя значительная мощность доступна и в утренние часы, и после полудня. Эти потери связаны с принципом работы ФЭП, поскольку наибольшая производительность статично расположенных солнечных модулей обеспечивается при попадании солнечных лучей на поверхность СБ под прямым углом, а именно в полдень. Увеличение различия между углами падающего светового потока на поверхность СБ и нормалью солнечной панели приводит к снижению мощности, вырабатываемой СЭС.

Одним из способов повышения энергоэффективности использования СЭС является применение автоматизированных систем непрерывного слежения за солнцем (солнечных трекеров).

Большой вклад в развитие систем непрерывного слежения за солнцем внесли отечественные исследователи. Например, К.В. Аржановым разработана автономная ФЭУ с двухкоординатной системой наведения солнечных батарей на солнце мощностью 1 500 Вт, а также проведены исследования энергетических характеристик станции и разработаны способ и алгоритм управления ФЭУ, цифровые модели элементов систем слежения за солнцем с электромеханическими исполнительными механизмами [1–3]. А.С. Петрусевым разработана ФЭУ мощностью 190 Вт с солнечным трекером для электроснабжения удаленных районов и предложено внедрение гелиостанций с одновременным использованием солнечных трекеров и акриловых концентраторов [4, 5]. Исследователями А.В. Юрченко, М.В. Китаевой, А.В. Охорзиной, А.В. Скороходовым разработан экспериментальный макет одноосной системы слежения за солнцем (мощность установки 5 Вт), проведены испытания данной ФЭУ, которые подтвердили эффективность использования солнечных трекеров [6, 7]. Группа ученых во главе с Ю.А. Шиняковым в работе [8] представила описание автономной энергоустановки с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей, позволяющей повысить энергоэффективность ФЭУ более чем на 98 % при шаговом изменении напряжения СБ. В работе Ф.В. Саврасова представлены результаты исследований способов повы-

шения энергоэффективности автономных ФЭУ, в частности солнечных трекеров [9]. И.Р. Рахматуллин применил систему слежения за солнцем для того, чтобы повысить производительность разработанного солнечного опреснителя [10–12]. В 2017 г. в России введен ГОСТ Р 57229-2016 [13], который предъявляет жесткие требования к системам слежения за солнцем. Создание нормативно-технической базы позволит разработчикам солнечных трекеров конструировать высококачественные энергоэффективные ФЭУ, отвечающие современным требованиям.

Применение солнечных трекеров актуально не только в России, но и за рубежом, поскольку системы непрерывного слежения, как правило, считаются неотъемлемой частью большинства автономных энергоэффективных гелиостанций. В работе [14] описаны все существующие типы однокоординатных (с вертикальной, горизонтальной и наклонной осями вращения) и двухкоординатных (солнечные модули располагаются либо на опорной плоскости, либо на несущем столбе) следящих систем, рассмотрены их особенности, указаны достоинства и недостатки. Зарубежный опыт проектирования солнечных трекеров с одной и двумя степенями свободы представлен в работах [15, 16] и [17–19] соответственно. В статье [20] рассмотрена математическая модель двухосевой системы слежения за солнцем и тем самым доказана эффективность этой системы. Вопрос разработки

систем управления солнечными трекерами на базе Arduino детально освещен в статьях [21, 22]. Результаты исследования, приведенные в статье [23], свидетельствуют о том, что использование СЭС с однокоординатным солнечным трекером позволило увеличить генерацию электрической мощности на 33 % относительно ФЭУ с фиксированным солнечным модулем.

Целью данного исследования является проведение первичных испытаний фотоэлектрической установки с двухкоординатной системой слежения за солнцем в климатических условиях Оренбургской области. В задачи исследования входят: проектирование модернизированной структуры автономной СЭС, практическая оценка эффективности автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера (АДСТ), обработка полученных экспериментальных данных. Эти вопросы в литературных источниках освещены недостаточно, поэтому поставленные задачи являются актуальными.

Впервые в ФЭУ с АДСТ реализовано совместное использование монокристаллических и поликристаллических солнечных батарей (СБ), что привело к повышению энергоэффективности СЭС независимо от облачности. Кроме того, разработано собственное программное обеспечение для управления системой слежения, а также для защиты установки от налипания снега, гололедообразования и ветровых нагрузок.



Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>I</i>	Сила тока, А
<i>M</i>	Двигатель
<i>P</i>	Активная мощность, Вт
ΔP	Потери активной мощности, %
<i>t</i>	Время, ч
<i>W</i>	Выработанная электроэнергия, Вт·ч
<i>Буквы русского алфавита</i>	
<i>P</i>	Редуктор червячный
<i>Индексы нижние</i>	
<i>cts</i>	Контроллер наведения на солнце
<i>dyn</i>	Динамично расположенный модуль солнечных батарей
<i>max</i>	Максимальное значение
<i>stat</i>	Статично расположенный модуль солнечных батарей
<i>w</i>	Рабочее значение
<i>wPV</i>	Рабочее значение для солнечной батареи
<i>Аббревиатуры</i>	
АДСТ	Автоматизированный двухкоординатный солнечный трекер
АКБ	Аккумуляторная батарея
АСЭС	Автономная солнечная электростанция
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ДВ	Датчик ветра
ДПТ	Двигатель постоянного тока
ДС	Датчик положения солнца
ДМ	Дискретный модуль
ИН	Инвертор напряжения
КВ	Концевые выключатели
КЗР	Контроллер заряда – разряда аккумуляторной батареи
КНС	Контроллер наведения на солнце
КПД	Коэффициент полезного действия
ПЛК	Программируемый логический контроллер

СЭС	Солнечная электростанция
СБ	Солнечные батареи
ФЭП	Фотоэлектрические преобразователи
ФЭУ	Фотоэлектрическая установка

2. Теоретический анализ

2.1. Принципиальная схема автономной солнечной электростанции

На крыше одного из корпусов Оренбургского государственного университета установлена и введена в эксплуатацию АСЭС с АДСТ суммарной мощностью 800 Вт. Вырабатываемая мощность СЭС идет на частичное покрытие затрат на освещение аудиторий корпуса (далее – потребитель электроэнергии). В

работе [24] приведен подробный расчет мощности ФЭУ и ее основных элементов (СБ, ИН, КЗР, АКБ), а также представлены результаты расчета осветительной нагрузки.

АСЭС состоит из трех основных частей: АДСТ с закрепленными на нем СБ; статично смонтированных СБ на жестко закрепленной площадке; системы управления АСЭС (лабораторного стенда). Принципиальная электрическая схема работы станции представлена на рис. 1.

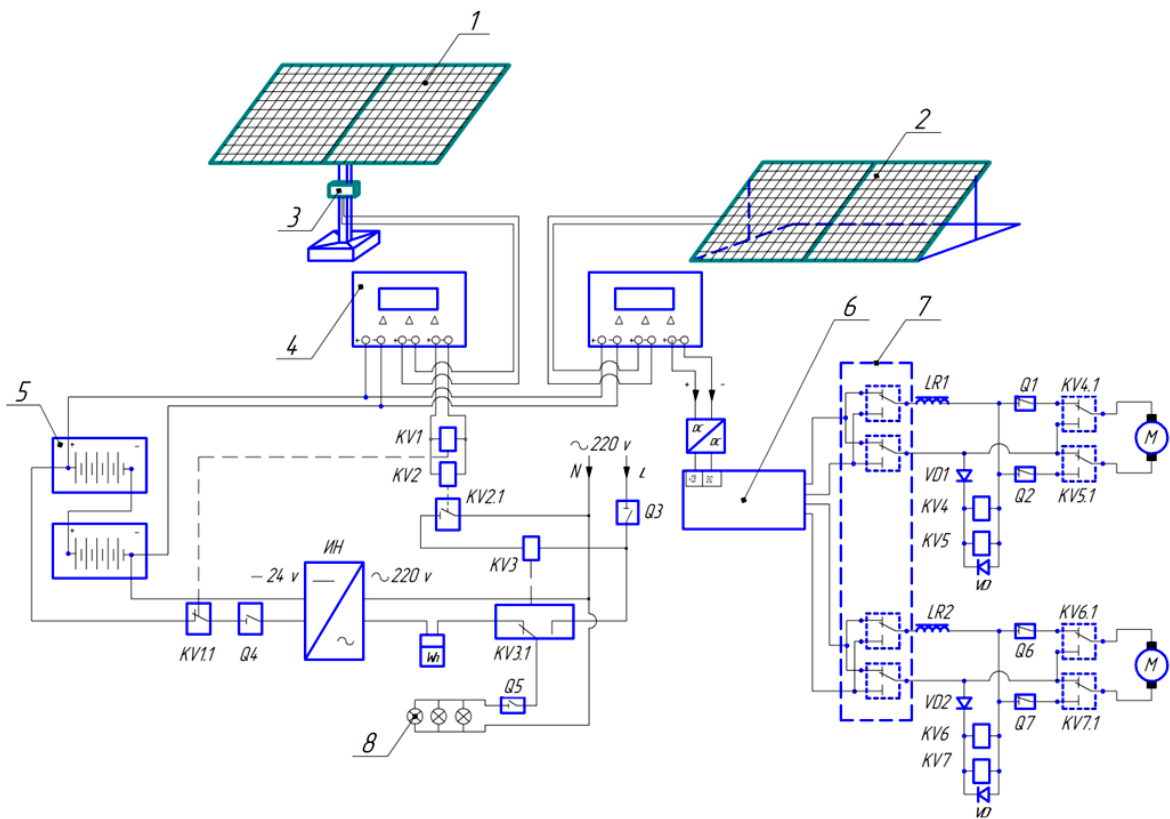


Рис. 1 – Принципиальная электрическая схема автономной солнечной электростанции:

- 1 – динамично расположенный модуль солнечных батарей; 2 – статично расположенный модуль солнечных батарей;
- 3 – монтажный короб; 4 – контроллер заряда аккумуляторной батареи; 5 – аккумуляторные батареи;
- 6 – микроконтроллер «Arduino Mega»; 7 – модульное реле; 8 – осветительная нагрузка

Fig. 1 – Principal scheme of an autonomous solar power station:

- 1 – dynamically located solar cell modules; 2 – statically located solar cell modules; 3 – junction box; 4 – charge controller;
- 5 – batteries; 6 – microcontroller “Arduino Mega”; 7 – relay module; 8 – lighting load

Выбор данной электрической схемы АСЭС обоснован необходимостью проведения экспериментального сравнения выработки электроэнергии с помощью статично и динамично расположенных модулей СБ. Модернизация структуры станции проявляется в применении двух типов СБ: монокристаллических Exmork ФСМ-200М (генерируют большую электрическую мощность в единицу времени при ясной по-

годе по сравнению со вторым типом) и поликристаллических Exmork ФСМ-200П (вырабатывают больше мощности в единицу времени относительно предыдущих при пасмурной погоде). Совместная работа двух статично расположенных типов СБ обеспечит взаимную компенсацию недостаточной выработки мощности и оптимизацию экономических затрат. Другая пара модулей СБ, закрепленная на подвиж-

ной платформе АДСТ, будет облучена все время и теоретически должна генерировать максимальную электрическую мощность.

Представленные на схеме контроллеры «заряда – разряда» № 1 и № 2 в онлайн режиме регистрируют выходные параметры СБ (напряжение; сила тока; температура панели СБ; накопленная за день электроэнергия в А·ч). Энергия накапливается в АКБ емкостью 100 А·ч при постоянном напряжении 24 В. ИН трансформирует энергию в переменное синусоидальное напряжение 220 В, 50 Гц. Однофазный счетчик учитывает количество энергии, которую потребляет нагрузка.

Потребители получают питание от АКБ, если его заряд выше 30 %. В случае когда при пасмурной погоде заряд АКБ меньше установленного значения, группой реле KV1 – KV3 осуществляется перевод потребителей на основное питание системы электропитания корпуса. Этот принцип является отличительной особенностью разработанной АСЭС.

2.2. Проектирование автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера

Одним из основных способов повышения энергетической эффективности АСЭС является реализация автоматического слежения рабочей поверхности СБ за солнцем. Кроме того, степень повышения энергоэффективности гелиостанций зависит от широты местности и условий эксплуатации ФЭУ.

Для разработанной АСЭС был выбран двухкоординатный солнечный трекер, поскольку данный трекер, в отличие от однокоординатного, вращается не только в направлении восток-запад, но и постепенно изменяет наклон платформы АСЭС, следуя за изменением склонения солнца.

Основными составными элементами конструкции АДСТ являются: рабочая подвижная платформа; линейный актуатор; червячный редуктор; два коллекторных ДПТ; опорная мачта; крестообразная платформа; четыре концевых выключателя.

Рабочая платформа площадью 2 м², состоящая из двух СБ мощностью по 200 Вт каждая, позиционируется по азимуту благодаря вращающему моменту, который передается от коллекторного ДПТ через червячный редуктор [25]. Вертикальное позиционирование рабочей платформы обеспечивает линейный актуатор. Подвижная рабочая платформа вместе с электроприводом управления АДСТ жестко смонтирована на опорной мачте, основание которой представляет собой крестообразную устойчивую платформу. Общий вид спроектированного АДСТ представлен на рис. 2.



Рис. 2 – Общий вид автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера
Fig. 2 – General view of the automated dual-axis solar tracker

Следящая система автоматического управления включает в себя: ДС; КНС; два ДПТ с редукторами; четыре КВ (рис. 3).

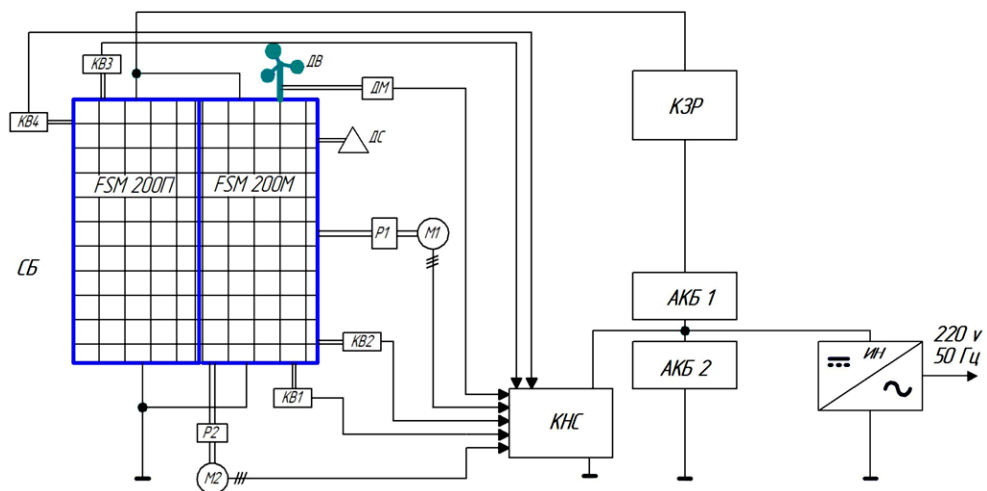


Рис – 3.
Функциональная схема АДСТ
Fig. 3 – Functional scheme of an automated dual-axis solar tracker



3. Методика эксперимента

Управление системой непрерывного слежения за солнцем осуществлялось посредством ПЛК Arduino Uno [26, 27]. При заходе солнца платформа АДСТ направлена на запад, но со временем происходит снижение солнечной активности, светового потока уже недостаточно для генерации энергии СБ, поэтому КЗР АКБ подает команду на позиционирование платформы на восток [28]. При этом КВ предотвращают чрезмерный поворот рабочей платформы АДСТ. В режиме автоматического слежения за солнцем КНС (микроконтроллер Arduino и электропривод АДСТ) осуществляет точное наведение рабочей поверхности АДСТ на солнце путем измерения дискретных сигналов в виде уравнивающих токов от ДС. Если правый и левый фотоэлементы выдают одинаковое значение силы тока (одновременно освещаются солнцем), то система слежения не перемещает платформу по координате X (по азимуту); если разное, то солнечный трекер перемещает платформу до полной компенсации разности по силе тока. Принцип позиционирования по координате Y (по углу места) аналогичен.

Ветровые нагрузки, налипание снега и гололедные образования могут нарушить бесперебойную работу СЭС. Для защиты от разрушающего

воздействия ветра (при скорости более $8 \div 9$ м/с) чашечный анемометр анализирует ветровую нагрузку, а ДВ формирует аналоговый сигнал на ДМ. После этого сигнал интегрируется по времени и скорости, затем цифровой сигнал поступает на ПЛК Arduino, обрабатывается, и далее подается команда на электропривод, чтобы он переориентировал трекер в горизонтальное положение [29]. С целью защиты станции от гололедообразования и снежных отложений применен резистивный датчик давления [30].

Для экспериментального исследования работы АДСТ был выбран период с 15.05.2017 по 21.05.2017. В рассматриваемый период в течение трёх дней было ясно, в остальные дни – пасмурно. Эксперимент проводился в один из солнечных дней. Первая пара модулей СБ была жестко смонтирована на специально ориентированной платформе, вторая – закреплена на рабочей платформе АДСТ. Суммарная мощность каждой пары составляла 400 Вт.

4. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные данные по выработке электрической мощности модулями СБ в условиях статики и динамики сведены в табл. 1.

Экспериментальные данные статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей
Table 1
Experimental data of statically and dynamically located solar modules

Время, ч	Облачность	I_w, A		U_w, B		P_{wPV}, Bt		P_{cts}, Bt	$\Delta P, \%$	
		Стат.	Динам.	Стат.	Динам.	Стат.	Динам.	Динам.	Стат.	Динам.
05:00	ясно	0,32	0,32	23,1	23,1	7,4	7,4	0	98,12	98,12
07:00	ясно	1,7	14,2	23,1	23,1	39,27	328,02	3,822	90,2	17,99
09:00	ясно	5,9	14,75	26,4	26,3	155,76	387,92	3,742	61,1	3,01
11:00	ясно	10,2	14,8	26,2	26,5	267,24	392,2	3,614	33,2	1,95
13:00	ясно	14,1	14,9	26,3	26,6	370,83	396,34	0,124	7,3	0,91
15:00	ясно	9,7	14,7	25,8	26,6	250,26	391,02	0,222	37,4	2,24
17:00	ясно	5,5	14,7	24,7	26,2	135,85	385,14	3,526	66	3,71
19:00	ясно	2,5	14,4	23,8	25,8	59,5	371,52	3,827	85,1	7,12
Итого								18,88	478,42	135,05

На основании экспериментальных данных были построены графические зависимости выработки электрической мощности модулями СБ от времени (рис. 4). Поскольку длительность эксперимента была ограничена во времени, чтобы узнать значения для остальных моментов времени применялась экстраполяция. Для экстраполяции и аппроксимации полученных

данных использовалась функция «линия тренда» в программе Microsoft Excel.

Судя по графику зависимости $P_{stat} = f(t)$ (см. рис. 4), мощность, вырабатываемая модулем СБ, не стабильна на протяжении всего времени работы. Это объясняется тем, что за весь цикл солнечной активности рабочая площадь СБ освещалась неравномерно. По мере увеличения угла с востока на запад и по



склонению по высоте солнца в геометрической прогрессии начинает возрастать значение силы тока. В 13:00 положение солнца практически соответствует идеальным значениям координат, когда основной поток солнечного излучения направлен к плоскости рабочей панели под углом примерно 90°. Это подтверждается экспериментальными значениями максимальной выходной мощности модуля СБ, которая составляет 370,83 Вт, при этом суммарные потери мощности равны 478,42 Вт. Потери мощности обусловлены, как правило, неточным облучением рабочей поверхности модуля СБ, неравномерным распределени-

ем солнечной инсоляции в течение суток и потерями электроэнергии в кабельных линиях. Далее, по мере изменения координаты перемещения солнца, увеличивается угол облучения модуля СБ, что влечет за собой последующее снижение силы тока в геометрической прогрессии. Для определения значения выходной мощности СБ в диапазоне времени с 19:00 до 20:12 был применен метод аппроксимирования с возможностью прогнозирования заданной функции. Как видно на графике, суточная выработка электроэнергии не равномерная, и, как следствие, рабочим диапазоном модуля СБ является время с 10:00 до 16:00.

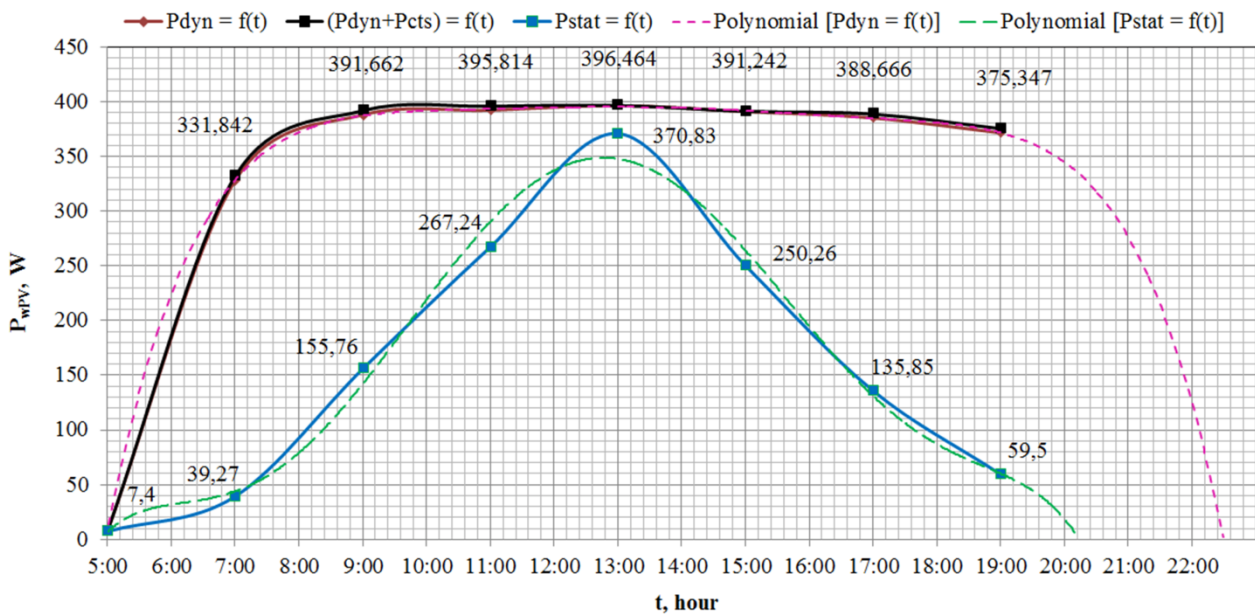


Рис. 4 – График зависимости выходной мощности статично и динамично расположенных модулей солнечных батарей от времени суток

Fig. 4 – Graph of output power of statically and dynamically located solar modules on the time of the day

Согласно графику зависимости $P_{dyn} = f(t)$ (см. рис. 4), на всем рабочем диапазоне времени вырабатываемая модулем СБ мощность распределена более равномерно. Задействуется весь энергопотенциал СБ, так как рабочая поверхность модуля СБ на протяжении всего цикла солнечной активности подвергается максимальному солнечному излучению. Функция $P_{dyn} = f(t)$ представляет собой зависимость выходной мощности динамично расположенного модуля солнечной батареи (за вычетом расхода энергии на систему ориентации) от времени суток, а графическая зависимость $(P_{dyn} + P_{cts}) = f(t)$ – наоборот, с учётом мощности, потребляемой системой управления и электроприводами АДСТ. Аппроксимация с возможностью прогнозирования функции $P_{dyn} = f(t)$ позволяет

установить характер генерирования электрической мощности СБ в диапазоне времени с 19:00 до 22:30.

Экспериментальное исследование работы АДСТ показало эффективность работы модуля СБ: так, среднее значение вырабатываемой мощности равно 332,445 Вт; суммарные потери (с учётом потерь на КНС) составляют 135,05 Вт. При сравнении значений работы модулей СБ в условиях статики и динамики за одни солнечные сутки можно отметить существенную эффективность работы АДСТ. С помощью системы АДСТ удалось сократить потери мощности почти в 4 раза и повысить производительность работы модуля СБ на 48,4 %.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные АСЭС о суточной генерации электроэнергии по датам: для фиксированных модулей СБ и модулей с АДСТ.

Таблица 2
Среднесуточная выработка электроэнергии автономной солнечной станцией по датам
Table 2
Average daily power generation by an autonomous solar station by days of the week

Дата	Облачность	I_{max}, A		U_{wp}, B		$W, Вт \cdot ч$	
		Стат.	Динам.	Стат.	Динам.	Стат.	Динам.
15.05.17	пасмурно	3,4	3,5	23,2	23,3	764,56	815,5
16.05.17	ясно	13,9	14,6	26,22	25,87	1 905,24	3 777,02
17.05.17	ясно	14	14,36	25,87	25,7	1 929,15	3 690,52
18.05.17	ясно	13,8	14,48	26,57	25,89	1 934,83	3 748,87
19.05.17	пасмурно	2,8	2,7	24,7	24,1	669,65	677,7
20.05.17	пасмурно	3,1	3,1	24,44	24,7	749,76	765,7
21.05.17	пасмурно	3,2	3,3	24,1	24,5	759,56	808,5
Итого						8 712,75	14 283,81

Для большей наглядности построен график зависимости выработанной электроэнергии АСЭС за сутки динамично и статично расположенными модулями СБ по датам (рис. 5).

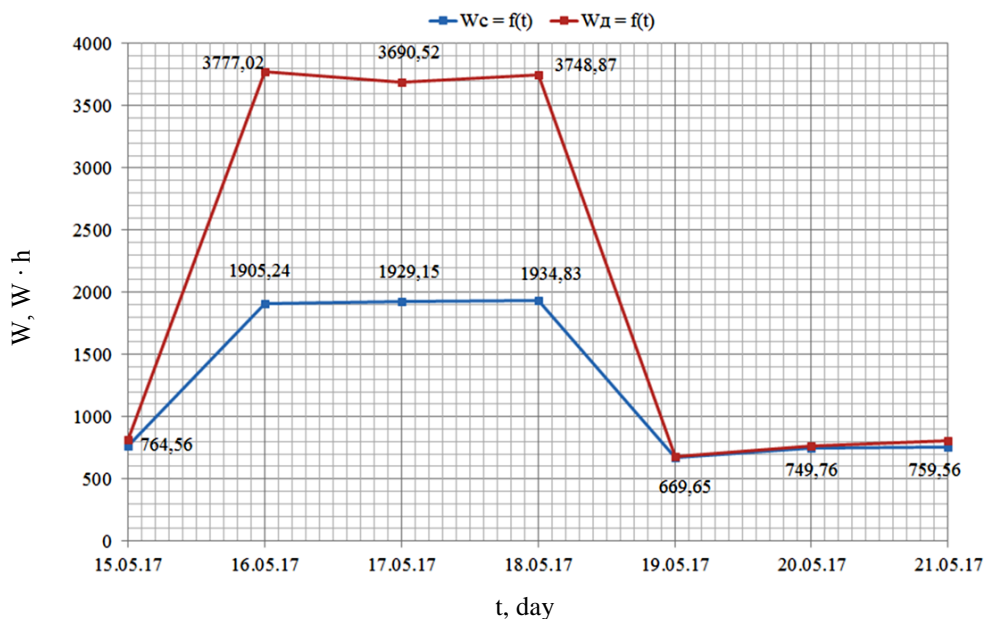


Рис. 5 – График зависимости среднесуточной электроэнергии, выработанной автономной солнечной станцией по датам при динамично и статично расположенных модулях солнечных батарей

Fig. 5 – Graph of the dependence of the average daily generated electricity of an autonomous solar station with dynamically and statically located solar modules by days of the week

Анализ выполненной работы показывает, что в солнечные дни эффективность АДСТ возрастает, и прирост генерации электроэнергии составляет более чем 50 %. В пасмурную погоду эффективность АДСТ незначительная, что связано с пассивным режимом работы системы слежения АДСТ. Следует отметить, что посуточные значения выработанной электроэнергии при использовании АДСТ в пасмурные периоды были выше, поскольку в эти дни кратковременно выходило солнце, и АДСТ успевал по-

зиционировать модули СБ под оптимальный угол и оптимизировать их работу.

5. Заключение

Разработана модернизированная структура автономной солнечной электростанции. Создана физическая модель АДСТ, которая позволяет проводить сбор и обработку экспериментальных данных.

Экспериментально подтверждена эффективность применения автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера. Согласно проведенным исследованиям, максимальный прирост мощности СЭС с использованием разработанного АДСТ составил 50 %. Выполнен анализ зависимости вырабатываемой мощности СЭС с применением АДСТ от времени суток.

Разработка имеет практическое применение, так как солнечная электростанция может стать основой для создания программно-аппаратного комплекса, формирующего статистические базы данных по выработке электроэнергии, что позволит провести технико-экономическое обоснование по строительству ФЭУ в конкретной географической точке.

Список литературы

[1] Аржанов, К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за Солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 / Аржанов Кирилл Владимирович; [Место защиты: Том. гос. ун-т систем упр. и радиотехники (ТУСУР) РАН]. – Томск, 2016. – 178 с.

[2] Аржанов, К.В. Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце [Текст] / К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 139–146.

[3] Аржанов, К.В. Фотоэлектрическая энергетическая установка с наведением на Солнце [Текст] / К.В. Аржанов // Энергетика России В XXI веке. Инновационное развитие и управление. – 2015. – С. 579–581.

[4] Петрусёв, А.С. Солнечная энергетика для энергоснабжения удалённых районов [Текст] / А. С. Петрусёв; науч. рук. Б. В. Лукутин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее : сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, г. Томск. 5-10 октября 2015 г.: в 3 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – С. 155–158.

[5] Петрусёв, А.С. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью одноосного трекера и акрилового концентратора [Текст] / Петрусёв А.С. // Современная техника и технологии. Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2014. – С. 37–38.

[6] Юрченко, А. В. Система слежения за Солнцем для солнечной энергоустановки [Текст] / А.В. Юрченко [и др.] // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений, 2010. – С. 210–221.

[7] Kitaeva, M. Efficiency of PV systems with solar trackers for Russian regions [Текст] / M. Kitaeva, A.Yurchenko // Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST) 2012. – 2012.

[8] Шиняков, Ю.А. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей [Текст] / Ю.А. Шиняков [и др.] // Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 8–9. – С. 12–18.

[9] Саврасов, Ф.В. Энергоэффективные системы электроснабжения с фотоэлектростанциями: автореф. дис. на соиск. учен. канд. техн. наук (05.09.03) / Саврасов Федор Витальевич; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – 21 с.

[10] Рахматулин, И.Р. Разработка комплексной энергоэффективной солнечной опреснительной установки с системой слежения за Солнцем: автореф. дис. на соиск. учен. канд. техн. наук (05.09.03) / Рахматулин Ильдар Рафикович; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2015. – 19 с.

[11] Рахматулин, И.Р. Система ориентации солнечных коллекторов [Текст] / И.Р. Рахматулин // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 247–255.

[12] Рахматулин, И.Р. Математическая модель солнечной опреснительной установки с устройством слежения за солнцем [Текст] / И.Р. Рахматулин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника – 2014. – № 1. – С. 110–115.

[13] ГОСТ Р 57229-2016 (МЭК 62817:2014). Системы фотоэлектрические. Устройства слежения за Солнцем. Технические условия. – Введ. 2017-09-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 67 с.

[14] Lee, K. Origami Solar-Tracking Concentrator Array for Planar Photovoltaics [Text] / K. Lee [et al.] // ACS Photonics – 2016. – Vol. 3. – No 11. – P. 2134–2140.

[15] Saranya Nair, M. A solar tracker assisted automatic irrigation system for agricultural fields [Text] / M. Saranya Nair, Karan Bhatia // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) – 2017. – Vol. 8. – No 10. – P. 279–287.

[16] Azizi, K. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing [Text] / K. Azizi, A. Ghaffari // International Journal of Photoenergy – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 754549. – 7 p.

[17] Gerek, Ö.N. Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region [Text] / Ö.N. Gerek, Ü.B. Filik // Anadolu university journal of science and technology a // Applied Sciences and Engineering – 2017. – Vol. 18. – No 1. – P. 209–217.

[18] Ozcelik, S. Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation [Text] / S. Ozcelik, H. Prakash, R. Chaloo // Procedia Computer Science – 2011. – Vol. 6 – P. 457–462.

[19] Abid, A.J. Arduino based blind solar tracking controller [Text] / A.J. Abid // International Journal of Open Information Technologies – 2017. – Vol. 5. – No. 10. – P. 24–29.



[20] Kassem, A. A microcontroller-Based Multi-Function Solar Tracking System [Text] / A. Kassem, M. Hammad // 2011 IEEE International Systems Conference. – 2011. – P. 13–16.

[21] Mousazadeh, H. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output [Text] / H. Mousazadeh [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2009. – P. 1800–1818.

[22] Wang, J.-M. Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System [Text] / J.-M. Wang, C.-L. Lu // Sensors – 2013. – Vol. 13. – Iss. 3 – P. 3157–3168.

[23] Magibalan S. Fabrication of dual axis solar tracking system [Text] / S. Magibalan [et al.] // International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research – 2018. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 1109–1113.

[24] Митрофанов, С.В. Методика расчета мощности автономной солнечной электростанции для нужд освещения лаборатории энергосбережения и энергоэффективности [Текст] / С.В. Митрофанов, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет – 2017. – С. 333–337.

[25] Немальцев, А.Ю. Описание и принцип работы автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера [Текст] / А.Ю. Немальцев, С.В. Митрофанов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции. – 2016. – С. 12–14.

[26] Митрофанов, С.В. Разработка системы управления солнечным трекером на основе микроконтроллера Arduino [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 470–473.

[27] Митрофанов, С.В. Использование микроконтроллеров в системе управления солнечным трекером [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко, А.Ю. Немальцев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 345–347.

[28] Митрофанов, С.В. Переносная солнечная электростанция с автономной системой слежения за солнцем [Текст] / С.В. Митрофанов, А.Ю. Немальцев // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды VII Всероссийской научно-технической конференции. Материалы сборника опубликованы в авторской редакции. – 2014. – С. 40–44.

[29] Митрофанов С.В. Система безопасности солнечной электростанции от порывов ветра [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко // Университетский комплекс как региональный центр образова-

ния, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 466–469.

[30] Митрофанов С.В. Потехенченко А.В. Метод защиты солнечной электростанции от накопления снега и льда [Текст] / С.В. Митрофанов, А.В. Потехенченко // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2017. – С. 462–465.

References

[1] Arzhanov K.V. An automated discrete-continuous sun-tracking system of autonomous photovoltaic power plants with stepper motors (Avtomatizirovannaya sistema nepreryvno-diskretnogo slezheniya za Solntsem avtonomnykh fotoelektricheskikh energoustanovok s ispol'zovaniem shagovykh dvigatelei): Ph.D. diss (engineering). Tomsk, 2016, 178 p. (in Russ.).

[2] Arzhanov K.V. Dual-axis solar tracking system (Dvukhkoordinatnaya sistema navedeniya solnechnykh batarei na Solntse), *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014;324(4):139–146 (in Russ.).

[3] Arzhanov K.V. Sun Tracking Photovoltaic Systems (Fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka s navedeniem na Solntse), *Energetika Rossii V XXI veke. Innovatsionnoe razvitiye i upravleniye*, 2015:579–581 (in Russ.).

[4] Petrusev A.S. Solar energy for power supply in remote regions (Solnechnaya energetika dlya energosnabzheniya udalennykh raionov), *Resursoeffektivnyye sistemy v upravlenii i kontrole: vzglyad v budushchee*, 2015;1:155–158 (in Russ.).

[5] Petrusev A.S. Increasing the energy efficiency of solar batteries of using single-axis solar tracker and acrylic concentrator (Povysheniye effektivnosti solnechnykh batarei s pomoshch'yu odnoosnogo trekera i akrilovogo kontsentratora), *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii*, 2014:37–38 (in Russ.).

[6] Yurchenko A.V. A solar tracking system installed with photovoltaic installation (Sistema slezheniya za Solntsem dlya solnechnoi energoustanovki), *Resursoeffektivnyye tekhnologii dlya budushchikh pokolenii*, 2010:210–221 (in Russ.).

[7] Kitaeva M., Yurchenko A. Efficiency of PV systems with solar trackers for Russian regions. *Proceedings – 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST–2012)*, 2012;2:103–106 (in Eng.).

[8] Shinyakov Y.A., Otto A.I., Osipov A.V., Chernaya M.M. Optimizing peak-holding controller solar battery autonomous energy installation. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)* 2015;(8–9):12–18. (In Russ.).

[9] Savrasov F.V. Energy-efficient power supply systems with photovoltaic power plants (Energoeffektivnyye sistemy elektrosnabzheniya s fotoelektrostantsiyami): theses of Ph.D. diss. (engineering). Tomsk, 2013, 21 p. (In Russ.).



[10] Rakhmatulin I.R. Design complex energy-efficient solar-powered desalination plant with solar tracking system (Razrabotka kompleksnoi energoeffektivnoi solnechnoi opresnitel'noi ustanovki s sistemoi slezheniya za Solntsem) : theses of Ph.D. diss. (engineering). Chelyabinsk, 2015, 19 p. (in Russ.).

[11] Rakhmatulin I.R. System for orienting solar thermal collector (Sistema orientatsii solnechnykh kollektorov), *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012;20:247–255 (in Russ.).

[12] Rakhmatulin I.R. Mathematical model of solar-powered desalination plant with solar tracking system (Matematicheskaya model' solnechnoi opresnitel'noi ustanovki s ustroystvom slezheniya za solntsem), *Bulletin of the South Ural State University*, 2014;1:110–115 (in Russ.).

[13] State Standart R 57229-2016 (IEC 62817:2014). Photovoltaic system. Solar tracking system. Technical specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 67 p. (in Russ.).

[14] Lee K., Chien C.-W., Lee B., Lamourex A., Shlian M., Shtein M., Ku P.C., Forrest S. Origami Solar-Tracking Concentrator Array for Planar Photovoltaics. *ACS Photonics*, 2016; 3(11):2134–2140 (in Eng.).

[15] Saranya Nair M., Bhatia K. A solar tracker assisted automatic irrigation system for agricultural fields. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2017;8(10):279–287 (in Eng.).

[16] Azizi K., Ghaffari A. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing. *International Journal of Photoenergy*, 2013;2013:1–7 (in Eng.).

[17] Gerek Ö.N., Filik Ü.B. Efficiency analysis of the solar tracking PV systems in Eskişehir region. *Anadolu university journal of science and technology A – Applied Sciences and Engineering*, 2017;18(1):209–217 (in Eng.).

[18] Ozcelik S., Prakash H., Chaloo R. Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation. *Procedia Computer Science*, 2011;6:457–462 (in Eng.).

[19] Abid A.J. Arduino based blind solar tracking controller. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017;5(10):24–29 (in Eng.).

[20] Kassem A., Hammad M. A microcontroller-Based Multi-Function Solar Tracking System. *2011 IEEE International Systems Conference*, 2011:13–16 (in Eng.).

[21] Mousazadeh H., Keyhani A., Javadi A., Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009:1800–1818 (in Eng.).

[22] Wang J.-M., Lu C.-L. Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System. *Sensors*, 2013;13(3):3157–3168 (in Eng.).

[23] Magibalan S., Saravanan M., Sathees kumar G., Sathish, C. Saravanan G. Fabrication of dual axis

solar tracking system. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2018;5(3):1109–1113 (in Eng.).

[24] Mitrofanov S.V., Nemaľtsev A.Yu. Method of calculating the power of autonomous solar power plants for lighting load of laboratory of energy-saving and energy efficiency (Metodika rascheta moshchnosti avtonomnoi solnechnoi elektrostantsii dlya nuzhd osveshcheniya laboratorii energosberezheniya i energoeffektivnosti), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:333–337 (in Russ.).

[25] Nemaľtsev A.Yu., Mitrofanov S.V. Description of the dual-axis solar tracker working principle (Opisanie i printsip raboty avtomatizirovannogo dvukhkoordinatnogo solnechnogo trekera), *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy : Trudy VIII Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, 2016:12–14 (in Russ.).

[26] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V., Nemaľtsev A.Yu. Development of the control system of a solar tracker based on the Arduino microcontroller (Razrabotka sistemy upravleniya solnechnym trekerom na osnove mikrokontrollera Arduino), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:470–473 (in Russ.).

[27] Mitrofanov S.V., Nemaľtsev A.Yu. Using microcontrollers in a solar tracking control system (Ispol'zovanie mikrokontrollerov v sisteme upravleniya solnechnym trekerom), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:345–347 (in Russ.).

[28] Nemaľtsev A.Yu., Mitrofanov S.V. Portable solar power plant with autonomous solar tracking system (Perenosnaya solnechnaya elektrostantsiya s avtonomnoi sistemoi slezheniya za solntsem), *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: Trudy VII Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, 2014:40–44 (in Russ.).

[29] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V. Wind protection for solar power plant (Sistema bezopasnosti solnechnoi elektrostantsii ot poryvov vetra), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:466–469 (in Russ.).

[30] Mitrofanov S.V., Potekhenchenko A.V. Method of protection of solar power station against accumulation of snow and ice (Metod zashchity solnechnoi elektrostantsii ot nakopleniya snega i l'da), *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*, 2017:462–465 (in Russ.).

Транслитерация по BSI



ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ПАССИВНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ*

Р.А. Шепс, П.А. Головинский, Т.В. Щукина, С.А. Яременко

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ)
д. 14, Московский пр-т, Воронеж, 394026, Россия
тел.: +7(960)131-66-01; e-mail: romansheps@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.055-062

Заключение совета рецензентов: 18.10.17 Заключение совета экспертов: 07.12.17 Принято к публикации: 31.01.18

Рассматривался вопрос о том, как при объективных финансовых ограничениях на этапах строительства и монтажа инженерных систем повысить энергоэффективность и экологическую безопасность зданий и сооружений за счёт малозатратного способа утилизации солнечной радиации, предполагающего пассивное преобразование в тепловую энергию в наружных ограждающих конструкциях. Несмотря на экономическую целесообразность таких систем отопления, ввиду низких показателей КПД по сравнению с активными гелиоустановками складывается мнение о возможности их использования только в тех климатических условиях, которые характеризуются мягким отопительным периодом. В этой связи анализировались известные и разрабатываемые строительные светопрозрачные, поглощающие, аккумулирующие и изолирующие материалы, наряду с возможностями по созданию multifunctional наружных ограждений, которые могут расширить географию использования пассивных систем.

Для решения вопросов эффективной утилизации солнечного излучения фасадно-интегрированными панелями изучались нестационарные тепловые процессы, возникающие в многослойных наружных ограждениях зданий. Как показал анализ математических методов, для описания суточных изменений температуры в толще строительных конструкций следует применять теорию тепловых волн. Принцип суперпозиции температурных возмущений позволил выполнить расчет переноса тепла в многослойных наружных ограждениях. Для сравнительной оценки влияния солнечной радиации в климатических условиях Воронежской области (52 ° с.ш.) на двухслойную конструкцию и четырехслойную, состоящую из стеклопакета, воздушной прослойки, железобетона, воздушной прослойки, утеплителя и защищенную с внешней стороны стеклопакетом, выполнены расчеты. В январе при температуре наиболее холодной пятидневки –24 °С среднесуточные потери теплоты через площадь поверхности 1 м² двухслойной наружной стены составляют 6 Вт/м², а при тех же погодных условиях четырехслойная солнечная панель в среднем отдает в обогреваемое помещение 36,3 Вт/м², при этом максимальные значения теплового потока достигаются за 18 часов. Расчетные данные подтвердили целесообразность применения пассивных солнечных панелей при низких температурах холодного периода года, а учитывая незначительные затраты на обустройство по сравнению с активными гелиосистемами и существующие тенденции фасадного остекления, был сделан вывод о необходимости использования этих панелей для повышения энергоэффективности зданий.

Ключевые слова: энергосбережение; солнечная энергия; энергоэффективность; пассивные солнечные панели; энергоактивные ограждающие конструкции; тепловой поток.

HEAT FLUX IN A PASSIVE MULTI-LAYERED SOLAR PANEL

R.A. Sheps, P.A. Golovinsky, T.V. Shchukina, S.A. Yaremenko

Voronezh State Technical University
14 Moscow Ave., Voronezh, 394026, Russia
tel.: +7 (960) 131 66 01; e-mail: romansheps@yandex.ru

* Шепс Р.А., Головинский П.А., Щукина Т.В., Яременко С.А. Тепловые потоки в пассивной многослойной солнечной панели // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):55-62.

The paper deals with the question concerning the increase in buildings and structures energy efficiency and environmental safety at the construction and installation of engineering systems with financial constraints. We suggest solving this problem with low-cost method of solar radiation utilization which implies the passive thermal energy transformation into external fencing structures. In spite of the economic expedience of such heating systems, there is an opinion that they are suitable only for climatic conditions characterized by a mild heating period due to low efficiency indicators in comparison with the active solar power plant. As regards this, the paper analyzes the well-known and new building translucent, absorbing, accumulating and insulating materials along with the possibilities to create the multifunctional external fences that can expand the geography of the use of passive systems.

We have studied the nonstationary thermal processes arising in multilayer external fences of buildings in order to solve the problems of effective solar radiation utilization by facade integrated panels. The analysis of mathematical methods has shown that theory of thermal waves should be used to describe the diurnal temperature changes inside building structures. The principle of temperature frequency superposition principle has made it possible to calculate the heat transfer in multilayer external panes. In Voronezh region climatic conditions (52°), we have evaluated the solar radiation effect on a two-layer and a four-layer structure consisting of a glass unit, an air layer, reinforced concrete and heater, protected from the outside by double-glass unit. In January at temperature -24°C of the coldest five-day period, the average daily heat losses through the surface area of 1 m^2 of the two-layer outer wall are 6 W / m^2 , and under the same weather conditions an average heat flux through the surface area of 1 m^2 of the four-layer solar panel is of 36.3 W / m^2 ; the maximum values of the heat flux are achieved in 18 hours. The presented data confirm the expedience of passive solar panels use in case of low temperatures during the cold period of a year. Moreover, considering the facade glazing trends and low cost of the passive solar panels in contrast with the active solar systems, we concluded that they should be used for increase in energy efficient of buildings.

Keywords: energy saving; solar energy; energy efficiency; passive solar panels; energy-efficient enclosing structures; heat flux.



Роман Александрович Шепс
Roman Sheps

Сведения об авторе: ассистент кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет.

Образование: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет («Теплогоснабжение и вентиляция») (2010 г.).

Область научных интересов: энергосбережение; энергоэффективность; альтернативные источники энергии; отопление; вентиляция; строительная теплофизика.

Публикации: 13.
h-index: 2.

Information about the author: Assistant at the Department of Housing and Communal Services, Voronezh State Technical University.

Education: Voronezh State University of Architecture and Construction (Heat And Ventilation), 2010.

Research interests: energy saving; energy efficiency; alternative energy sources; heating; ventilation; building thermal physics.

Publications: 13.



Павел Абрамович Головинский
Pavel Golovinsky

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры инноватики и строительной физики, Воронежский государственный технический университет; преподавал в университете им. Лавала (Квебек, Канада), Лаборатории атомной и молекулярной физики им. Эмми Коттон (Орсэ, Франция) и др.

Образование: Воронежский государственный университет по специальности физика (1977 г.).

Область научных интересов: теоретическая физика; оптика; математические модели сложных систем; строительные технологии.

Публикации: 290.
h-index: 8

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Innovation and Building Physics, Voronezh State Technical University; worked as a Visiting Professor at the University Laval (Quebec, Canada), Laboratory of Atomic and Molecular Physics Emmy Cotton (Orsay, France) etc.

Education: Voronezh State University with a degree in Physics, 1977.

Research interests: theoretical physics; optics; mathematical models of complex systems; construction technologies.

Publications: 290.



Сергей Анатольевич
Яременко
Sergey Yaremenko

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет.

Образование: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет («Теплогазоснабжение и вентиляция») (2005 г.).

Область научных интересов: теоретическая и прикладная теплофизика; акустика; моделирование строительных систем; техносферная безопасность; системы обеспечения микроклимата.

Публикации: 59.
h-index: 6

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Housing and Communal Services, Voronezh State Technical University.

Education: Voronezh State University of Architecture and Construction (Heat and Ventilation), 2005.

Research interests: theoretical and applied physics; acoustics modeling; building systems; technosphere safety; microclimate systems.

Publications: 59.



Татьяна Васильевна
Шукина
Tatyana Shchukina

Сведения об авторе: канд. техн. наук, профессор кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет.

Образование: Воронежский инженерно-строительный институт по специальности («Теплогазоснабжение и вентиляция») (1986 г.).

Область научных интересов: утилизация солнечной энергии; производство биогаза; экология урбанизированных территорий.

Публикации: 200.
h-index: 6.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Professor, Voronezh State Technical University, Professor of the Department of Housing and Communal Services.

Education: Voronezh Civil Engineering Institute (Heat and Ventilation), 1986.

Research interests: utilization of solar energy; biogas production; ecology of the urbanized territories.

Publications: 200.

1. Введение

Действующее законодательство Российской Федерации в сфере энергосбережения создает благоприятные условия для применения альтернативных источников энергии. Одним из наиболее перспективных и повсеместно доступных возобновляемых ресурсов является солнечная радиация, поэтому основы гелиоэнергетики в настоящее время достаточно хорошо известны и опробованы на практике [1]. Однако инженерные расчеты и методики в основном используют стационарные тепловые режимы, что не всегда точно позволяет описать физические процессы. Например, при эксплуатации энергоэффективных зданий и сооружений происходят суточные колебания температуры наружного воздуха и потока солнечной энергии, поэтому перенос тепла в ограждающих конструкциях не является стационарным. В целом проблема переноса тепла в сложных конструкциях исключительно важна при принятии инженерных решений, в том числе, для так называемых солнечных фасадов, в которых определенным образом организовано пропускание, отражение, поглощение, аккумулирование и передача солнечного тепла внутрь здания [2, 3].

Снижение энергопотребления является устойчивой тенденцией для жилых и коммерческих зданий и может быть обеспечено путем утилизации и сохранения тепловой энергии в различных накопителях (вода, строительные материалы и т.д.). Применение

интегрируемых в наружные стены систем данного класса с воздушной прослойкой и внешним остеклением возможно при вентилируемых и невентилируемых фасадах [4]. Кроме того, среди имеющихся решений следует выделить гипсово-бетонные панели с воздушными пустотами [5]. Зависимость тепловых потоков от времени для таких многослойных конструкций вполне успешно определяется экспериментально [6], в то время как их теоретическое описание не вполне удовлетворяет практике.

В предлагаемой авторами данной статьи пассивной системе утилизации солнечной энергии предполагается наличие четырех слоев: утеплитель, слой воздуха, бетон, слой воздуха [7], – с внешней стороны защищенных прозрачным для солнечного излучения стеклопакетом. Задачу теплопередачи в такой конструкции необходимо решать с учетом периодического изменения в течение суток наружной температуры и теплового потока, который поглощается главным образом на границе раздела внешней воздушной прослойки с ограждающей конструкцией. В качестве общего подхода к решению нестационарных задач теплопроводности взят метод наложения температурных полей [8], который впервые позволил получить распределение температуры и тепловых потоков для многослойных ограждений с учетом не только конвективного теплообмена, но и поглощения солнечного излучения на внешней поверхности аккумулирующего слоя. Расчетное прогнозирование утилизируемой солнечной радиации, выполняемое



по предлагаемому алгоритму, может иметь большее ее извлечение, если конструкцию солнечной панели

модифицировать в соответствии с предложенным техническим решением [9].

Список обозначений	
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
a, b	Постоянные коэффициенты
c	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)
i	Мнимая единица комплексного числа
K	Коэффициент теплообмена лучистой энергией
q	Плотность, Вт/м ²
T	Температура, °C
$u(x)$	Пространственная часть тепловой волны
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Коэффициент теплоотдачи
β	Коэффициент затухания
γ	Введенный параметр
λ	Теплопроводность среды
ρ	Объемная плотность
ω	Частота теплового возмущения
<u>Индексы нижние</u>	
ext	Окружающая среда

2. Основные уравнения температурных волн

Одномерное распространение тепла в плоском слое теплопроводящей среды описывается уравнением теплопроводности [10]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность среды; c – удельная теплоемкость; ρ – объемная плотность. Уравнение (1) сопровождается начальными и граничными условиями, задающими, в свою очередь, условия теплообмена с окружающей средой или соседними слоями вещества [8]. На стыке слоев ($x = 0$) выполняется условие теплового контакта, то есть равенства температур и равенства тепловых потоков:

$$T|_{x=0} = T|_{x=+0}, \quad (2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + K(T_{ext}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0} + q(t), \quad (3)$$

где учтено, что на границе материалов внутри конструкции поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью $q(t)$, вызванный солнечным излучением; K – коэффициент теплообмена лучистой энергией; $T_{ext}(t)$ – температура окружающей среды. Теплообмен на поверхности ограждения учитывается с помощью следующего граничного условия:

$$\alpha(T_{ext}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (4)$$

При этом $T_{ext}(t)$ может быть температурой наружного воздуха для внешней границы конструкции или постоянной температурой внутри помещения T_0 .

Следствием линейности уравнения теплопроводности и линейных граничных условий является принцип суперпозиции температурных возмущений [8], который позволяет представить исходную задачу в виде совокупности двух более простых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях; вторая – квазистационарной и описывает установившиеся колебательные режимы с учетом периодически меняющейся со временем температуры наружного воздуха $T_{ext}(t) = T_{ext} + \Delta T \cos(\omega t)$ и потока излучения, поглощаемого внутри конструкции на границе раздела сред $q(t) = q_0(1 + \cos(\omega t))$. Квазистационарный режим в слое толщиной l устанавливается спустя некоторое время t , определяемое коэффициентом Фурье $Fo = \lambda t / (c\rho l^2) \sim 1$, за которое начальное температурное распределение переходит в стационарное.

3. Расчет переноса тепла в многослойной конструкции

Стационарная часть расчета с учетом перепада температур внутри и снаружи панели и постоянного потока тепла на внутренней границе слоев решается с учетом кусочной линейности. Полное решение находится в виде совокупности линейных функций $T_k = a_k x + b_k$. После подстановки этих решений в граничные условия получаем систему линейных уравнений для определения постоянных коэффициентов a_k, b_k .



Для решения нестационарной части задачи необходимо перейти к комплексному представлению [10] и найти решение в виде комплексной функции:

$$T(x, t) = u(x)e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где $u(x)$ – пространственная часть тепловой волны; ω – частота теплового возмущения. Для удобства описания температурных волн введем коэффициент затухания $\beta = \sqrt{\frac{\omega c p}{2\lambda}}$. Пространственная часть решения в каждой области $k = 1, 2, \dots$ будет иметь вид:

$$u_k(x) = A_k \exp -\gamma_k x + B_k \exp \gamma_k x, \quad (6)$$

где $\gamma_k = \beta_k + i\beta_k$. После подстановки граничных условий возникает линейная система уравнений, которая решается численно. В окончательном решении нужно перейти к действительной форме, взяв действительную часть полученной зависимости.

Для сравнения тепловой эффективности произведен расчет четырехслойной пассивной солнечной панели (минеральная вата толщиной 100 мм; воздушный зазор 10 мм; железобетон 100 мм; воздушная прослойка 10 мм; и отдельно стеклопакет 30 мм, ограждающий от воздействия внешних негативных факторов и солнечной радиации на поверхность аккумулирующего слоя) и двухслойной ограждающей конструкции из пеноблока толщиной 300 мм, облицованного снаружи кирпичом толщиной 100 мм. Схемы конструкций показаны на рис. 1.

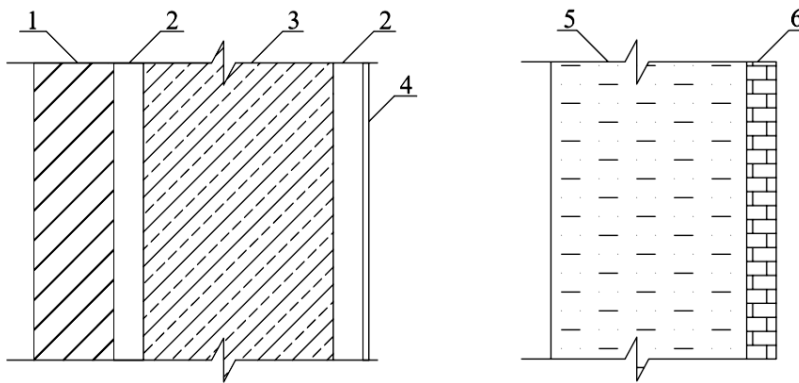


Рис. 1 – Схема четырехслойной пассивной солнечной панели (слева) и двухслойной утепленной наружной стены (справа): 1 – минеральная вата; 2 – воздушная прослойка; 3 – железобетон; 4 – стекло; 5 – пеноблок; 6 – облицовочный кирпич
Fig. 1 – Diagram of the four-layer passive solar panels (left) and double-layered insulated external walls (right): 1 – mineral wool; 2 – air layer; 3 – reinforced concrete; 4 – glass; 5 – foam block; 6 – facing brick

Теплофизические параметры для расчетов взяты из [11, 12]. На рис. 2 приведены результаты расчета температурных колебаний для двухслойной и четырехслойной конструкций в наиболее холодные дни января

в условиях Воронежской области при средней температуре $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и амплитуде температурных колебаний $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время отсчитывается от астрономического полудня, когда поток солнечной энергии максимален.

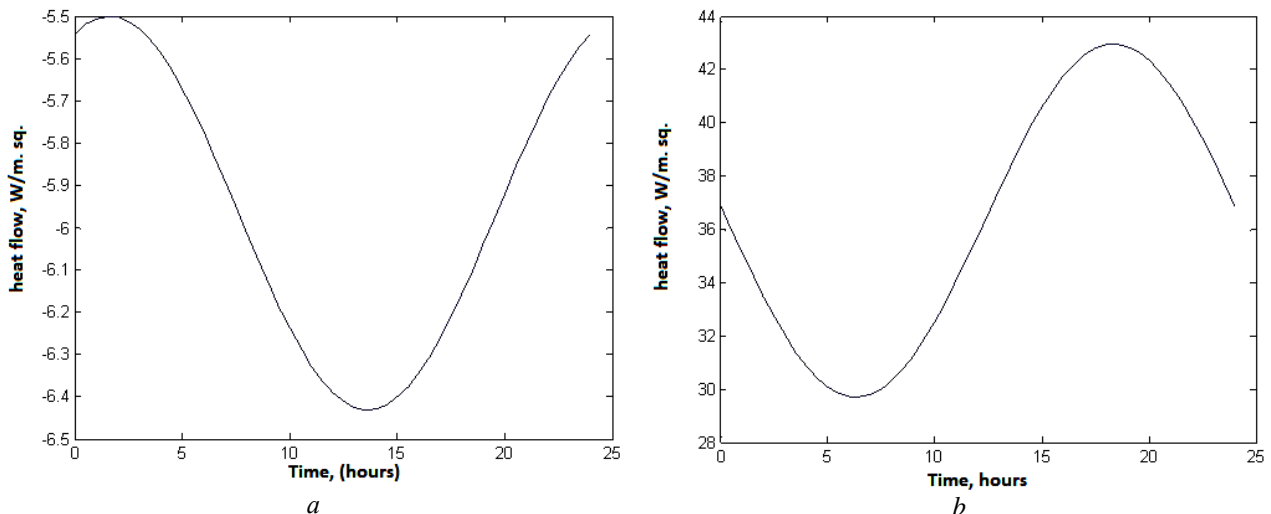


Рис. 2 – Тепловые потери на внутренней поверхности двухслойной (а) и четырехслойной (b) панели в зависимости от времени

Fig. 2 – The heat loss on the inner surface of the bilayer (a) and four layer (b) of the panel depending on time

Расчёты показали, что потери среднего теплового потока для двухслойной конструкции составляют

6 Вт/м². Средний тепловой поток для четырехслойной панели в типичных условиях января достигает

36,3 Вт/м². Если полностью исключить инсоляцию, то тепловой поток сменяется тепловыми потерями – 9,7 Вт/м².

4. Заключение

Моделирование тепловых режимов, необходимое для оценки возможностей пассивной утилизации солнечного излучения, для многослойных ограждений с интегрированными светопоглощающими панелями следует сводить к совокупности двух квазистационарных и двух стационарных задач. При этом решение стационарных задач описывается кусочно линейными зависимостями, коэффициенты которых определяются на основе граничных условий, а квазистационарных – суперпозициями тепловых волн. Коэффициенты, определяющие амплитуды и фазы колебаний в каждом слое, находятся путём введения комплексных переменных и последующего решения системы линейных алгебраических уравнений, задаваемых граничными условиями.

Предлагаемый метод допускает простое обобщение произвольного количества строительных материалов в наружном ограждении, что позволяет рассчитывать тепловые режимы в многослойных системах и выбирать для них оптимальные параметры в зависимости от действительной внешней энергооблученности. Это подтверждается результатами, которые были получены для четырехслойной светопоглощающей панели при условиях эксплуатации, соответствующих климатической зоне Воронежской области. Следует отметить, что в самый холодный месяц отопительного периода при температуре наружного воздуха, соответствующей наиболее холодной пятидневке, среднесуточное теплопоступление в помещение через 1 м² поверхности ограждения, поглощающего солнечное излучение, в среднем составляет 36,3 Вт/м².

Список литературы

[1] Даффни, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики [Текст] / Дж. Даффни, У. Бекман. – Долгопрудный, Изд. Дом. «Интеллект», 2013. – 888 с.

[2] Петров, В.М. Оценка поступления солнечной энергии на поверхности активных фасадно-интегрированных систем энергоснабжения [Текст] / В.М. Петров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – Т. 11. – С. 85–91.

[3] Quesada, G. A comprehensive review of solar facades [Text] / G. Quesada [et al.] // *Transparent and translucent solar facades. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16. – No 5. – P. 2643–2651.

[4] Navarro, L. Thermal energy storage in building integrated thermal systems [Text] / L. Navarro [et al.] // *A review. Part. 2. Integration as passive system*. – *Renewable Energy*. – 2015. – Vol. 30. – P. 1–23.

[5] Zhou, Ao Thermal insulating concrete wall panel design for sustainable built environment [Text] / Ao Zhou [et al.] // *The Scientific World Journal*. – 2014. – Vol. 12. – ID 279592.

[6] Skujans, J. Measurement of heat transfer of multy-layered wall construction with foam gypsum Appl [Text] / J. Skujans [et al.] // *Thermal Eng.* – 2007. – Vol. 27. – 1219–1224.

[7] Shchukina, T.V. Passive solar heating: how to control heating regime [Text] / T.V. Shchukina [et al.] // *Int. J. of Environmental and Science Education*. – 2016. – Vol. 11. – No 18. – P. 11361–11373.

[8] Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

[9] Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский – М.: МГУ, 1999. – 798 с.

[10] Харкевич, А.А. Спектры и анализ [Текст] / А.А. Харкевич. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 240 с.

[11] СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Свод правил. – Введ 2013-07-01 - М.: Министерство регионального развития РФ, 2012. – 95 с.

[12] Борискина, И. В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий / Борискина, И. В. [и др.] - М.: Издательство АСВ, 2003. – 320 с.

[13] Щукина, Т.В. Исследование эффективности энергоактивных ограждений для пассивного солнечного отопления [Текст] / Т.В. Щукина, Д.М. Чудинов // *Промышленная энергетика*. – 2007. – № 8 – С. 52–54.

[14] Акулова, И.И. Прогнозирование динамики и структуры жилищного строительства в регионе [Текст] / И.И. Акулова; Федеральное агентство по образованию, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. Воронеж, 2007 – 132 с.

[15] Щукина, Т.В. Солнечное теплоснабжение зданий и сооружений [Текст] / Т.В. Щукина. – Воронеж: ВГАСУ – 2007. – 121 с.

[16] Турулов, В.А. Гелиоактивные стены зданий [Текст] / В.А. Турулов. – М.: Издательство АСВ, 2011 – 168 с.

[17] Щукина, Т.В. Поглощающая способность наружных ограждений зданий для пассивного использования солнечного излучения [Текст] / Т.В. Щукина // *Промышленное и гражданское строительство*, 2012. – № 9. – С. 66–68.

[18] Щукина, Т.В. Пассивное использование солнечной энергии для энергосберегающей эксплуатации зданий [Текст] / Т.В. Щукина, Алахмди Крар Кассим // *Материалы за VIII международна научна практична конференция «Ключови въпроси в съвременната наука» 17–25 април 2012 г.* – Том 29: Математика. Здание и архитектура. – София.: «Бял ГРАД-БГ» ООД. 2012 – С. 53–59.

[19] Пат. 2604119 РФ, МКИ F24J 2/24, F24J 2/34, F24J 2/14, F24J 2/16. Солнечный тепловой коллектор / Щукина Т.В., Полосин И.И., Шепс Р.А., Караваева Я.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Во-



ронезский государственный архитектурно-строительный университет», № 2015106253; заявлено 24.02.2015; опубл. 10.09.2016.; Бюл. №25. – 8 с.

[20] Turchin, N. Nonstationary axisymmetric temperature field in a two-layer slab under mixed heating conditions [Text] / N. Turchin // *J. of Eng. Phys. and Thermophysics*. – 2015. – Vol. 88. – No 5. – P. 1135–1144.

[21] Морс, Ф.М. Методы теоретической физики [Текст] / Ф.М. Морс, Г. Фешбах. – М.: ИИЛ, 1960. – Т. 2.

[22] Мэтьюз, Дж. Численные методы. Использование MATLAB [Текст] / Дж. Мэтьюз, К.Д. Финк. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2001. – 720 с.

[23] Takhar, H.S. Effects of non-uniform wall temperature and mass transfer infinite section of an inclined plate on the MDH natural convection flow in a temperature stratified high-porosity medium [Text] / H.S. Takhar [et al.] // *Int. J. Therm. Sc.* – 2003. – Vol. 42. – P. 829–836.

[24] Aksenov, B. Mathematical modeling of temperature field of multilayer enclosure structures [Text] / B. Aksenov [et al.] // *MATEC Web of Conference*. – 2016. – Vol. 73. – P. 02023.

[25] Aliawdin, P. Theoretical and experimental analysis of heat transfer in the layers of road pavement [Text] / P. Aliawdin [et al.] // *Civil and Environmental Engineering Reports*. – 2005. – Vol. 1. – P. 7–18.

[26] Nguyen, C.H. Multifunctional thermal barrier coating in aerospace sandwich panels [Text] / C.H. Nguyen [et al.] // *Mechanics Research Communications*. – 2012. – Vol. 32. – P. 35043.

[27] Кошляков, Н.С. Основные дифференциальные уравнения математической физики [Текст] / Н.С. Кошляков [и др.]. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 767 с.

[28] Деч, Г. Руководство к практическому преобразованию Лапласа [Текст] / Г. Деч. – М.: Наука, 1965. – 287 с.

[29] Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел [Текст] / Г. Карслоу, Д. Эгер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

[30] Fu, J.W. Non-Fourier heat conduction in sandwich panel with a cracked foam [Text] / J.W. Fu [et al.] // *Int. J. Therm. Sciences*. – 2016. – Vol. 102. – P. 263–273.

References

[1] Daffni Dzh., Bekman U. The basics of solar power system (Osnovy solnechnoi teploenergetiki). Dolgoprudnyi, Izd. Dom. "Intellect", 2013 (in Russ.).

[2] Petrov V.M. Estimation of solar energy input on the surface of active facade integrated power supply systems (Otsenka postupleniya solnechnoi energii na poverkhnosti aktivnykh fasadno-integrirovannykh sistem energosnabzheniya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;11:8591 (in Russ.).

[3] Quesada G. Rousse D., Dutil Y., Balache M., Hallé S. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012;16(5): 2643–2651.

[4] Navarro L., De Grasia A., Niall D., Castell A., Browne M., McCormack S.J., Griffiths P., Gabeza L.F. Thermal energy storage in building integrated thermal systems. A review: Part. 2. Integration as passive system. *Renewable Energy*, 2015;30:1–23.

[5] Zhou Ao, Wong K.-W., Lau D. Thermal insulating concrete wall panel design for sustainable built environment. *The Scientific World Journal*, 2014; 12:ID 279592.

[6] Skujans J., Vulans A., Iljins U., Aboltins A. Measurement of heat transfer of multy-layered wall construction with foam gypsum *Appl. Thermal Eng.*, 2007;27:1219–1224.

[7] Shchukina T.V., Sheps R.A., Kuznetsova N.V. Passive solar heating: how to control heating regime. *Int. J. of Environmental and Science Education*, 2016;11(18):11361–11373.

[8] Bogoslovskii V.N. Building thermal physics (Stroitel'naya teplofizika). Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982 (in Russ.).

[9] Tikhonov A.N., Samarskii A.A. Equations of mathematical physics (Uravneniya matematicheskoi fiziki). Moscow, MGU, 1999 (in Russ.).

[10] Kharkevich A.A. Spectra and analysis (Spektry i analiz). Moscow, Izd-vo LKI, 2007 (in Russ.).

[11] SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings (Teplovaya zashchita zdaniy. Svod pravil. – Vved 2013-07-01). Moscow, Ministerstvo regional'nogo razvitiya RF, 2012 (in Russ.).

[12] Boriskina I.V., Plotnikov A.A., Zakharov A.V. Design of modern window systems of civil buildings Proektirovanie sovremennykh okonnykh sistem grazhdanskikh zdaniy. Moscow, Izdatel'stvo ASV Publ., 2003 (in Russ.).

[13] Shchukina T.V., Chudinov D.M. Research of efficiency of power active protections for passive solar heating (Issledovanie effektivnosti energoaktivnykh ogradzhenii dlya passivnogo solnechnogo otopeniya). *Promyshlennaya energetika*, 2007;8:52–54 (in Russ.).

[14] Akulova I.I. Forecasting the dynamics and structure of housing construction in the region (Prognozirovanie dinamiki i struktury zhilishchnogo stroitel'stva v regione) / I.I. Akulova; Federal'noe agentstvo po obrazovaniyu, Voronezhskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet. Voronezh, 2007 (in Russ.).

[15] Shchukina T.V. Solar heat supply of buildings and structures (Solnechnoe teplosnabzhenie zdaniy i sooruzhenii). Voronezh: VGASU – 2007 (in Russ.).

[16] Turulov V.A. Solar active walls of buildings (Gelioaktivnye steny zdaniy). Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2011 (in Russ.).

[17] Shchukina T.V. Absorptive capacity of external building barriers for passive use of solar radiation (Pogloshchayushchaya sposobnost' naruzhnykh ogradzhenii zdaniy dlya passivnogo ispol'zovaniya solnechnogo izlucheniya). *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2012;(9):66–68 (in Russ.).



[18] Shchukina T.V. Passive use of solar energy for energy-saving operation of buildings (Passivnoe ispol'zovanie solnechnoi energii dlya energosberegayushchei ekspluatatsii zdaniy). Materialy za VIII mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya "Klyuchovi v"prosi v s"vremennata nauka", 17–25 April 2012. Vol. 29: Matematika. Zdanie i arkhitektura. – Sofiya.: „Byal GRAD-BG“ OOD, 2012, pp. 53–59 (in Russ.).

[19] Shchukina T.V., Polosin I.I., Sheps R.A., Karavaeva Ya.I. Solar heat collector (Solnechnyi teplovoi kollektor). Pat. 2604119 RF, MKI F24J 2/24, F24J 2/34, F24J 2/14, F24J 2/16. opubl. 10.09.2016.; Bul. 25 (in Russ.).

[20] Turchin N. Nonstationary axisymmetric temperature field in a two-layer slab under mixed heating conditions. *J. of Eng. Phys. and Thermophysics*, 2015;88(5): 1135–1144.

[21] Mors F.M., Feshbakh G. Methods of theoretical physics (Metody teoreticheskoi fiziki). Moscow, IIL, 1960. Vol. 2 (in Russ.).

[22] Met'yuz Dzh., Fink K.D. Numerical method. The use of MATLAB (Chislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB). Moscow, Izd. Dom "Vil'yams", 2001 (in Russ.).

[23] Takhar H.S., Chamkha A.J., Nath G. Effects of non-uniform wall temperature and mass transfer infinite section of an inclined plate on the MDH natural convec-

tion flow in a temperature stratified high-porosity medium. *Int. J. Therm. Sc.*, 2003;42:829–836.

[24] Aksenov B., Karyakina S., Stepanov O., Shapoval A., Bodrov M. Mathematical modeling of temperature field of multilayer enclosure structures. *MATEC Web of Conference*, 2016;73:02023.

[25] Aliawdin P., Marcinovski J., Wilk P. Theoretical and experimental analysis of heat transfer in the layers of road pavement. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2005;1:7–18.

[26] Nguyen C.H., Chandrashekhara K., Birman V. Multifunctional thermal barrier coating in aerospace sandwich panels. *Mechanics Research Communications*, 2012;32:35043.

[27] Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Basic differential equations of mathematical physics (Osnovnye differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki). Moscow, GIFML, 1962. (in Russ.).

[28] Dech G. Rukovodstvo k prakticheskomu preobrazovaniyu Laplasa. Moscow, Nauka Publ., 1965 (in Russ.).

[29] Karlsru G., Eger D. (Teploprovodnost' tverdykh tel). Moscow, NaukaPubl., 1964 (in Russ.).

[30] Fu J.W., Akbarzadeh A.H., Chen Z.T., Qian L.F., Pasini D. Non-Fourier heat conduction in sandwich panel with a cracked foam. *Int. J. Therm. Sciences*, 2016;102:263–273.

Транслитерация по BSI



XIV Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики»

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» приглашает Вас 30 мая – 1 июня 2018 г. принять участие в XIV Международной научно-практической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ».

В программе конференции:

Секции:

- проектирование и строительство энергоблоков АЭС;
- изготовление и ремонт оборудования АЭС;
- эксплуатация энергоблоков АЭС;
- экологическая безопасность эксплуатации АЭС;
- культура безопасности на объектах ядерной энергетики;
- экономика атомной отрасли.
- информационные встречи.

Место проведения конференции:

ВИТИ НИЯУ МИФИ, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д.73/94.

30 мая – заезд и размещение, 31 мая – пленарное заседание и проведение секций, 1 июня – конкурс студенческих докладов.

Заявки на участие в конференции и тезисы направляются путем регистрации на официальном сайте конференции: <http://nps.viti-mephi.ru> до 18 мая 2018 г. или по электронной почте (E-mail): oni-viti@mephi.ru

Статьи в журнал принимаются по этому же адресу.

Почтовый адрес: 347360, ВИТИ НИЯУ МИФИ, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д.73/94, каб. 505. Оргкомитет, тел.: +7(8639)222717, +79185395020.

<http://nps.viti-mephi.ru/ru/glavnaya>

[18] Shchukina T.V. Passive use of solar energy for energy-saving operation of buildings (Passivnoe ispol'zovanie solnechnoi energii dlya energosberegayushchei ekspluatatsii zdaniy). Materialy za VIII mezhdunarodna nauchna praktichna konferentsiya "Klyuchovi v"prosi v s"vremennata nauka", 17–25 April 2012. Vol. 29: Matematika. Zdanie i arkhitektura. – Sofiya.: „Byal GRAD-BG“ OOD, 2012, pp. 53–59 (in Russ.).

[19] Shchukina T.V., Polosin I.I., Sheps R.A., Karavaeva Ya.I. Solar heat collector (Solnechnyi teplovoi kollektor). Pat. 2604119 RF, MKI F24J 2/24, F24J 2/34, F24J 2/14, F24J 2/16. opubl. 10.09.2016.; Bul. 25 (in Russ.).

[20] Turchin N. Nonstationary axisymmetric temperature field in a two-layer slab under mixed heating conditions. *J. of Eng. Phys. and Thermophysics*, 2015;88(5): 1135–1144.

[21] Mors F.M., Feshbakh G. Methods of theoretical physics (Metody teoreticheskoi fiziki). Moscow, IIL, 1960. Vol. 2 (in Russ.).

[22] Met'yuz Dzh., Fink K.D. Numerical method. The use of MATLAB (Chislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB). Moscow, Izd. Dom "Vil'yams", 2001 (in Russ.).

[23] Takhar H.S., Chamkha A.J., Nath G. Effects of non-uniform wall temperature and mass transfer infinite section of an inclined plate on the MDH natural convec-

tion flow in a temperature stratified high-porosity medium. *Int. J. Therm. Sc.*, 2003;42:829–836.

[24] Aksenov B., Karyakina S., Stepanov O., Shapoval A., Bodrov M. Mathematical modeling of temperature field of multilayer enclosure structures. *MATEC Web of Conference*, 2016;73:02023.

[25] Aliawdin P., Marcinovski J., Wilk P. Theoretical and experimental analysis of heat transfer in the layers of road pavement. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2005;1:7–18.

[26] Nguyen C.H., Chandrashekhara K., Birman V. Multifunctional thermal barrier coating in aerospace sandwich panels. *Mechanics Research Communications*, 2012;32:35043.

[27] Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Basic differential equations of mathematical physics (Osnovnye differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki). Moscow, GIFML, 1962. (in Russ.).

[28] Dech G. Rukovodstvo k prakticheskomu preobrazovaniyu Laplasa. Moscow, Nauka Publ., 1965 (in Russ.).

[29] Karlsru G., Eger D. (Teploprovodnost' tverdykh tel). Moscow, NaukaPubl., 1964 (in Russ.).

[30] Fu J.W., Akbarzadeh A.H., Chen Z.T., Qian L.F., Pasini D. Non-Fourier heat conduction in sandwich panel with a cracked foam. *Int. J. Therm. Sciences*, 2016;102:263–273.

Транслитерация по BSI



XIV Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики»

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» приглашает Вас 30 мая – 1 июня 2018 г. принять участие в XIV Международной научно-практической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ».

В программе конференции:

Секции:

- проектирование и строительство энергоблоков АЭС;
- изготовление и ремонт оборудования АЭС;
- эксплуатация энергоблоков АЭС;
- экологическая безопасность эксплуатации АЭС;
- культура безопасности на объектах ядерной энергетики;
- экономика атомной отрасли.
- информационные встречи.

Место проведения конференции:

ВИТИ НИЯУ МИФИ, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д.73/94.

30 мая – заезд и размещение, 31 мая – пленарное заседание и проведение секций, 1 июня – конкурс студенческих докладов.

Заявки на участие в конференции и тезисы направляются путем регистрации на официальном сайте конференции: <http://nps.viti-mephi.ru> до 18 мая 2018 г. или по электронной почте (E-mail): oni-viti@mephi.ru

Статьи в журнал принимаются по этому же адресу.

Почтовый адрес: 347360, ВИТИ НИЯУ МИФИ, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д.73/94, каб. 505. Оргкомитет, тел.: +7(8639)222717, +79185395020.

<http://nps.viti-mephi.ru/ru/glavnaya>



OPTIMAL ORTHOGONAL TURBINES OF LOW POWER IN THE INFINITE FLOW*

V.M. Lyatkher^{1,2,3}

¹British American Turbines, Inc.

The Arts Building, 2 nd Floor, Morris Place, London, UK, NA 31G
www.baturbines.com, e-mail: vlyatkher@sbcglobal.net

²New Energetics Inc.

393 Dumbarton Blvd., Richmond Hts., Cleveland, OH 44139343
tel.: 1(216)272-67-65

³«Novaya Energetika» Ltd.

5-1-129, Shturvalnaya Str., Moscow, 125363, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.063-085

Referred 12 March 2018 Received in revised form 16 March 2018 Accepted 21 March 2018

The paper deals with the variants of the design of free flow high-speed orthogonal aggregates (VAWT-USA terminology) that convert the energy of currents in conditions when the turbine dimensions are much smaller than the depth and width of the flow. It is established that the considered turbines of large length can have the greatest efficiency in variants with one balanced blade when the blade chord is approximately equal to the turbine radius and is deployed by 3-5 degrees (the blade sock outwards from the track). The optimal rotation speed in this case is about 4 times higher than the flow velocity, and when a constant speed of rotation, the maximum power on the turbine shaft is achieved at a flow velocity close to the blade speed. A balanced turbine with two blades and the same solidity (the chord of the blade is half of the radius) has approximately the same efficiency but with the speed of the blades is about 2.5 times higher than the flow velocity on the upstream of the turbine.

Moreover, the paper notes the possibility of a noticeable increase in the efficiency of turbines by optimizing the rotation of the blades on the track and increasing the relative diameter of the turbine ($D/L > 5$).

Keywords: wind power; low power; infinite; flow; orthogonal turbine; efficiency.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ТУРБИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В БЕСКОНЕЧНОМ ПОТОКЕ

В.М. Лятхер^{1,2,3}

British American Turbines, Inc.

The Arts Building, 2-й этаж, Morris Place, Лондон, Великобритания, NA 31G
www.baturbines.com; e-mail: vlyatkher@sbcglobal.net

²New Energetics Inc.

393 Dumbarton Blvd., Richmond Hts., Cleveland, OH 44139343
tel.: 1 216 272 67 65

³ООО «Новая Энергетика»

5-1-129, ул. Штурвальная, Москва, 125363, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.063-085

Заключение совета рецензентов: 12.03.18 Заключение совета экспертов: 16.03.18 Принято к публикации: 21.03.18

*Lyatkher V.M. Optimal Orthogonal Turbines of Low Power in the Infinite Flow // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):63-85

Рассматривались варианты конструкции свободнопоточных быстроходных ортогональных агрегатов (VAWT – по терминологии США), преобразующих энергию течений в условиях, когда габариты турбины много меньше глубины и ширины потока. Установлено, что рассмотренные турбины большой длины наибольшую эффективность могут иметь в вариантах с одной сбалансированной лопастью, когда хорда лопасти примерно равна радиусу турбины и развернута на 3–5 градусов (носик лопасти наружу от трассы). Оптимальная скорость вращения в этом случае примерно в 4 раза выше скорости потока, а при постоянной скорости вращения максимальная мощность на валу турбины достигается при скорости потока, близкой к скорости лопасти. Сбалансированная турбина с двумя лопастями и таким же затенением (хорда лопасти вдвое меньше радиуса) имеет примерно такую же эффективность, но при скорости лопастей в 2,5 раза большей скорости потока на подходе к турбине.

Отмечена возможность заметного увеличения эффективности турбин при оптимизации разворота лопастей на трассе и увеличении относительного диаметра турбин (D/L).

Ключевые слова: ветроэнергетика; малая мощность; бесконечный поток; ортогональная турбина; эффективность.



Виктор Михайлович Лятхер
Viktor Lyatkher

Сведения об авторе: д-р. техн. наук, профессор; член Академии водных проблем (Россия); инженер, British American Turbines, Inc.; президент компании «New Energetics» (США); генеральный директор ООО «Новая Энергетика» (Россия).

Образование: Московский энергетический институт; механико-математический факультет МГУ.

Область научных интересов: гидравлическое моделирование, гидроэнергетика, гидрология, сейсмология, механика сплошных сред, приливная энергия; ветроэнергетика.

Публикации: более 280, в том числе 15 книг и 70 патентов.

Information about the author: D.Sc. in Engineering; Professor of Moscow University of Environmental Protection; Member of Academy of Water Researches, Russia; Project Engineer and Researcher, British American Turbines, Inc.; President of Clean Energy Co. (USA); New Energetics Inc. (USA); CEO of “Novaya energetika” Ltd. (Russia).

Education: Master of Science in Engineering, Moscow Power Engineering Institute; Moscow State University, Mathematician and Mechanics department.

Research interests: hydraulic modeling, hydraulics of the rivers, lakes and ocean flow; hydrology, water resources management, seismology and earthquake engineering, hydro-power, tidal power and wind power construction and equipment.

Publications: more than 280 including 15 books, and 70 patents.

List of symbols and abbreviations	
<i>Greek symbols</i>	
σ	Solidity of the Turbine
ν	Kinematic Viscosity of the Medium
<i>Latin symbols</i>	
b	Chord of the Blade
C_p	Efficiency
D	Diameter
H	Height
i	Number of the Blades
L	Length of turbine
R	Radius
Re	Reynolds number
U	Flow speed before turbine
u	Flow speed in turbine
V	Linear Velocity of the Blade
<i>Indexes</i>	
tr	Traverses
<i>Abbreviations</i>	
SANDIA	Sandia National Laboratories of the United States Department of Energy
TsAGI	Central Aerohydrodynamic Institute

I. High speed orthogonal turbines

Free-flowing turbines that convert the kinetic energy of the flow into electricity are called orthogonal if the axis of rotation of the turbine blade system is perpendicular to

the direction of flow. We consider the most energy-efficient high-speed turbines, which have a linear velocity of the blades greater than the velocity of the oncoming flow (the idea of the patent Darrieus [1]). The turbine axis is usually vertical (Fig. 1) or horizontal (Fig. 2).

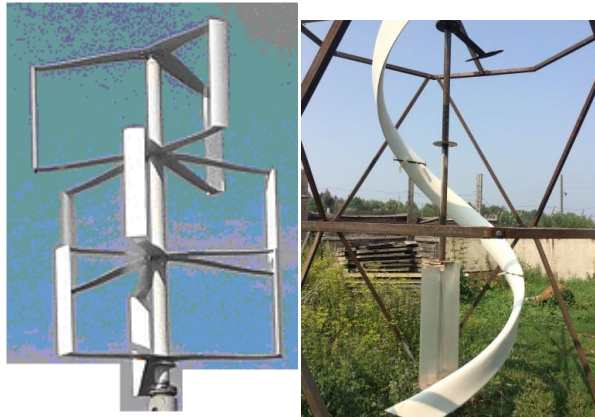


Fig. 1 – Orthogonal wind turbines with a vertical axis



Fig. 2 – Orthogonal hydro turbines with a horizontal axis

The idea of the Darie patent and the first projects of wind turbines was to use curved blades, possibly variable cross-section with supports at the ends of the blades.

The optimized turbine of this type, developed and tested in SANDIA [2], has shown very high efficiency (Fig. 3).

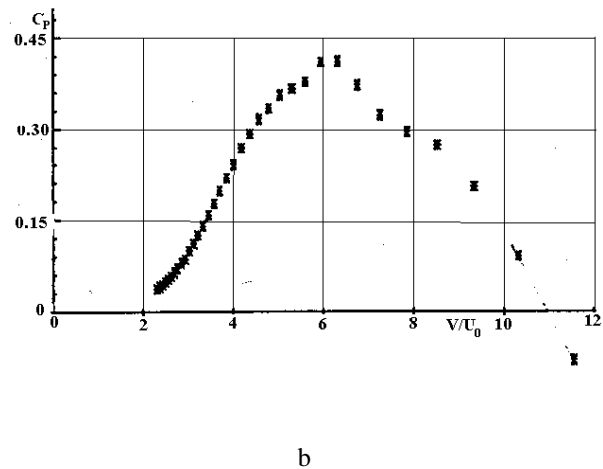
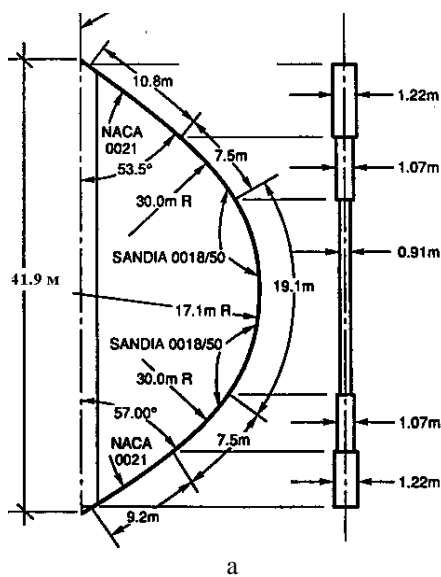


Fig. 3 – Two-blade Sandia-34 turbine: a – wind turbine image; b – Efficiency of Sandia-34 turbine





Fig. 4 – Commercial sample of the high-speed VAWT with a changeable ratio of height and diameter of the turbine (Flow Wind Corporation): height – $42 \div 63$ m; diameter – $17 \div 21$ m; power – $300 \div 400$ kW; wind during the operation from 4.5 to 27 m/s; calculated storm – 58.5 m/s

Turbines of this type (Fig. 4) were actively built and sold; about 900 sets were installed in California in 1995. Dimensions and capacity of the designed turbines have reached impressive values (Fig. 5).

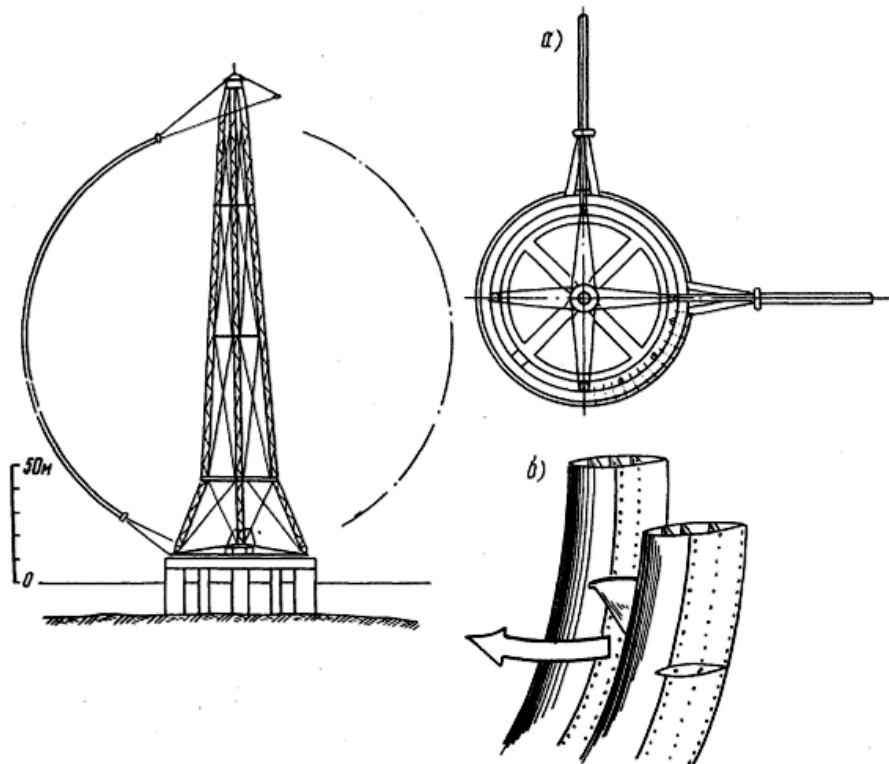


Fig. 5 – “L-180 Poseidon” [3]: diameter of the turbine – 180 m; power 20 MW; development 45 GWhour/year at average wind $9 \div 9.5$ m/s; shift of working blades at 90° reduces pulsation of loadings and torque

However, this type of turbines showed the adverse features in the production and operation – the difficulty of manufacturing and insufficient strength of curved blades, high vibration and insufficient reliability of the rotor. Then the popularity of a balanced turbine with multiple straight blades in one or more tiers, as well as turbine blades, curved in a spiral (helicoid) began to grow.

The turbines of this type work due to the action of the pulling force developing on the wear of the blade having an aerodynamic profile when the flow of the blade with a flow angle of attack is less critical. Usually the turbines are designed so that their length is much larger than the diameter of the turbine. This allows us to consider a two-dimensional picture in a plane perpendicular to the axis of the turbine for conditions of limitless flow. Numerical models of such turbines [4] allow us to optimize their



design scheme for the simplest case of application of straight blades. Such optimization, certainly, is subject to experimental verification. At the same time, additional difficulties arise due to the fact that the conditions for the flow around the blade wear significantly depend on the viscosity (on the Reynolds criterion) – Fig. 6.

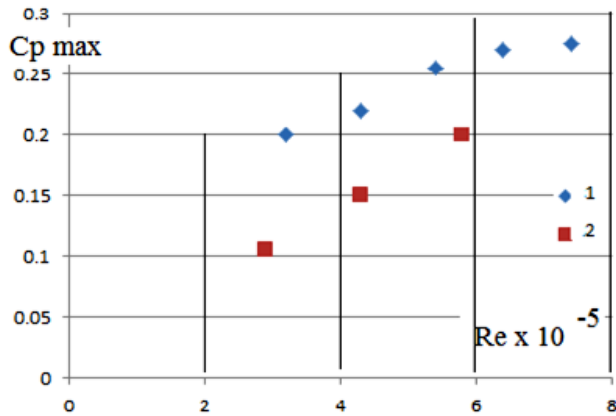


Fig. 6 – Maximum efficiency of orthogonal power unit depending on the Reynolds criterion: 1 – turbine with 3 blades, shading – 0.45, profile NACA 0015; 2 – single-blade unit with struts and counterweight [5]

Reliable (self-similar) results for real large aggregates can be obtained only on large models at sufficiently high flow rates:

$$Re = Vb / \nu > 7 \div 8 \cdot 10^5 . \quad (1)$$

Here V is the linear velocity of the blade, b is the chord of the blade, and ν is the kinematic viscosity of the medium.

If the tests are carried out on a hydraulic model at a flow rate of, for example, 1m/s and blades speed of 3m/s, the chord models should be at least 25 cm which requires large dimensions of the experimental stands. In normal practice, self-similarity is not achieved and experimental (model) results can only be used to compare designs. The design methodology based on empirical data on profile characteristics can provide a more reliable prediction.

2. Efficiency of turbine with different parameters

In the considered scheme of orthogonal machines, the variable parameters can be:

- 1) the profile of the blade and its orientation (an angle of the blade chord and blade velocity) to the trajectory of the blade);
- 2) relative chord length of the blade b/D;
- 3) number (i) and arrangement of identical blades placed on the same diameter of the track D;
- 4) the solidity of the turbine $\sigma = ib/D$;
- 5) number of the groups of blades belonging to different diameters of tracks (one or two tracks).

We can consider the impact of these factors.

Fig. 7 shows the changes in the efficiency of the double-blade turbine in the function of the relative speed of the blades with a profile NASA 0018 without turning the blades and a turn of 3 or 6 degrees (toe outside).

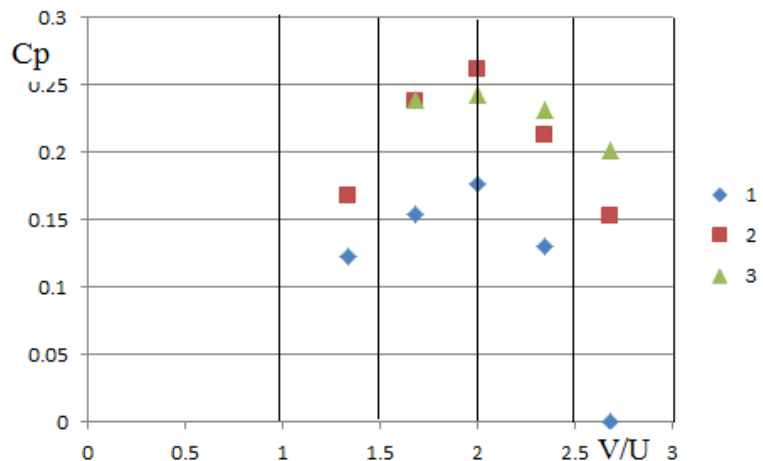


Fig. 7 – The efficiency of the wind turbine in the function of the relative velocity of the blades

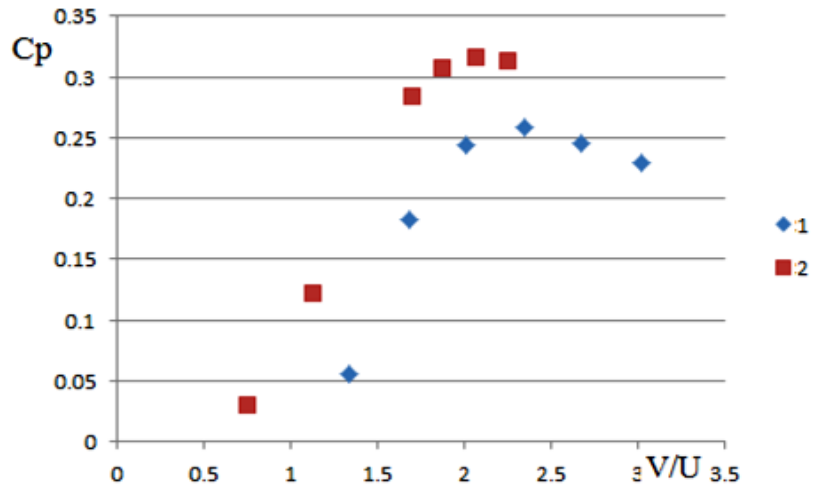
The characteristics are: profile NASA 0018; i = 2; b = 0.18 m; D = 0.64m; L = 0.9 m; U = 10 m/s; blade turning angles for points 1, 2, 3 are 0, 3, 6 degrees; solidity $\sigma = 0.36/0.64 = 0.562$.

The best results are obtained by turning on 3 or 6 degrees. This is consistent with the experiments in TsAGI

[6]. Relatively low values of maximum efficiency of aggregates are associated with low Reynolds numbers $Re = Vb/\nu = 2.6 \cdot 10^5$. The efficiency is markedly increased by increasing solidity due to, e.g. reduce the diameter of the turbine (Fig. 8).



Fig. 8 – Turbine with two the same one blades on the radius 0.32 and 0.16 m (points 1) or on the radius 0.18 and 0.09 m (points 2) – two groups of blades in turbines of different diameters: 1 – NASA0018; $b = 180\text{mm}$; 2 group; $D = 0.64\text{m}$; 5° ; 2 travers $b_{tr} = 0.1\text{m}$; $t_{tr} = 0.02\text{ m}$; $U = 10\text{m/s}$; $L = 0.9\text{m}$; 2 – NASA0018; $D = 0.32\text{m}$; $b = 0.09\text{m}$; 5° ; $h_{jsition} 180^\circ$; $b_{tr} = 0.1\text{m}$; $t_{tr} = 0.02\text{m}$



The shape of the profile is relatively weak. The variation of the thickness of the NASA standard profile in the range from 15 to 22% practically does not change the characteristics of the unit (Fig. 9).

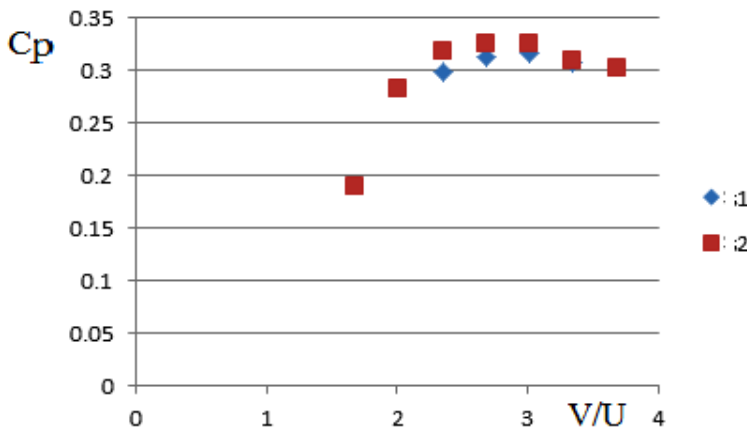
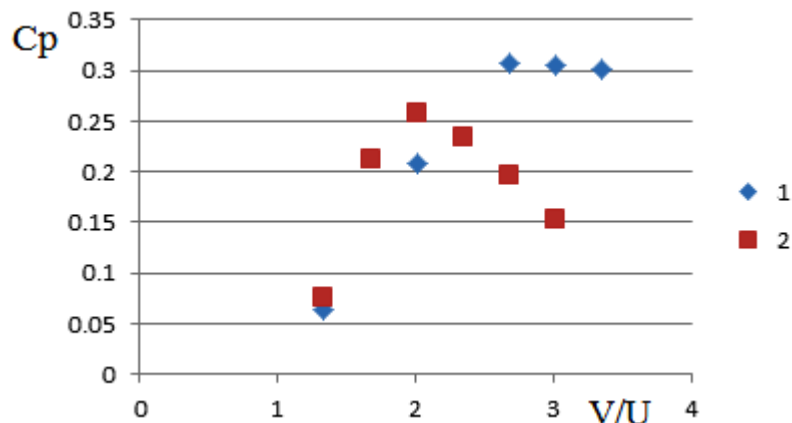


Fig. 9 – Efficiency of two-bladed wind turbine with a profile NASA 0018 (1) and NASA 0021 (2): turn the blades on 6° ; $D = 3.2\text{ m}$; $b = 0.5\text{m}$; $\sigma = 0.312$; $U = 10\text{ m/s}$

The use of the best modern aviation profile GAW-1 [7] little changes the characteristics of the unit; the number of blades and solidity of the unit more significantly

affects the unit's characteristics – at a constant chord blades are most effective single-blade units (Fig. 10).

Fig. 10 – Energy characteristics of the wind turbine with one (1) or two (2) blades: the GAW-1 profile; $b = 0.16\text{m}$; $D = 0.64\text{m}$; $L = 0.9\text{m}$; the optimum turn of 3° ; $U = 10\text{m/s}$



It is better to place the blades with a shift of $45 \div 60$ or 120° when using two blades in one tier. In this case, the positive torque and maximum efficiency of the tur-

bine for the conditions in Fig. 10 reaches the same $C_p = 0.26$ at $V/U = 2$. In this case it is necessary to use the special devices or several tiers to balance inertial loads.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

With the same blades as in Fig. 10, the two-bladed windmill reaches its maximum efficiency $C_p = 0.3$ at diameter $D = 1.8$ m and a thin traverses (Fig. 11).

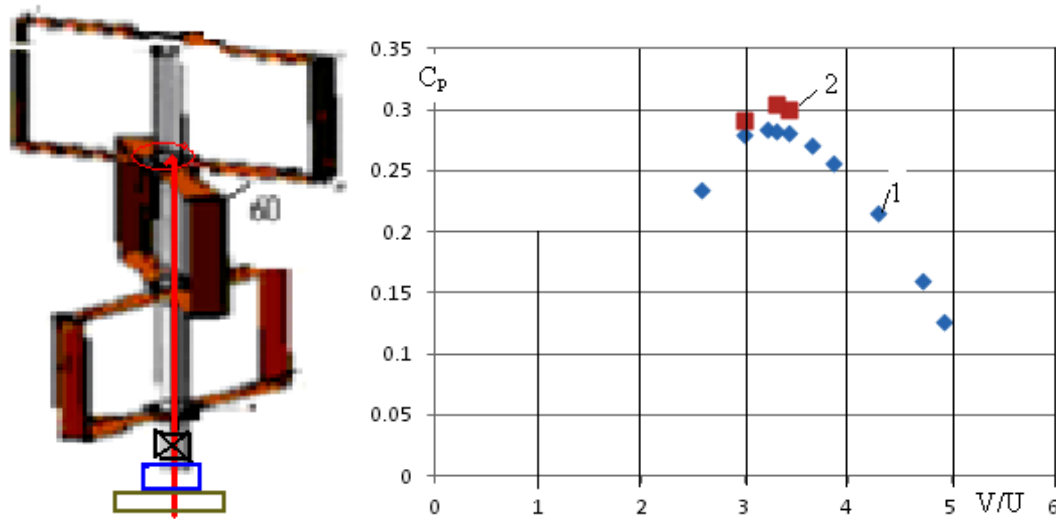


Fig. 11 – Recommended options for the design of the rotor nominal power of 1 kW at a wind of 11 m/s: the generator (1) at the base of the rotor (left); rotor diameter – 1.8 m; height of the layer (length of blade) – 0.9 m; chord blades – 0.16 m; the profile of the blade – GAW-1; a reversal of the chord – 20 relative to the aerodynamic center; traverse streamlined cross-section – 40x2 mm² (point 2) or 80x5 mm² (point 1). When the wind 11 m/s – the optimal rotational speed 390 rpm ($V/U=3.3$), power is not lower than 1.2 kW, the efficiency is not lower than 30% in the wind speed range from 3 to 12 m/s when the rotational speed is proportional to the wind speed

At a wind more than 12 m/s rotation frequency constant is limited to 450 rpm. At a wind of 26 m/s unit stops on the mechanical brake. The rotor shaft can be fixed in two end supports placed in a light frame. The whole structure in this embodiment is a portable one docking through a frame without foundation.

The two-tier double-blade turbine was tested in detail on models in the laboratory and full-scale (nature) conditions (Fig. 12) [8–10].

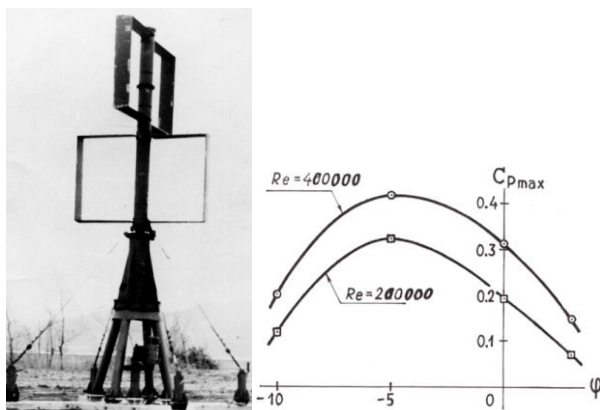


Fig. 12 – A 16 kW two-tier wind turbine: a – at the site in Dubki (Dagestan); b – its maximum efficiency depending on the angle of rotation of the blades (according to the model at different Reynolds numbers)

At the constant diameter of the turbine, the increase in the number of blades in the infinite flow strongly inhibits the flow (removes the flow from the turbine) and does not increase the maximum power of the unit if the chord of the blade is greater than a certain value (Fig. 13–16).



Fig. 13 – Two-blade orthogonal unit on tests in TsAGI



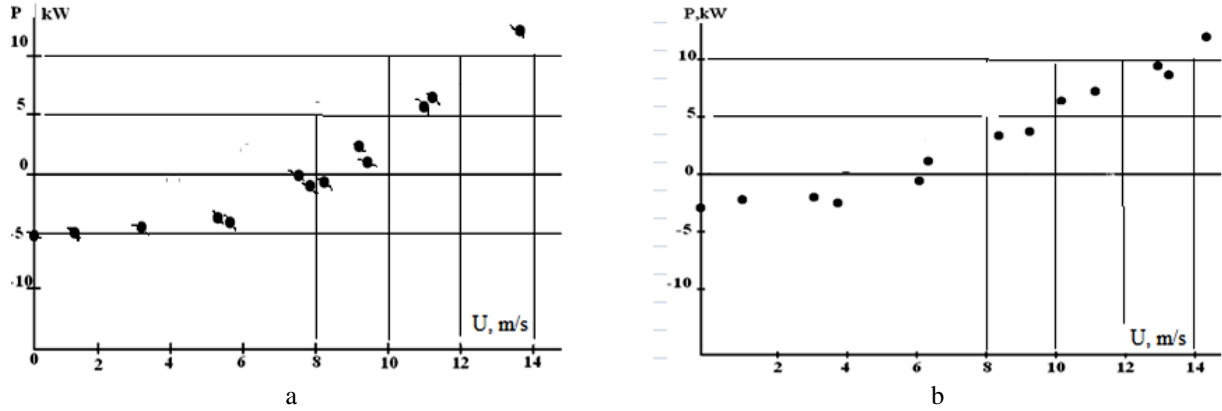


Fig. 14 – Capacity at the terminals of the generator 4-blade VAWT (a) and capacity at the terminals of the generator 2-blade VAWT (b) depending on the wind speed: a rotor diameter – 9 m; the profile of the blades – NASA0021; the average chord of the blade – 0.9m; the length of this part of 3.76 m; the average chord of the end parts of blade – 0.65 m; the total length – 4.64 m; the chord traverse – 0.465 m; thickness traverse – 0.088 m; speed of the rotor – 38.8 rpm; 4-blade single rotor; one pair of blades is shifted relative to the other for 45°

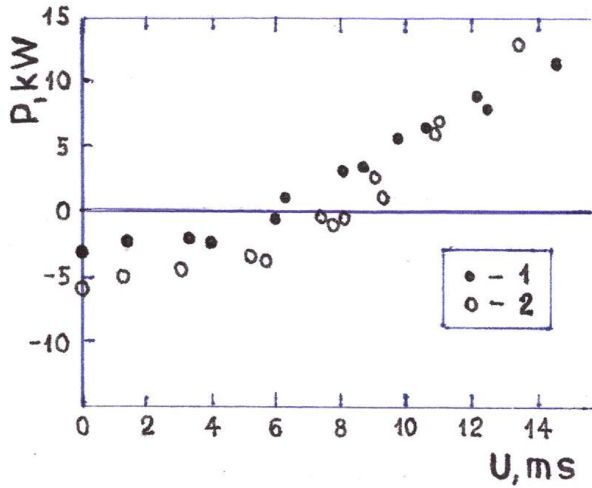
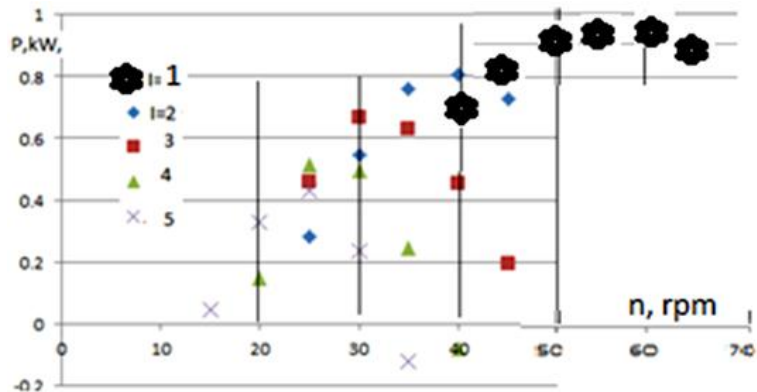


Fig. 15 – Capacity at the terminals of the generator, depending on the wind speed in the pipe for testing two-blade (1) and four-blade (2) rotors with a diameter of 9 m at a rotational speed of 38.7 ÷ 38.9 rpm (blade speed 18.2 ÷ 18.3 m/s)

Fig. 16 – Capacity of straight blade hydro turbines with length $L = 5.4\text{m}$; blades GAW-1; $b = 0.16\text{m}$; $\alpha = 0+2^\circ$; $D = 1.28\text{m}$; water speed 1 m/s

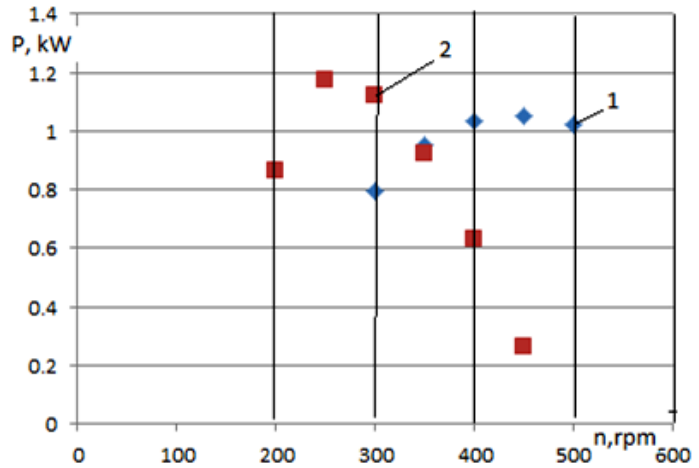


On the contrary, with a relatively small chord of the blade, the introduction of a second or even a third blade can be useful – the maximum power increases (Fig. 17).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Fig. 17 – The output of a wind turbine of diameter $D = 2\text{m}$; $b = 0.16\text{m}$; length $L = 3\text{m}$: 1 – one blade; 2 – 3 blades in one layer; GAW-1; 3° ; $U = 10\text{m/s}$



The three-blade rotor starts better (higher torque at low speeds), but the rotor with one blade even at a relatively small chord ($b/D = 0.08$) has a higher optimal rotational speed and a flatter characteristic.

In a limited stream (in the river) the situation is different – the limited depth and width of flow is affected

there. The capacity of the three-blade turbine will be significantly greater.

A single-blade turbine is the most effective solution if its chord is between 0.5 and 1 turbine radius (Fig. 18). Reducing efficiency by increasing the diameter of the turbine, however, does not prevent an increase in the maximum power of the turbine with the same blade.

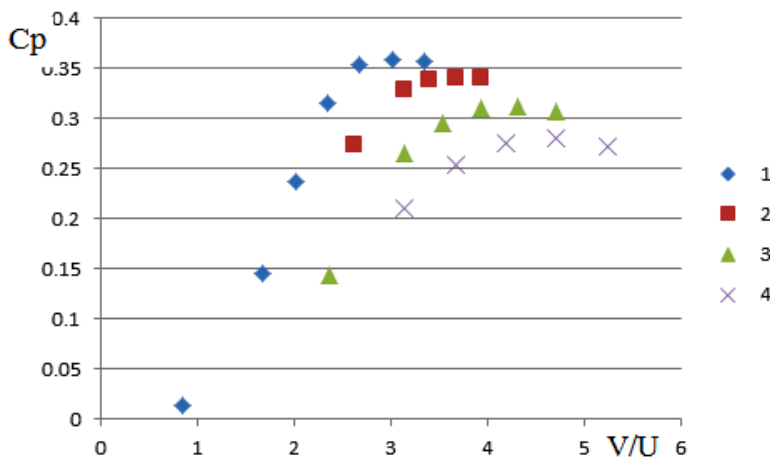
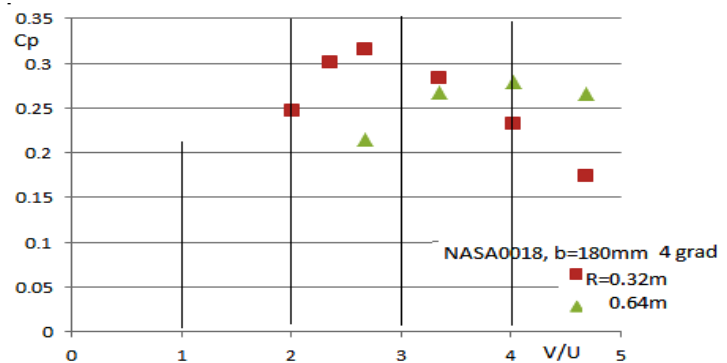


Fig. 18 – The efficiency of single-blade wind turbines of different diameters: $D = 0.64; 1.0; 1.5; 2.0\text{ m}$ (points 1, 2, 3, 4); chord blades and cross-section traverses unchanged: $b = b_{tr} = 0.16\text{ m}$; $i = 1$, $L = 3\text{m}$; GAW-1; 3° ; $U = 10\text{m/s}$

Single-blade turbines with a different blade profile also reduce efficiency by increasing the diameter above the optimal value (Fig. 19), but still provide an increase in the maximum power of the turbine.

Fig. 19 – The efficiency of single-blade wind turbine with NASA 0018 profile



On turbines with GAW-1 blade profile without reversal with increasing diameter, the optimal relative velocity of the blade increases without reducing the maximum efficiency (Fig. 20).

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

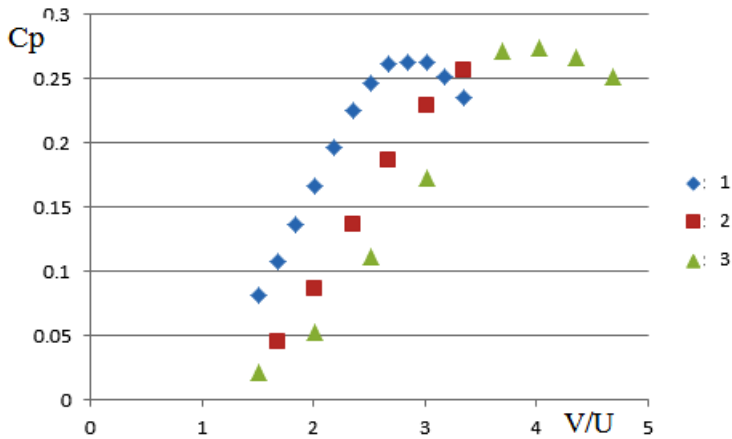


Fig. 20 – Turbine diameter effect: $D = 0.64, 1.28, 1.92\text{m}$ (points 1, 2, 3); GAW-1; 0 grad; $b = 0.16\text{m}$; $U = 10\text{m/s}$; $b_{tr} = 0.003\text{ m}$; $L = 0.9\text{m}$; $i = 1$

As the solidity increases, the efficiency of the turbine also increases, reaching a maximum when solidity is around $\sigma = ib/D = 0.3$. With constant solidity, the higher maximum efficiency is, the smaller numeral blades are are

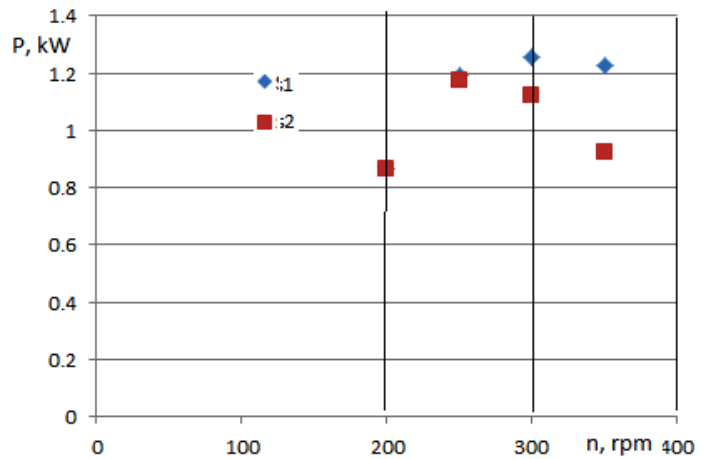
(Fig. 21). One blade with a chord 0.48 m (1) at solidity 0.24 gives greater efficiency than three blades with a chord 0.16 m (2). We can draw a conclusion: with the same solidity, the smaller numeral blades, the better it is.



International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Fig. 21 – The capacity of a VAWT of diameter $D = 2\text{m}$; GAW-1; 3° ; $L = 3\text{m}$; $U = 10\text{m/s}$: 1 – one blade with a chord of 0.48 m; 2 – three blades with a chord of 0.16 m



The effect of solidity is noticeable, if it is small. With a turbine diameter of 2m, a single-blade turbine with a chord of 0.16m (solidity 0.08) gives a slightly lower

maximum capacity than a three-blade turbine (Fig. 22), but the same as two-blade turbine with the same blades.

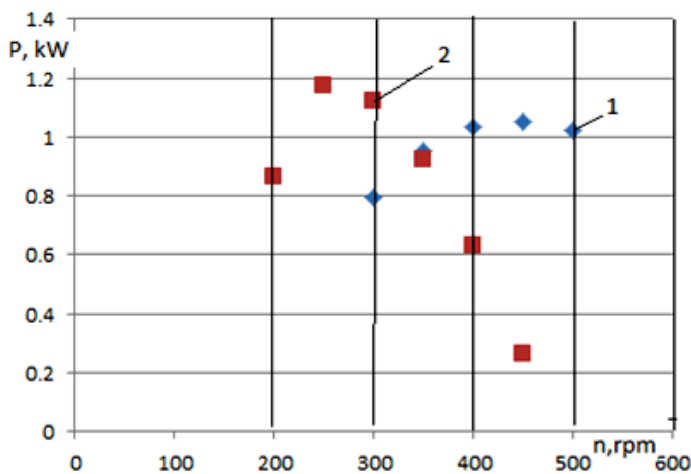
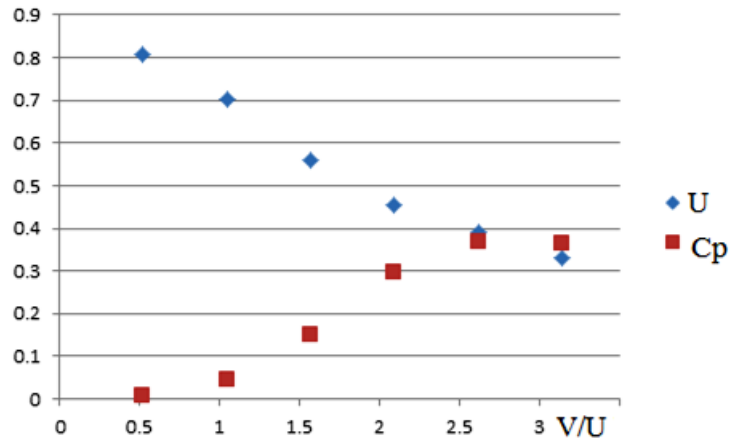


Fig. 22 – The output of a wind turbine of diameter $D = 2\text{m}$; GAW= 1; 3° ; $L = 3\text{m}$; $U = 10\text{m/s}$: 1 – a blade with a chord of 0.16 m; 2 – three blades with a chord of 0.16 m

With a diameter of 1.28 m (solidity 0.125 and more), an increase in the number of blades with a chord of 0.16m does not already lead to an increase in the maximum power of the unit (Fig. 16). All these results are

valid for turbines in a limitless flow, where the flow rate inside the turbine varies significantly with the change in speed and number of blades (Fig. 23).

Fig. 23 – The relative velocity of flow in the turbine (u/U) on the approach to the rear section of the route ($x = 0.7, y = 0$) and the turbine efficiency (C_p): GAW-1; 3°; $D = 10m; i = 1; L = 20m; b = 3m; U = 10m/s$



Given the decrease in the flow rate inside the turbine, we can try to install a second working blade at a smaller radius. Such a scheme, however, does not lead to an increase in the maximum power (Fig. 24).

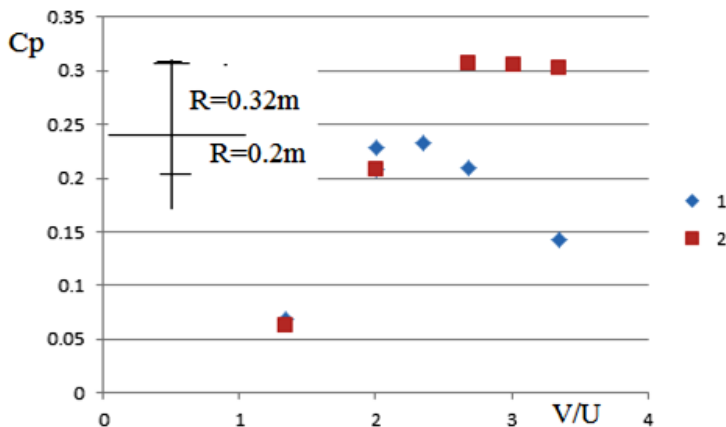
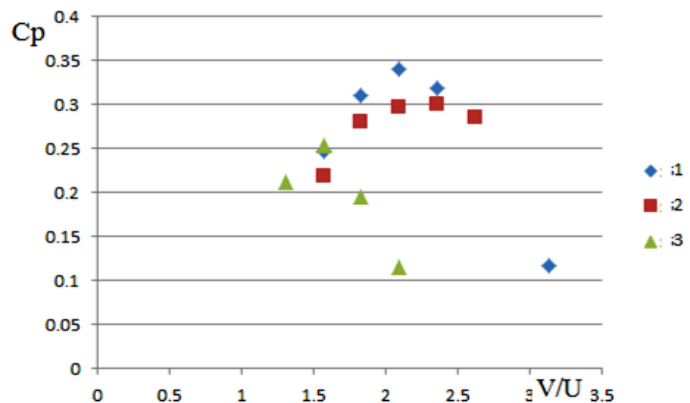


Fig. 24 – The efficiency of a turbine with 1 – two identical blades ($b = 0.16 m$; GAW1; 3°), located at different radii (0.2 m and 0.32 m) in comparison with the efficiency of a 2 – single blade turbine with a radius of 0.32 m. $L = 0.9 m; U = 10 m/s$

All the experiments and calculations show that in a limitless flow the use of a single-blade turbine is the most effective. This is obtained by comparing the tur-

bines with both the same solidity and the same length of the chord blades (Fig. 25).

Fig. 25 – The efficiency of turbines with a diameter of 10 m with blades profile: GAW-1; 20 m long, deployed at 3°; (1) and (2) – the same solidity(0.5), but $i = 1, b = 5m$ (points 1) or $i = 2, b = 2.5 m$ (points 2); 3 – the same chord $b = 5m$, but $i = 2$ (points 3)



The high efficiency of the optimized single-blade turbine is obtained despite the fact that significant torque is observed only on the frontal section of the route. With two or more blades, the back section of the route makes a significant contribution to the average power, although the total maximum power is less.

3. One and two blades turbines

Ripple torque (and power) in a single blade turbines limiting their application is resolved in a modern multi-tiered and spiral (without central axis) balanced designs (Fig. 26) [11].

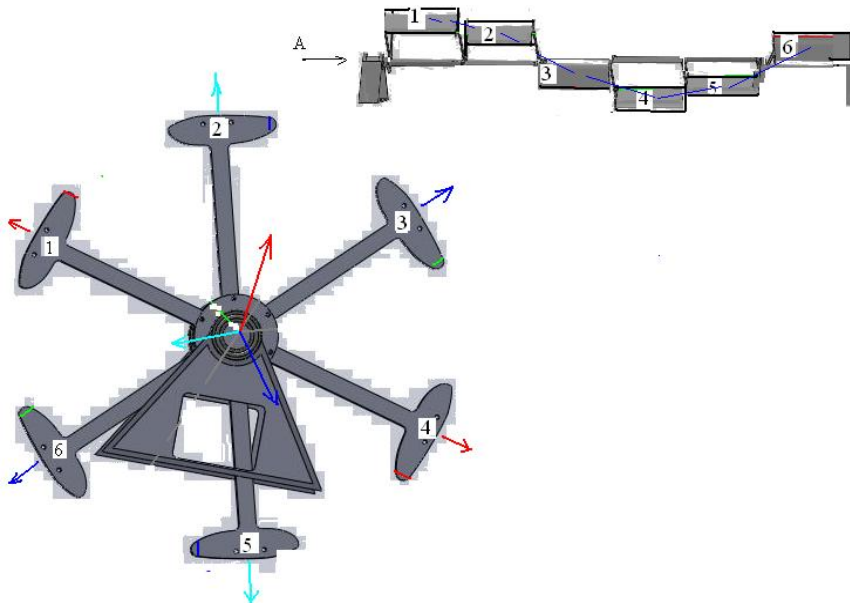
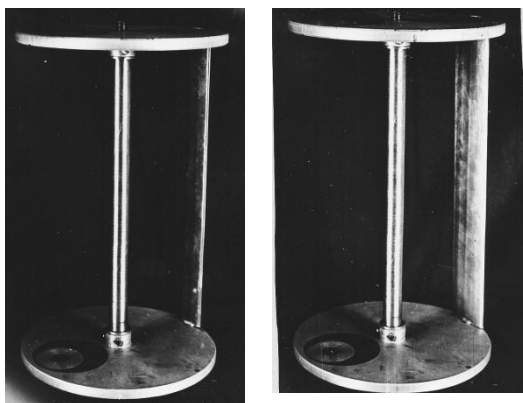


Fig. 26 – Version of a single-blade six-tier turbine [12]

These structures do not load the supports with centrifugal forces, provide a small pulsation of the torque on the shaft of the generator, but do not eliminate the pulsation in the support nodes of the bending moment from the aerodynamic forces, and have reduced efficiency due to a large number of traverses in variants with straight blades. A large number of traverses reducing the efficiency of the turbine are an important trait of multi-tiered schemes. The effect of traverse can be very strong. For example, the use of 4 traverses (blade support at the

ends) instead of two ones (console fastening of blades in the middle) with the aerodynamic profile thickness of the traverse 31% on the optimized double-blade turbine reduced the maximum efficiency of the turbine from $C_p = 0.3$ (at $V/U = 2.7$) to $C_p = 0.08$ (for $V/U = 2.3$) [13]. A similar result was obtained when testing the first variants of single-blade turbines. The turbine with one blade fixed in disks with balancing counterweights embedded in disks showed the highest efficiency (Fig. 27).



10

1

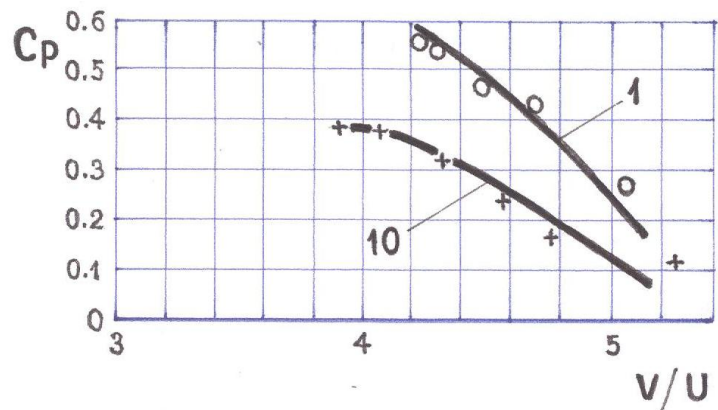
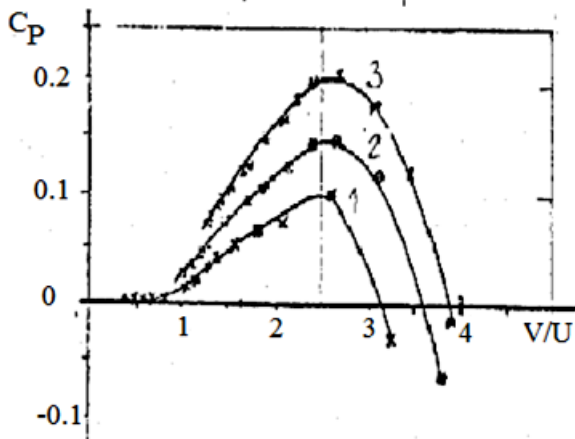
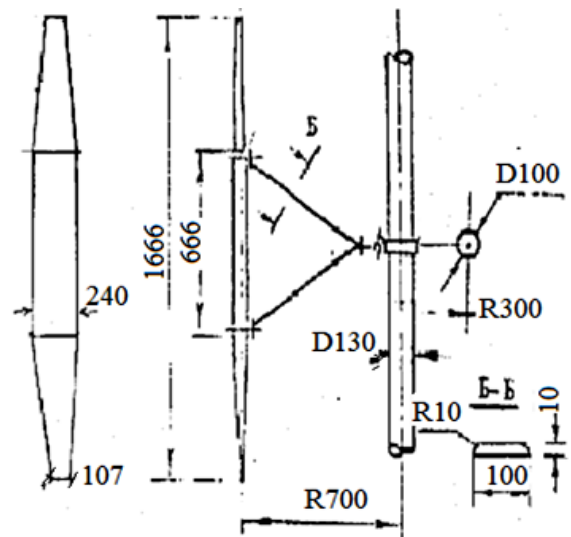


Fig. 27 – One blade on a disk with a balancer: chord 50 mm (right, line 1) and 30 mm (left, line 10); $D = 200\text{mm}$; $H = 300\text{mm}$; measurements in a channel cross-section of $1 \times 1 \text{ m}^2$; the flow of water at a speed of 1 m/s

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

On the contrary, the fixing of the blade with the profile of the GAW-1 two ordinary cross-arms with a counterweight, adding to the resistance, led to a sharp decrease in the efficiency (Fig. 28).



Points 1,2,3, – $Re = 2.9, 4.3, 5.8 \cdot 10^5$

Fig. 28 – Energy efficiency C_p as a function of blade speed (V/U) at different Reynolds numbers $Re = Vb/v$.
Test single-blade models with blade trapezoidal shape: the profile of GAW-1; the chord in the middle part $b = 240$ mm; the ends – 107 mm; the model radius $R = 700$ mm; no effect of Re when $Re > 5.8 \cdot 10^5$

The increased turbulence of the flow in the hydraulic tests must reduce the effect of Reynolds number. In order to verify this effect (Re effect), rotor with a diameter of 400 mm in another tray with a width of 2m ($B/D = 5$) and a depth of up to 1.5 m at a flow rate of up to 1.6 m/s was tested.

The tests confirmed the qualitative conclusions given here, but the quantitative evaluation of the effectiveness of all units proved to be higher. For example, the maximum efficiency of a two-bladed two-tier rotor on traverses with solidity 0.315 and $b_{tr}/b = 44/63$ reached $C_p = 0.6$ at $V/U = 3.7$. However, even on this large model, the introduction of horizontal extensions with a diameter of only 0.3 mm in the middle of each tier halved the efficiency of the rotor (Fig. 29).

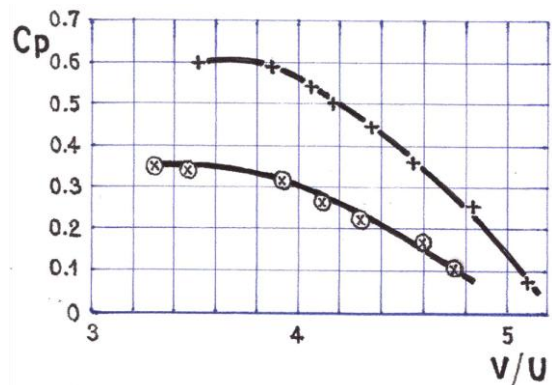


Fig. 29 – Two-tier double-blade rotor in a large tray ($2 \times 1.5 \times 20$ m) with $D = 400$ mm, $b = 63$ mm, $b_t = 44$ mm, $H = 800$ mm, $L = 400$ mm: 1 – no stretch marks; 2 – stretch marks with a diameter of 0.3 mm; $U = 1$ m/s

According to the test data in this two-bladed machine tray, the maximum efficiency at solidity 0.315, 0.265 and 0.220 was 0.6, 0.5 and 0.35, respectively. The optimal speed of the blades was from 3.5 to 3.7 flow rates. In this case, the optimized design of the two-tier rotor showed the similar results in a small tray (Fig. 30).

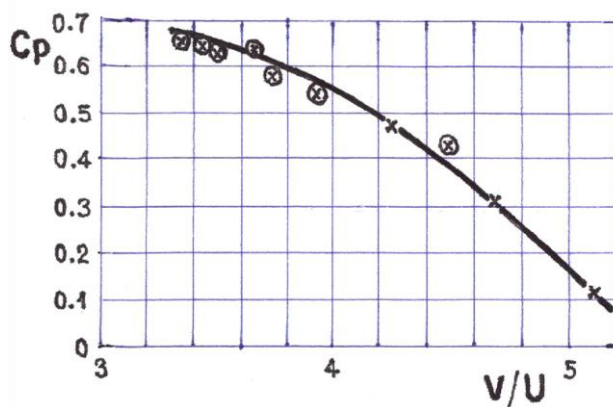
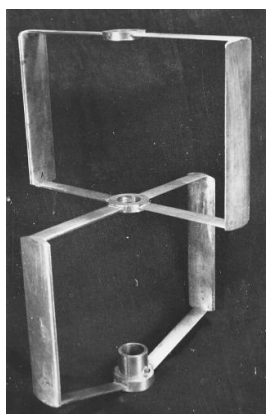


Fig. 30 – The optimal model tested in a tray with: a width of 1 m; $D = 200$ mm; $b = 30$ mm; $L/b = 4.16$; $b_{tr}/b = 0.5$; the ends of the blades are rounded along the outline of the traverse: $C_p = 0.661$; $V/U = 3.35$

High efficiency values in both cases may be associated with relatively small flow widths and depths. The full-scale experimental single-blade wind turbine (Fig. 31) had a rotor diameter of 7.05 m balanced by a cylindrical counterweight streamlined at a distance of 1.8 m from the axis of rotation. The rotor via a base-brake unit

was connected to a motor reducer MP2-315-15-80 with built-in the asynchronous generator 4AM132M4-U3 of 11 kW power, the nominal slip of 0.0267, critical slip of 0.175 nominal torque of 72 NM, the critical torque of 307 NM.

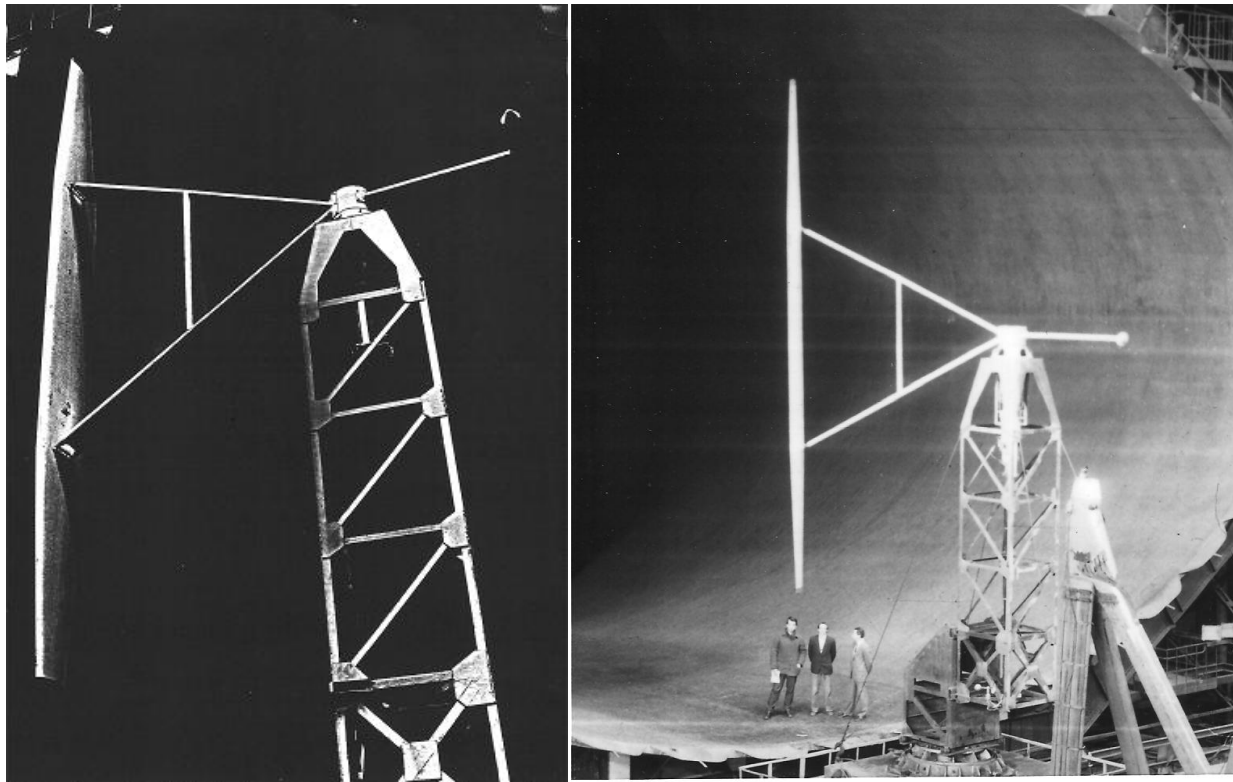


Fig. 31 – Orthogonal single-blade wind turbines to the test in the largest pipe TsAGI: the radius of the track of the blade – 3.54 m; blade area – 6.4 m²; the average chord – 0.74 m; length of the blade – 8.6 m; the profile NASA0021

Mechanical and electrical losses in the generator-reducer system were determined on the basis of preliminary tests of the rotor-less system (Table 1).

Test results of the gear-motor

Table 1

Shaft power, kW	0.4	4.58	7.44	10.8	14.1	18.6	24.5
El. Power at the terminals of the generator, kW	0	3.55	6.40	9.43	12.6	16.0	20.1
Power loss, kW	0.4	1.03	1.37	1.04	1.5	2.6	4.4

The tests of wind turbines in the large wind tunnel of TsAGI showed that the smallest dimension of the cross section was almost twice the length of the blade (Table 2).



Table 2

Test results of a single-blade wind turbine in the TsAGI wind tunnel

The wind speed U, m/s	The speed of the blade V, m/s	Power at the terminals, kW	The rotor power P, kW	V/U	Efficiency, CP
0	29	-5.85	-4.82	-	-
3.1	29	-4.92	-3.89	-	-
6.44	29.4	-3.06	-2.06	-	-
7.58	29.6	-0.58	0	3.9	0
8.76	29.9	1.06	1.66	3.41	0.068
8.94	29.9	2.39	3.29	3.34	0.127
10.2	30.1	4.79	5.89	2.95	0.153
11.0	30.3	6.65	7.75	2.75	0.160
11.7	30.5	8.91	10.3	2.61	0.177
11.0	30.3	6.92	8.07	2.75	0.167
10.2	30.2	4.52	5.62	2.96	0.146
9.3	30.0	2.66	3.56	3.22	0.122
8.3	29.8	0.53	1.03	3.59	0.05
7.3	29.7	-1.33	-0.63	4.07	-
10.1	30.2	4.8	5.9	2.99	0.158
10.9	30.3	6.4	7.5	2.78	0.160
11.5	30.5	8	9.2	2.65	0.168
12.4	30.6	9.8	11.2	2.47	0.162
13.7	30.6	12.3	13.8	2.23	0.148

As can be seen from the Table 2, losses on the rotor in the absence of wind reach almost 5 kW. If these losses could be eliminated, the efficiency of the turbine would exceed 40 %.

The relatively low efficiency of a single-blade rotor which at a high Reynolds number $Re = 1.9 \cdot 10^6$ is almost the same as that of the GAW-1 wing model with Reynolds number three times lower (Fig. 28) may be associated with a low solidity of the rotor ($\sigma = 0.11$), as well as

with a large aerodynamic drag made of duralumin with a vertical strut (Fig. 31), and the counterweight.

For testing of wind turbines of greater capacity, other trapezoidal shape blades (Fig. 32) with a length of the central part of 3760 mm and a width of 900 mm, the distance between the axes of the supports 3600 mm, the total length of the blade taking into account the end fillets 8600 mm, excluding fillets-8400 mm were produced.

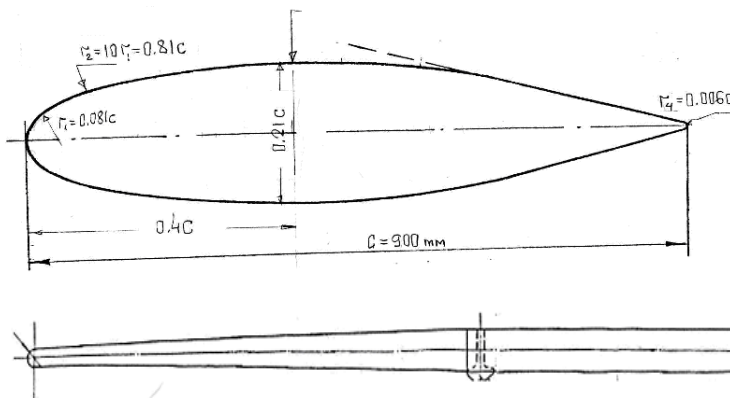


Fig. 32 – Blade for head samples of large wind turbines tested in a large TsAGI pipe: profile NASA0021

The working area of the blade was 6.4 m², the average length of the chord profile was 0.76 m. Blade profile was adopted symmetrical, close to the profile NASA0021. The blades were made of plastic reinforced with fiberglass laying out in special forms with subsequent heat treatment. The surface of the blades came out very smooth. Weight was 78 kg. Blade after manufacturing at the plant was subjected to static loadings, immaterialism aerodynamic loading in separated and unseparated flow, and the action of centrifugal forces. At a given calculated total load on the blade 2800 kg, plastic (resid-

ual) deformation was not observed at loads of 1.5 and 2 times higher than the calculated.

A wind turbine with such blades was designed, manufactured and tested in the same wind tunnel allowing the use of two and four-bladed rotors with a diameter of 9m or more. This traverse of the rotor was made of steel with no intermediate struts with external 465x88mm² section with a round leading edge and smooth narrowing of the bottom edge (the power part of the traverse had a section 234x88mm² in cross-sectional area of the metal of 37 cm², the moments of

inertia 284 2389 cm⁴). Traverse the axis of rotation was attached to the cross planted through the support of the rotor on the axis of the multiplier MP2-500-13-80-00 with a ratio of 18.6. The asynchronous motor 4AM250 8/6 U3 with a rated power of 40 and 50 kW at speeds of 750 and 1000 rpm was used as a generator. Nominal slip was 0.0133 and 0.015; critical slip – 0.0449 and 0.0515; critical torques in generator mode 1017 and 966 Nm; the weight of generator – 510kg; the total mass energy of the node along with the braking system – 1684kg. The rotor crosshead was arranged so that it could be fixed to another set of two blades shifted in plan by 45 degrees from the previous pair. The two-speed generator allowed carrying out tests at two speeds of rotation of the rotor: 38.8 +/-0.1 and 51.6 +/- 0.1 rpm (speed of blades 18.2 ÷ 18.3 and 25.3 ÷ 25.4 m/sec). Previously, it was established that the idling loss of the motor generator is at a low speed of 1.2 to 1.7 kW, at a high speed of 1.4 to 1.9 kW. Power consumption during operation of the motor with reduction was 1.79, and 2.52 kW, respectively. These values of power losses were added to the power measured at the terminals of the generator when calculating the power of the rotor.

The results of measuring the active power at the terminals of the generator carried out by different methods – the registration of instantaneous values of the current vector and the energy meter – which gave similar results showed that at low rotational speed the two-blade machine enters the mode of issuing power at lower flow rates than the four-blade with a rotor of the same diameter at the same rotational speed (Fig. 14). A two-bladed machine proved to be more effective. Increase in the frequency of rotation increases dramatically the losses in the power node, so even in the two-bladed machine power output begins only at a wind speed greater than 8 m/s (Fig. 33).

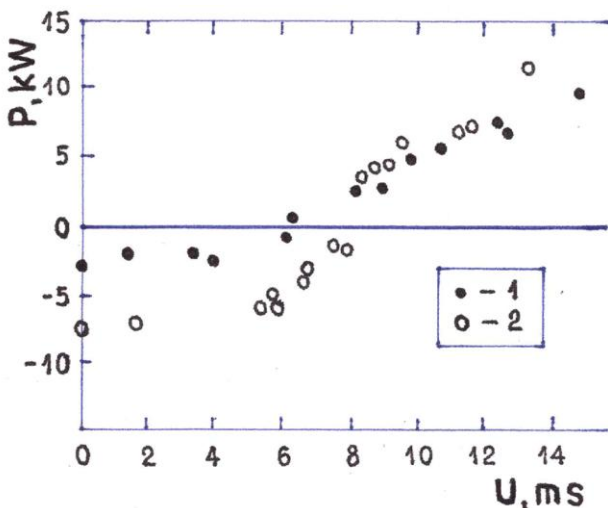


Fig. 33 – Capacity at the terminals of generator of two-bladed machine with a small (1) and large (2) rotation speeds

The output power at all tested machines of orthogonal pulses with a frequency of twice the frequency of rotation. The number of blades affects only the shape of the current curves – the four-blade machine changes the current much smoother and noticeably closer to the sine wave (with some constant component) than, for example, a two-blade machine (Fig. 34).

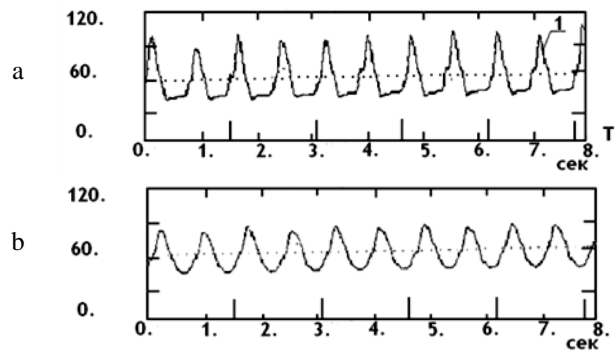


Fig. 34 – Change of the current in one of the generator phases in time at two-blade (a) and four-blade (b) wind turbines at the same rotational speed (38.8 ÷ 39 rpm): 1 – U = 14.7 m/s, P = 11.4 kW; 2 – U = 13.1 m/s, P = 12.9 kW

Since the solidity of the two-bladed machine $\sigma = 0.164$ is closer to the optimal, the efficiency of its C_p rotor is higher than that of the single-bladed machine (Fig. 35).

Based on the results obtained, a two-tier wind turbine with two blades in each tier was manufactured with the same power equipment (Fig. 36). This turbine was not tested. After a small reconstruction optimizing the angle of rotation of the blades and increasing the rigidity of the traverse with improving their flowability, this installation can be used as a demonstration network machine.

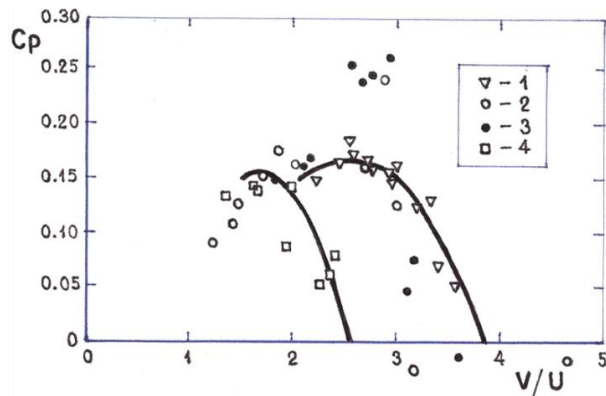


Fig. 35 – Energy efficiency of the rotors: 1 – single-blade rotor; 2, 3 – double-blade rotor at low (2) and high (3) rotational speeds; 4 – four-blade rotor at low rotational speed

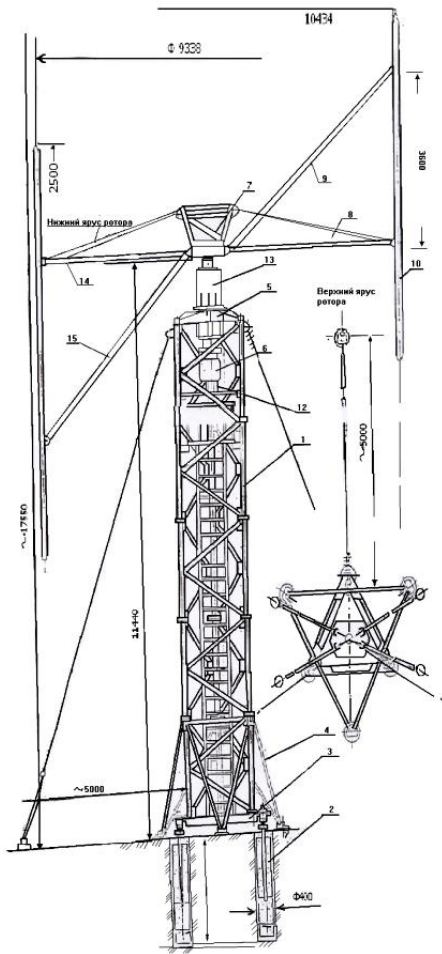


Fig. 36 – Network wind turbine with a gear-motor 50 kW and two tiers with two blades each



International Publishing House for scientific periodicals "Space"



Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

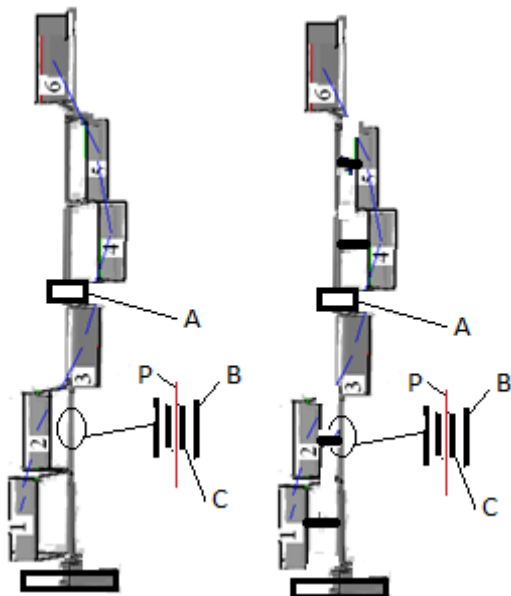


Fig. 37 – Balanced six-tier single-blade turbine (left):
 A – support-generator fixed unit; B – rotating shaft of the turbine, carrying the blades; C – fixed support stand, bearing the support-generator unit A;
 P – power output cable and turbine control.
 Scheme of the cantilever for supporting the blades (right)

With reference to the subject above, it is important to reduce the number of traverses using, for example, single-blade balanced helical turbines in cantilever or double-rotor design. The aerodynamic quality of the helical blade may be maintained, for instance, by arranging thin protrusions perpendicular to the axis of rotation every 60° along the axis of the turbine.

Reducing the number of traverse can be achieved by placing them against the midpoints of the working blades, and not at the ends. This, however, can reduce the aerodynamic quality of the blades. The pulsation of the bending moment in the support is eliminated when the support is located in the center of the turbine (Fig. 37).

Obviously six tiers of a single-blade turbine can be replaced by three tiers of a double-blade turbine or two tiers of a three-blade turbine arranged in the same scheme. In this case, the blades of the upper and lower turbines can be oriented in the opposite way which will ensure the counter rotation of these turbines. This design will allow the use of a generator with double the speed of intersection of magnetic fields and improved economic performance.

According to the scheme of Fig. 37 turbines are expected to have the lowest cost per unit of capacity and output. The installed capacity is determined by the dimensions of the blades and the diameter of the turbine.

With the cheap production of blades available in the Russian Federation, the turbines under the scheme Fig. 38 with chord of 160mm or 180mm (heavier, stronger and expensive) may have a capacity of several kilowatts. The transition to the dimensions of the modern aircraft wings allows us to move to large wind turbines, focused on the use in the power system. The power of such machines may be of the order of megawatts.

4. Double-acting turbine

Any version of a high-speed orthogonal turbine has poor starting characteristics: the turbines have a low starting torque, do not overcome the deceleration of rest in the supports and the generator, and are not unwound from a stationary state. It does not matter for machines operating in the power system – they are untwisted by their generator in the engine mode. In the small machines with an isolated energy consumer for the promotion of the turbine, a starting system is used in the form of a Savonius unit (Fig. 38).

In the modern author's design, the acceleration system is performed in the form of a spiral with a radius smaller than the radius of the working blade in 2÷3 times. These two helices allow you to run a hard-

balanced design with no central shaft – a console or frame, on two semi-shafts (Fig. 39).

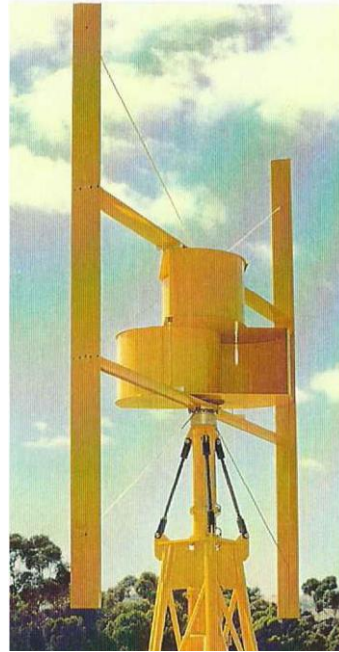


Fig. 38 – Orthogonal wind turbine with acceleration turbine Savonius on the axis

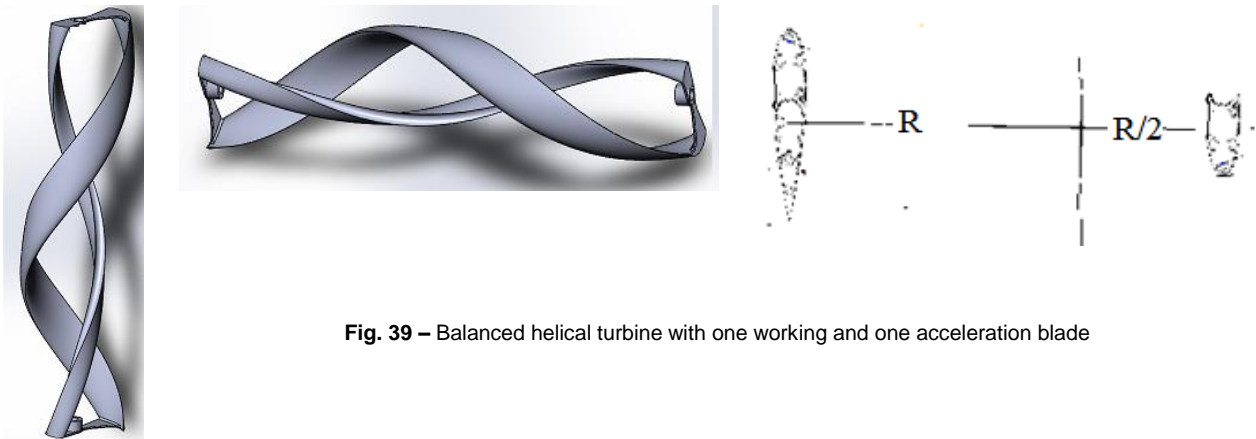


Fig. 39 – Balanced helical turbine with one working and one acceleration blade

A cantilever version of the model of a wind turbine with a double-acting turbine in a small wind tunnel is shown in Fig. 40.

Fig. 40 – The console model of wind turbine with turbine double action. Helical turbine double action with constructive ties between the blades: 1 – working blade; 2 – blade overlocking; 3 – thin flat constructive communication preventing longitudinal shifting



International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Appropriate choice of mass of the upper stage of the blades and installation on each of the blades the structurally associated thin spacer plates prevent longitudinal (along the axis) flow that makes the turbine a tough, durable and, probably, highly effective (Fig. 41).

Turbines can be located on a magnetic suspension combined with the generator. When using a turbine in the power system, complet, for example, with an asynchronous motor-generator, when it is possible to stable operation of the turbine at any point of its characteristics, the acceleration blade is not required and the turbine takes a particularly simple form (Fig. 42).

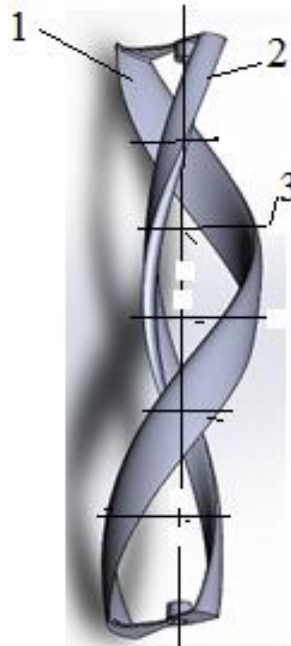


Fig. 41 – Helical turbine double action with constructive ties between the blades:
 1 – working blade;
 2 – blade overlocking;
 3 – thin flat constructive communication preventing longitudinal shifting

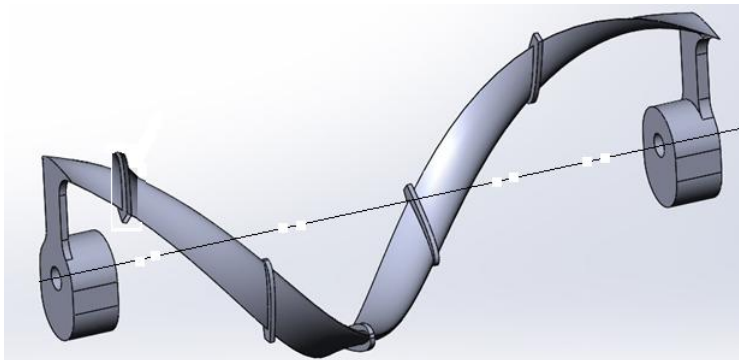


Fig. 42 – Helical turbine assembly for a network with asynchronous generator; thin protrusions perpendicular to the turbine axis are visible on the blades preventing the flow in the boundary layer

In this case, the inertial only require a balancing of the traverse. Balanced cantilever turbine without acceleration blade (for power system), located on a magnetic suspension (Fig. 43) can be highly effective.

However, under the action of the flow it will vibrate – precession. Therefore, it may be advisable to make the large power units in the frame according to the double-bearing scheme (Fig. 1 to the right, Fig. 2).

5. Many blades turbines with large diameter and control position of blades

A scheme with many blades (more than 2 ÷ 3) or placed on a separate traverse or (better) on the single ring suspended on a central pole or supported on a platform via magnetic suspension seems to be more promising for units of large capacity. As a result of the vertical turbulent exchange, the wind speed in front of the rear structure of the blades turns out to be the same as in front of the front (Fig. 44).



Fig. 42 – Spiral turbine model on magnetic suspension





Fig. 44 – The wind speed outside the multi-blade turbine (a – $U = 2.4$ m/s) is almost the same as in front of the rear line of the blades (b – $U = 2.3$ m/s) in the turbine with 5 blades whose height (from the support to the end) is 10 times smaller than the diameter of the turbine

Since the velocity of the incoming flow at different points of the blade route is different, there is an idea to change the position (reversal) of the blades at different points of the route [14] or to jet into the bound-

ary layer of the blade [9]. According to the [14], the rotation of the blade to a different angle at different points of the track allows us to raise the efficiency of turbines (Fig. 45).

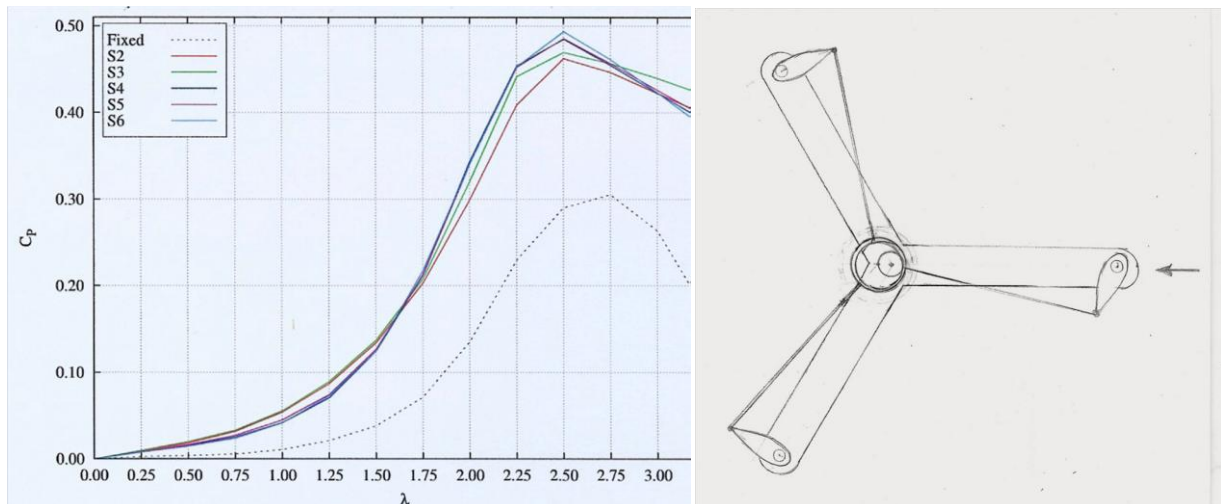


Fig. 45 – Efficiency of an orthogonal turbine with shading 0.3+0.4 at fixed blades (dotted line) and at various schemes of cyclic control of blades rotation (B. Kirke [14])

According to the data published in 2017 [15], the increase in the maximum efficiency of the turbine due to the optimal rotation of the blades can reach about 7%.

The author brought forward a proposal [16] to make a straight rotatable blade such that its center of gravity was located slightly farther from the toe of the profile than its aerodynamic center. At the same point, there is the axis of rotation of the blade (Fig. 46).

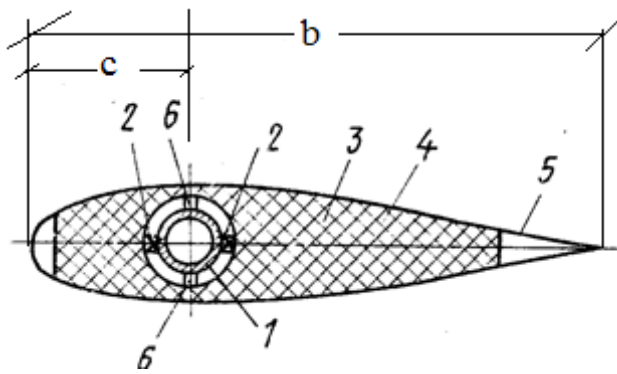


Fig. 46 – A cross-section of the blade is optimal. The rotary pen (3) of the blade with the frame (4) and the skin (5) can rotate relative to the spar (1) with the center combined with the center of gravity of the blade located at a distance $\frac{1}{4} b < c < 1/2$ from the blade wear, on bearings (2) and elastic elements (6). Elastic elements begin to work if the profile deviates from the nominal direction – 50 socks outward from the tangential to the route of the aerodynamic center

The centrifugal force acting on the blade does not affect the position of the blade which unfolds until the aerodynamic center falls into the center of the spar. In the design, this spar is chosen to meet the maximum pulling force of the profile (the critical angle of attack). The aerodynamic center of the NACA 0018 profile at subcritical angles of attack is almost exactly at a distance of $0.25 b$ from the tip of the blade. So the center turns of a blade should be positioned at a distance of, for example, 0.26 to $0.27 b$ from the tip of the blade. The action of the resultant aerodynamic (hydrodynamic) force on this point at an angle of attack less critical slightly compensates elastic reactions in the supports (6). As the angle of attack of the incoming flow increases above the critical center, the force moves to the middle of the profile. The blade rotates under the influence of the arising

moment and the angle of attack decreases with the movement of the aerodynamic center closer to the profile wear, and the wing tends to return to the previous position. When moving the blade on the track, aero(hydro)dynamical force will rotate the blade – it will “scour” about the position corresponding to the maximum pulling force.

This situation occurs only in those sections of the track where the initial angle of rotation of the blade with respect to the tangent to the track of the blade is less than the angle between the vector of the relative velocity of the blade flow and the tangent to the track of the blade (Fig. 47). For Fig. 47 it can be seen that in the over-clocked state when the speed of the blade is much higher than the speed of the oncoming flow, a significant part of the blade route passes with a negative angle of attack (the entire route in the figure 47a and the entire rear part of the route in the figure 47b) regardless of the initial. It is on these sections of the track occurs normal force to the chord of the blade, the force to deploy the blade in the direction of increasing the modulus of the attack angle until the occurrence of separation. After the separation occurs, the normal force moves to the center of the blade and leads it to the initial state. The figure 47a shows that on the front section of the track the equal forces from the stream at small positive angles of attack located at a distance of $b/4$ from the wear of the blade (closer to the wear than the support of the blade O), tends to expand the blade in the direction of reducing the angle of attack. This turning moment is small (the shoulder of the force equal to the length of the OA- $1/4b$ segment is small) and is perceived by the elastic element of the support. Thus, the pulsation of the blade and the corresponding increase in the angles of attack and pulling forces is expected, mainly, on the rear section of the track.

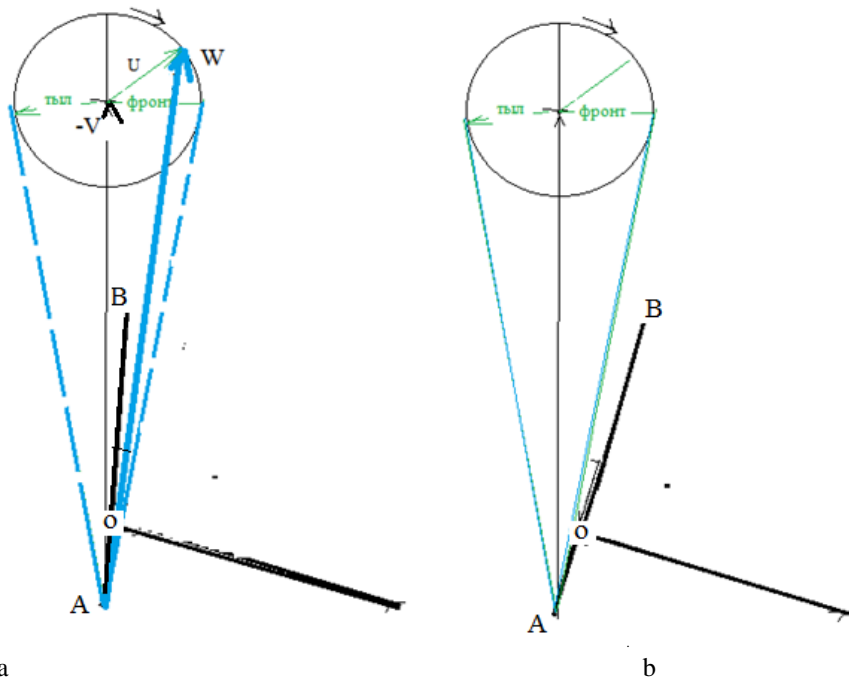


Fig. 47 – The scheme of the flow around the working blade AB, the sock of which (a) moves at a speed V in the flow at a speed U ; the relative speed of the flow around the sock of the blade $W = U - V$: a – the picture with a small deviation from the chord of the blade tangential to the track of the sock; b – with a significant deviation



This proposal, certainly, requires experimental verification and optimization. Jet circulation control also allows us to raise the efficiency of turbines [17, 18]. All these techniques in the conditions of unlimited two-dimensional (flat) flow seem doubtful – the increase in the energy consumption of the flow causes its additional braking, the flow leaves the turbine without significantly increasing its overall energy efficiency. Available experimental “proofs” can be connected with inevitable distorting influence of limitation of cross-section of the experimental channel. A different situation may occur in large-diameter turbines ($D/L \gg 1$) where the role of transverse turbulent transport which restores the energy of the flow in front of the rear structure of the blades is essential [19]. Under these conditions and under conditions of limited flow, the control of the flow around the blades can give quite a noticeable result.

In conjunction with the proposal for Fig. 46 such a turbine can be highly effective.

6. Conclusion

The general conclusion is that in the limitless flow among the turbines streamlined by a flat flow (the length of the turbine is much larger than the diameter), the balanced turbines with one blade and a shading of about 0.5 (the chord of the blade is equal to the radius of the turbine) are the most effective. However, such turbines for individual use (in the absence of a powerful electrical network) require the operation of acceleration blades or a special motor generator. The use of multiple blades in one tier and/or the use of multi-tier turbines partially eliminates this problem. At present, the turbines with a capacity of about 1 kW (when the wind is 10m/s) with one, two or three blades in one tier are ready for mass production; the height of the turbine is 2.7 m, diameter is 1.8 m. These units can be advertised as the real objects and as the model units of megawatt power. In 1988, the author of this paper put forward and implemented the idea of using the wings of aircraft in the design of wind turbines that had worked their flight life. Detailed tests of different models of such units were carried out in TsAGI [19]. The first units with capacity 130 and 1000 kW was constructed in the USSR in 1988 and 1991 years (Fig. 48).

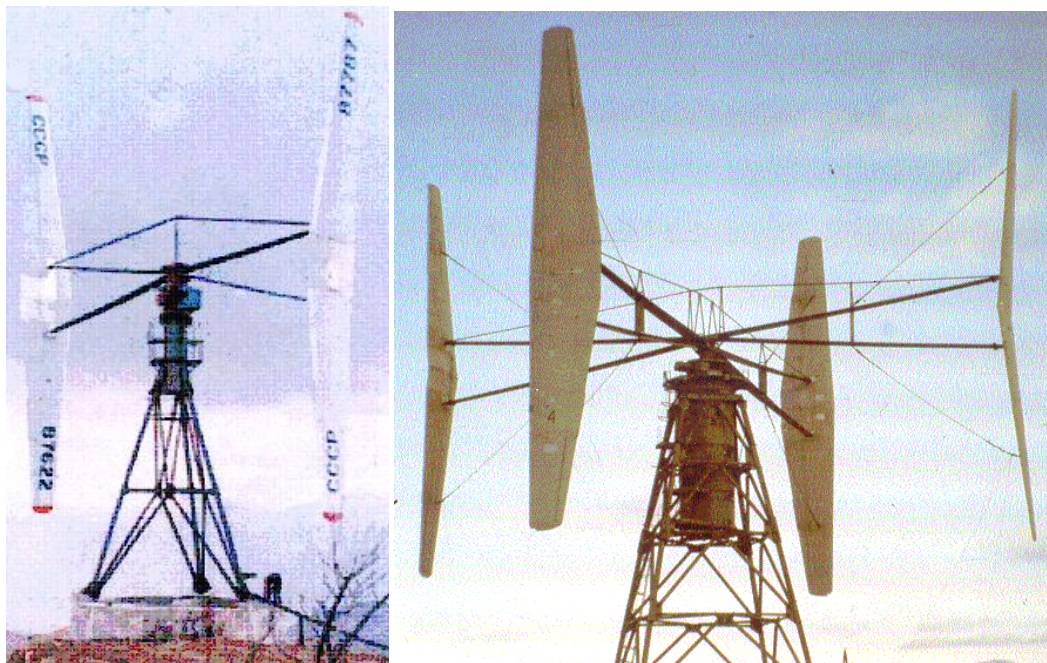


Fig. 48 – The first in the USSR orthogonal wind turbine with a capacity of 130 kW (Chormagzak pass, Tajikistan, 1988) (left) and the largest wind turbine 1000kW (right) with wings from the Yak-40 (Kamchatka 1991)

The experiments and calculations have revealed an important property of such a layout: at a constant speed of rotation, selected, for example, from the condition of maximum unit efficiency at the average annual flow of wind energy, the maximum torque (and maximum power) on the turbine shaft is observed at a wind speed exceeding the nominal one no more than 2 times (at an unchanged, nominal speed).

For high-power turbines, multi-blade machines with a diameter much larger than the height (length) of the blades are the most promising [19]. The project of such a machine with a capacity of 20 MW performed in 2002 showed its high economic efficiency.

References

- [1] Darrieus G. Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to the Flow of Current, U.S. Patent 1834018, December 1931.
- [2] Tom D. Ashwill Measured Data for Sandia 34-Meter Vertical Axis Wind Turbine, SAND91-2228, July 1992, 119 p.
- [3] “L-180 Poseidon” according to Ljungstrom project. Canadian Patent 337.120, Oct.6, 1978, Danish 4146/79.
- [4] Lyatkher V. Wind Power. Turbine Design, Selection, and Optimization. Wiley, 2014.
- [5] Lyatkher V. Tests of head samples of orthogonal wind turbines (Ispytaniya golovnykh obraztsov ortogonalnykh vetroagregatov). *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo*, 2002;3:31–39 (in Russ.).
- [6] Baklushin P.G., Vashkevich K.P., Samsonov V.V. Experimental study of the aerodynamic characteristics of orthogonal vane wind turbines (Eksperimentalnoe issledovanie aerodinamicheskikh harakteristik ortogonalnykh krylchatykh vetrokoles). *Sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta*, iss. 129: Vetroenergeticheskie stantsii, Moscow: 1988, pp. 98–105 (in Russ.).
- [7] McGhee R., Reasley W. Low Speed Aerodynamic Characteristics of a 17-percent-thick Airfoil Section Designed for General Aviation Applications, NASA TN D-7428, 1973.
- [8] Zubkovsky S.L., Lyatkher V.M., Fedorov M.M., Tsvang L.R. Interaction of the wind flow with the wind power plant (Vzaimodeistvie vetrovogo potoka s vetroenergeticheskoi ustanovkoi). *Izv. Academy of Sciences of the USSR, Physics of the Atmosphere and the Ocean*, 1990;26(9):899–905 (in Russ.).
- [9] Samsonov V., Baklushin P.G., Dmitriev A.I., Zosimov A.V. Vertical axial wind turbine with a jet flap (Vertikalno-osevaya vetroturbina so struinym zakrylkom). *Promyshlennaya aerodinamika*, 1990;4(36): (in Russ.).
- [10] Samsonov V., Baklushin P. Comparison of different ways for VAWT aerodynamic control. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992;39(1–3):427–433.
- [11] Lyatkher V. Orthogonal Power Unit. Patent US 8007235 B1, Int.Cl. F03B 3/12(2006.01), Aug. 30, 2011.
- [12] Lyatkher V. Orthogonal turbine having a balanced blade. Patent US 9687715 B1, Int.Cl F03D 3/00, May 23, 2017.
- [13] Rawlings G.W. Parametric Characterization of an experimental vertical axis hydroturbine. B.A.Sc, University of British Columbia, 2008.
- [14] Kirke B. Tests on two small variables pitch cross flow hydrokinetic turbines. *Energy for Sustainable Development*, 2016;31:185–193.
- [15] Rezaeiha A., Kalkman I., Blocken B. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 2017;197:132–150.
- [16] Lyatkher V.M. Wind Turbine Blade. The author's certificate of the USSR No 1325186, Priority from March 5, 1985; registration on March 22, 1987.
- [17] Application of Circulation Controlled Blades for Vertical Axis Wind... M. Wilhelm J.P. Angle G.M. Smith J.E. McGrain D. Angle G.M. Wilhelm J.P. Pertl E.D. Article (PDF Available) in *Energies*; 2013;6(8):3744–3763.
- [18] Shires A., Kourkoulis V. Application of Circulation Controlled Blades for Vertical Axis Wind Turbines. *Energies*, 2013;6(8):3744–3763. Available on: www.mdpi.com/journal/energies Article Application of Circulation Controlled Blades for Vertical Axis Wind Turbines.
- [19] Lyatkher V. Orthogonal units to use energy of flows with the highest efficiency and power. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;16–18:57–67.

Transliteration on BSI



УДК 662.769.21

ОБЗОР СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ БОРА И БОРИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Э. Факиоглу¹, И. Юрум², Т.Н. Везироглу²

¹Университет Сабанджи, факультет инженерных и естественных наук
р-н Тузла, Стамбул, 34956, Турция

тел: +90(532)520-61-81; e-mail: enisf@su.sabanciuniv.edu

²Институт чистой энергии, Университет Майами, США
а/я 248294, Coral Cables, Флорида 33124-0620, США

тел.: +1(305)284-46-66; факс: +1(305)284-47-92

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.086-094

Заключение совета рецензентов: 15.06.17 Заключение совета экспертов: 18.08.17 Принято к публикации: 12.09.17

В работе представлен обзор использования бора для хранения водорода. Бор считается перспективным элементом для хранения водорода в виде его соединений с водородом, или гидридов бора (боранов, борородов), и его наноструктурных форм. Бор также применяется в качестве добавки в никель-металлогидридных аккумуляторах для улучшения совместимости водорода и рабочих характеристик. В настоящей статье в общих чертах представлено краткое описание технологии хранения водорода и более подробно рассмотрены возможные варианты использования в них бора и его соединений.

Ключевые слова: хранение водорода; бористые соединения; усовершенствование электрода; обратимая реакция гидрирования.

A REVIEW OF HYDROGEN STORAGE SYSTEMS BASED ON BORON AND ITS COMPOUNDS

Enis Fakioğlu¹, Yuda Yürüm², T. Nejat Veziroğlu²

¹Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University
Tuzla, Istanbul, 34956, Turkey

tel: +90(532)520-61-81, e-mail: enisf@su.sabanciuniv.edu

²Clean Energy Research Institute, Mechanical Engineering, University of Miami
P.O. Box 248294 Coral Cables, FL 33124-0620, USA

tel.: +1 305 284 46 66, fax: +1 305 284 47 92

doi: 10.15518/isjaee.2018.07-09.086-094

Referred 15 June 2017 Received in revised form 18 August 2017 Accepted 12 September 2017

This work is a survey of utilization of boron for hydrogen storage. Boron is a promising element for hydrogen storage with its chemical hydrides and nanostructural forms. It is also used as an additive in nickel metal hydride battery systems to enhance hydrogen compatibility and performance. This present study will be a brief summary of hydrogen storage technology in general and focus on possible uses of boron and its compounds.

Keywords: hydrogen storage; boron compounds; electrode improvement; reversible hydrogenation.

* Факиоглу Э., Юрум И., Везироглу Т.Н. Обзор систем хранения водорода на основе бора и бористых соединений // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(07-09):86-94.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2004;29:1371–1376. ©2003 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.



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 энергетики (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» (ISJAEЕ).

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, 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 (ISJAEЕ).

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 book “solar hydrogen energy: the power to save the earth”.

1. Введение

С первых дней становления промышленности человечество непрерывно потребляет природные ресурсы, не задумываясь об экологических последствиях и истощении их запасов. Наиболее серьезным последствием использования ископаемого топлива является глобальное потепление, уносящее сотни жизней в странах с теплым климатом, вызывающее глобальное повышение уровня моря, которое несет угрозу затопления городам в прибрежных зонах и служит причиной возникновения множества других стихийных бедствий, включая наводнения, ураганы, лесные пожары и т.д. Теперь человечество оказалось перед выбором: либо остановить истощение природных ресурсов и ускорить переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), либо продолжить потребление ископаемого топлива и поставить мир на грань катастрофы. Авторы данной статьи надеются, что будет выбран первый вариант.

В настоящее время можно наблюдать активное развитие таких чистых энергетических технологий, как солнечная энергия, энергия ветра, гидроэнергия, энергия биомассы, геотермальная энергия, энергия приливов и отливов, а также волноэнергетика. Основная проблема данного направления заключается в сложности хранения и транспортирования энергии, полученной из перечисленных источников. Передача электроэнергии на далекие расстояния посредством

электрических сетей связана с заметными потерями, поэтому, очевидно, для всех перечисленных источников энергии требуется энергоноситель, которым может стать водород, знаменующий наступление новой эры – Эры водорода.

Водород можно получать различными способами, полностью исключая выброс вредных веществ и парниковых газов, а по мере развития технологий его стоимость станет вполне конкурентоспособной [1]. Водород может без потерь переносить энергию на тысячи километров, расходуя лишь небольшое количество на систему подкачки. Существует несколько различных подходов к проблеме транспортирования и хранения водорода. В состав традиционных систем хранения входят классические баллоны высокого давления и изолированные резервуары с жидким водородом. Хранение водорода в углеводородах также считается традиционным способом, однако не рассматривается авторами, поскольку сопровождается выделением углекислого газа. Одним из старейших и стремительно развивающихся методов хранения водорода является использование гидридов металла в аккумуляторных батареях, способных поглощать и выделять водород с незначительными колебаниями давления. Другое перспективное направление – это использование гидридов в бортовых системах хранения водорода. Новый метод предполагает применение таких наноструктурных материалов, как нанотрубки из угле-



рода и нитрида бора, обладающие способностью к сохранению газов внутри своей структуры.

В настоящей работе показаны возможные варианты использования бора для хранения водорода. Авторами рассмотрены различные концепции и представлен их обзор.

2. Методы хранения водорода на основе бора

Методы хранения водорода с использованием бора можно разделить на четыре основных направления: 1) пиролиз (термическое разложение вещества с образованием водорода); 2) гидролиз (реакция вещества с водой с выделением водорода); 3) металлгидридные аккумуляторы, в которых кинетика реакций усиливается за счет внесения добавок бора в материал электродов; 4) нанотрубки из нитрида бора, способные хранить водород в своей структуре и выделять его при нагревании.

2.1 Пиролиз гидридов

Пиролиз – это разложение вещества при нагревании. Гидриды металлов способны генерировать во-

дород путем обратимой реакции пиролиза, которую можно записать в следующем виде:



где M – металл или сплав. Такие реакции являются обратимыми, и водород можно хранить с помощью экзотермических процессов гидрирования (наводороживания) металла под высоким давлением.

Термический анализ тетрагидроборатов щелочных металлов, проведенный Д.С. Стасиневичем (D.S. Stasinevich) [2], позволяет сделать вывод об обратимости процесса термического разложения как минимум на ранних стадиях. В работе А. Зюттеля (A. Zuttel) [3], изучавшего тетрагидридоборат лития $LiBH_4$ (массовая доля водорода 18%), сообщается о трехступенчатом разложении и получении водорода с массовой долей 13,5 %. При температуре 650 °C под давлением 150 бар процесс теряет свою обратимость. Механизм реакций и свойства хранения водорода представлены в табл. 1 и 2.

Другие соединения с высоким содержанием водорода приведены в табл. 3 [4].

Реакции получения водорода из отобранных гидридов
Hydrogen production reactions of selected chemical hydrides

Таблица 1

Table 1

Гидрид/тип реакции	Реакция	Условия	Ссылка
Гидрид лития Пиролиз Восстановление	$2LiH \rightarrow H_2 + 2Li$ $2Li + H_2O \rightarrow 2LiH + \frac{1}{2}O_2$	$\Delta H = 132$ кДж/моль H_2 при 825 °C мин. 0,67 В при 350 °C	[46] [46]
Гидрид магния Гидролиз Восстановление	$MgH_2 + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 2H_2$ N/A		[30] [30]
Тетрагидридоборат лития Гидролиз Восстановление (1) Восстановление (2)	$LiBH_4 + H_2O \rightarrow LiOH + H_3BO_3 + 4H_2$ $3LiH + 4BF_3 \rightarrow BH_3 + 3LiBF_4$ $LiH + BH_3 \rightarrow LiBH_4$		
Тетрагидридоборат лития Пиролиз (1) Пиролиз (2) Пиролиз (3)	$LiBH_4 \rightarrow LiBH_{4-x} + \frac{1}{2}(x)H_2$ $LiBH_{4-x} \rightarrow "LiBH_2" + \frac{1}{2}(1-x)H_2$ $"LiBH_2" \rightarrow LiH + B + \frac{1}{2}H_2$	при 108 °C при 200 °C при 453 °C	[3] [3] [3]
Алюмогидрид лития Пиролиз (1) Пиролиз (2) Восстановление (способ 1) Восстановление (способ 2)	$LiAlH_4 \rightarrow Li_3AlH_6 + 2Al + 3H_2$ $Li_3AlH_6 \rightarrow 3LiH + Al + \frac{3}{2}H_2$ $Li_3AlH_6 + 2Al + 3H_2 \rightarrow 3LiAlH_4$ $4LiH + AlCl_3 \rightarrow LiAlH_4 + 3LiCl$	при 160 °C при 200 °C > 50 бар H_2 в эфире при комнатной температуре	
Борогидрид натрия Гидролиз Восстановление (1) Восстановление (2)	$NaBH_4 + 2H_2O \rightarrow NaBO_2 + 4H_2$ $3NaBH(OMe)_3 + 4BF_3 \rightarrow BH_3 + 3NaBF_4 + 3B(OMe)_3$ $NaBH(OMe)_3 + BH_3 \rightarrow NaBH_4 + B(OMe)_3$	при комнатной температуре с Ru	[27, 28]
Тетрагидридоалюминат натрия Пиролиз (1) Пиролиз (2) Восстановление	$3NaAlH_4 \rightarrow Na_3AlH_6 + 3H_2 + 2Al$ $Na_3AlH_6 \rightarrow 3NaH + Al + \frac{3}{2}H_2$ $NaH + Al + \frac{3}{2}H_2 \rightarrow NaAlH_4$	при 120°C, легирование титаном при 250°C 104°C, 87 атм. H_2 , 17 ч.	[10] [10] [10]



Таблица 2

Характеристики водорода, полученного из различных гидридов

Table 2

Hydrogen performances of selected chemical hydrides

	LiH	MgH ₂	LiBH ₄	LiAlH ₄	NaBH ₄	NaAlH ₄
Рег. номер CAS	7580-67-8	60616-74-2	1649-15-8	16853-85-3	1690-66-2	N/A
Массовая доля H ₂	13	7,6	18,2	10,6	10,5	7,4
Реакция получения H ₂ ¹	Пиролиз	Гидролиз	Гидролиз	Пиролиз	Гидролиз	Пиролиз
Выход реакции, H ₂ масс.%	13	~ 6,2 [47]	13,8 [47]	8,82	10,8 [27, 28]	5,55
Условия абсорбции	при 825 °С, 0,317 бар H ₂ [46]	шаровое фрезерование 20 ч [30]	N/A	при комн. температуре, > 50 атм. H ₂ [9]	N/A	при 104°С, 87 атм. H ₂ , 17 ч. [10]
Условия десорбции	при 950 °С [46]	4 ч. до полного гидролиза [30]	H ₂ (2,5 масс.%) в сочетании с органическими веществами [25]	при 200 °С [9]	при комн. температуре [27, 28]	180 ÷ 235°С [11]
Концентрация (г/см ³)	0,78	1,45	0,66	0,917	1,07	N/A
Тепловой эффект гидролиза (кДж/моль H ₂)	-145	-160	-90	-150	-80	-142

¹Некоторые химические вещества могут производить водород в результате других типов химической реакции, однако в таблице приведена наиболее оптимальная реакция.

Для сравнения были изучены гидриды, не содержащие бор. Несколько исследовательских групп изучали процесс гидрирования/дегидрирования гидрида

лития (LiH), алюмогидрида лития (LiAlH₄) и аланата натрия (NaAlH₄), поскольку эти соединения считаются наиболее подходящими для хранения водорода.

Таблица 3

Гидриды, которые можно использовать для хранения водорода [4]

Table 3

Chemical hydrides possible for hydrogen storage [4]

Гидрид	Массовая доля H ₂	Ссылка на синтетическую процедуру
Al(BH ₄) ₃	16,8	Журнал "Journal of the American Chemical Society" 75 (1953), 209
LiAlH ₂ (BH ₄) ₂	15,2	Патенты Великобритании № 840, 572 и 863,491
Mg(BH ₄) ₂	14,8	Журнал "Inorganic Chemistry" 11 (1972), 929
Ca(BH ₄) ₂	11,5	Необходимо разработать синтетическую процедуру
Ti(BH ₄) ₃	13,0	Журнал "Journal of the American Chemical Society" 71 (1949) 2488
Zr(BH ₄) ₃	8,8	Журнал "Journal of the American Chemical Society" 71 (1949) 2488
Fe(BH ₄) ₃	11,9	Необходимо разработать синтетическую процедуру

В 1966 г. процессы термического разложения LiAlH₄, NaAlH₄ и некоторых других сложных гидридов были описаны в работе Эшби (E.C. Ashby) и Кобеца (P. Kobetz) [5], а в 1967 г. их продолжили В.И. Михеева и С.М. Архипов [6]. В 1971 г. Эшби (E.C. Ashby) и Дилц (J.A. Diltz) получили схожие результаты для термического разложения LiAlH₄ и NaAlH₄ [7]. Согласно их исследованиям, процесс разложения LiAlH₄ проходит в три этапа при температурах 154 °С, 197 °С и 580 °С с получением водорода с массовой долей 7,89 %, как это описано в работе В.И. Михеевой и С.М. Архипова [6]. Подобным образом декомпозиция NaAlH₄ проходит в два этапа при температурах 212 °С и 250 °С и приводит к образованию водорода с массовой долей 5,43 %. В 1997 г. Богданович с группой соавторов сообщили в своей работе [8] о том, что им удалось ускорить эти реакции в обоих направлениях. Тем не менее процесс гидрирования все еще требовал высоких давлений (60 ÷ 150 бар), и необходимо было работать над улучшением условий.

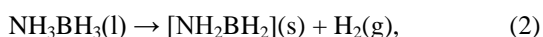
В 1999 г. группой авторов под началом Залуского (L. Zaluski) [9] был предложен так называемый метод шарового фрезерования. Учёные [9] пришли к заключению, что LiAlH₄ не подходит для обратимого хранения водорода ввиду сложности повторного гидрирования этого соединения. Вывод о целесообразности использования сложных гидридов для хранения водорода был сделан после процесса повторного гидрирования NaAlH₄, который проходил под давлением водорода 150 атм. в течение 5 ч. Затем в работе Йенсена (С.М. Jensen) [10] был описан метод сухого легирования катализаторов на основе Ti, повышающий кинетику гидрирования аланатов натрия. А совсем недавно группа учёных под началом Майснера (G.P. Meisner) [11] исследовала кинетику обратимого хранения водорода, которая характерна для аланатов натрия, легированных титаном и платиной. В [11] пришли к выводу о том, что аланат натрия потенциально подходит для хранения водорода при температуре десорбции 200 °С, и процесс повторного гидрирования длится 17 ч при 104 °С под давлением 87 атм.

Реакции получения водорода из различных гидридов, а также свойства этих соединений представлены в табл. 1 и 2. Соединение LiH (массовая доля водорода 13 %) разлагается при 825 °С и восстанавливается из лития и воды при 350 °С под термодинамическим напряжением 0,67 В [46]. Процесс разложения LiAlH₄ (массовая доля H₂ – 10,6 %) проходит в два этапа с выделением водорода с массовой долей 8,2 %. В табл. 1 представлены реакции двухступенчатого разложения NaAlH₄ [10]. Массовая доля водорода на выходе реакции составила 5,55 %.

Кроме сложных гидридов, описанных выше, существует класс соединений азота, выделяющих водород вследствие необратимого термического разложения. Зарождение концепции водородной энергетики в первой половине 70-х гг. XX в. дало старт исследованиям в области хранения и транспортирования водорода в аммиачной форме. Аммиак с массовой долей водорода 17,6 % рассматривался на предмет применения в топливных элементах. Однако основными препятствиями для использования аммиака в бортовых водородных энергетических системах стали его чрезмерная токсичность и опасное воздействие на здоровье человека. Таким образом, в качестве носителей водорода стали рассматриваться аминоборные соединения [12–19].

Исследование процесса пиролиза аминоборного соединения BH₃NH₃, проведенное в 1978 г. группой учёных под началом Геанангела (R.A. Geanangel) [20], показало, что BH₃NH₃ разлагается на BNH и H₂ в два этапа при 120 °С и 155 °С.

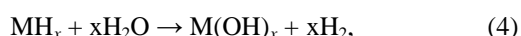
Реакцию разложения можно записать в виде:



В недавно опубликованной работе Вольфа [21] также представлены результаты изучения термического разложения BH₃NH₃. В имеющихся на сегодня публикациях ничего не сказано об обратимости этой реакции, тем не менее в исследовании применялся раствор BH₃NH₃, подготовленный из диаммиаката диборана и литийборогидрида [22, 23]. Исследование показало, что, по мере снижения стоимости получения аминоборных соединений, эти соединения можно будет использовать в бортовых водородно-топливных системах, например в топливных элементах.

2.2. Гидролиз гидридов

Гидролиз – это реакция взаимодействия гидрида с водой с выделением водорода. Реакции могут быть представлены как:



где М – металл, х – его валентность; или



где М – металл 1-й группы, Х – трехвалентный элемент 3-й группы.

Представленные реакции гидролиза являются необратимыми. Однако в работе Коджимы (Y. Kojima) [48], опубликованной совсем недавно, описана концепция обратного преобразования NaBO₂ (продукт гидролиза NaBH₄) с использованием кокса или метана в борогидрид натрия. Реакцию взаимодействия NaBH₄ и MgH₂ можно записать следующим образом:



Для сравнения с пиролизом гидридов исследуются LiBH₄ и NaBH₄. Впервые интерес к использованию борогидрида натрия для получения водорода был вызван публикацией работы Шлезингера (H.I. Schlesinger) в 1952 г. [24]. Было высказано предположение, что NaBH₄ может выступать в качестве агента восстановления и генерации водорода, так как его применение при стандартных условиях способствовало выделению 2,37л водорода/моль раствора, а с ростом температуры или кислотности скорость реакции повышалась. С тех пор было изучено множество видов борогидридов металла и других сложных гидридов. В 1998 г. вышла в свет работа Айелло (R. Aiello) [25] по гидролизу органических соединений LiBH₄ и NaBH₄. Результаты исследования показали, что в менее интенсивных реакциях эти соединения могут производить водород. В 1999 г. Конг (V.C.Y. Kong) [26] изучил работоспособность системы хранения водорода с использованием сложных гидридов для щелочных топливных элементов. Несмотря на то что борогидрид натрия и борогидрид лития не подошли для этой цели, Амэндола (S.C. Amendola) [27, 28] и Айелло (R. Aiello) [29] все же допускали применение NaBH₄ в портативных и безопасных генераторах водорода. В работе Айелло (Aiello) [29] представлены результаты исследования LiBH₄, NaBH₄ и других гидридов для получения водорода посредством гидролиза паром, позволяющие сделать вывод о том, что NaBH₄ и LiBH₄ можно применять в качестве материалов для хранения водорода. В действительности компанией Millennium Cell уже налажено серийное производство NaBH₄ в рамках проекта Hydrogen on Demand™. Водород образуется в процессе контролируемой реакции NaBH₄ и H₂O с выделением тепла, проходящей при комнатной температуре без высокого давления и без побочных реакций и образования опасных побочных продуктов. В табл. 1 и 2 представлены реакции гидролиза гидридов и характеристики водорода, полученного из этих гидридов. В работе Хаута (Hout) [30] приведено исследование гидрида магния, результатом которого стало получение водорода с массовой долей 6,5 % посредством гидролиза. Тепловой эффект гидролиза MgH₂ составляет (– 160)кДж/моль водорода, и гидрид магния в меньшей степени подходит для производства водорода с точки зрения контролируемости реакции. В итоге, в соответствии с [25], сочетание

LiBH₄ с органическими соединениями позволило поучить водород с массовой долей 2,5 %. Тепловой эффект гидролиза LiBH₄ составляет 90 кДж/моль H₂, что лучше показателя MgH₂, но все же выше NaBH₄ с тепловым эффектом 80кДж/моль H₂. По сравнению с другими гидридами, соединение NaBH₄, генерирующее при комнатной температуре водород с массовой долей 10,8 % , выглядит наиболее подходящим для хранения водорода. В табл. 1 приведены различные реакции гидролиза и восстановления, так как процесс гидролиза является необратимым. При получении водорода из NaBH₄ образуется метаборат натрия NaBO₂, который применяется в производстве моющих средств. В заключение следует отметить, что с точки зрения эффективности хранения водорода, соединения, содержащие бор, имеют явные преимущества перед остальными.

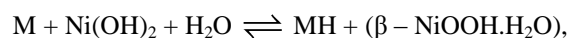
Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на повышении кинетики катализаторов, снижении себестоимости борогидридов и утилизации побочных боратных продуктов, включая разработку и внедрение систем утилизации. Кроме того, изучение других борогидридов, не исследованных ранее, сможет выявить водородосодержащие соединения, подходящие для соответствующих катализаторов.

2.3. Усовершенствование электродов аккумулятора с помощью бора

Серийное производство никель-металлогидридных аккумуляторов началось в начале 90-х гг. XX в. Эти аккумуляторы обладают высокой степенью наводороживания и надежной кинетикой поглощения и

выделения, и поэтому применяются в качестве источника питания бортовых систем.

Всю реакцию, происходящую в топливном элементе, можно записать следующим образом:



где M – металл; при этом в прямой реакции происходит зарядка аккумулятора, а в обратной – его разрядка.

В работе Тадогоро (M. Tadokoro) [31] описаны исследования электрохимических характеристик нестехиометрических наводороженных сплавов с примесями бора. Результаты показали снижение скорости разряда аккумулятора, что, вероятно, объясняется каталитическим эффектом второй фазы, произведённым бором. Затем в 1995 г. Луан (Luan) в своей работе [32] привёл исследования титановых электродов с примесями бора и калия. Автор пришел к заключению, что бор повышает удельную емкость электрода. В 1998 г. вышла статья группы авторов под началом Ху (Hu) [34], в которой сообщалось о повышении циклической устойчивости электродов на основе сплавов редкоземельных металлов с небольшими примесями бора. Влияние примеси бора на производительность сплава MmNi_{3,55}Co_{0,75}Mn_{0,4}Al_{0,3} описано в работе Ёе (Ye) [34], где автор делает вывод о том, что бор снижает емкость хранилища водорода, одновременно повышая эффективность активации и скорость взаимодействия. Другие работы Ёе [35, 36] дали такие же результаты, позволяющие утверждать, что примесь бора способна значительно повысить производительность сплавов для хранения водорода. Количественные результаты этих исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4

Улучшение рабочих характеристик водорода в аккумуляторных электродах с примесями бора

Table 4

Hydrogen performance improvement of battery electrodes with boron addition

Электрод, поглощающий водород	Результаты	Улучшение	Масс.% при-меси В	Ссылка
MmNi _{3,2} CoMn _{0,6} Al _{0,2} B _{0,09}	Повышение емкости со 150 до 250 мАч/г при разрядном токе 200 мА/г	66 %	0,211	[31]
Ti ₂ Ni _{0,99} (KB) _{0,01}	Увеличение количества циклов с 2 до 6 за 300 мин при плотности тока 20 мА/г	300 %	0,065	[32]
Ti ₂ Ni _{0,99} (KB) _{0,05}	Повышение удельной емкости с 162 до 182 мАч/г при плотности тока 20 мА/г	12 %	0,323	[32]
MmNi _{3,65} Co _{0,62} Mn _{0,36} Al _{0,27} B _{0,1}	Уменьшение емкости с 24,4 % до 16,6 % после 300 циклов	50 %	0,0235	[33]
MmNi _{3,55} Co _{0,75} Mn _{0,4} Al _{0,3} B _{0,3}	Повышение интенсивности разряда с 15 % до 60 % при плотности тока 3 000 мА/г	400 %	0,707	[35]

2.4. Наноструктуры нитрида бора для хранения водорода

Применение углеродных наноструктур в технологии хранения водорода вызывает большую дискуссию, и исследования в этой области являются одними из самых актуальных. Водород можно хранить в таких углеродных наноструктурах, как оптическое волокно и филаментное волокно с различными массовыми долями [37–39]. В работе Тиббетса (G.G.

Tibbetts) [40] сообщается о массовой доле углеродных наноструктур на уровне 1 %, при этом повышение температуры и давления ни к чему не привело. В качестве альтернативы можно рассмотреть наноструктуры нитрида бора. Ванг (P. Wang) в своей работе [41] проводит сравнение углеродных наноструктур с наноструктурами нитрида бора с точки зрения емкости хранения водорода и сообщает, что в структуре h-BN можно хранить водород с массовой долей 2,6 %, и

а наноструктурированный графит способен вместить H_2 с массовой долей 7,4 % – в обоих случаях после 80-часового процесса обогащения. Несмотря на то что BN-материал отстает по емкости, условия для десорбции у него на 30° ниже, чем у графита [41]. Недавние исследования фуллереновых BN-материалов, проведенные Оку (Т. Оку) в соавторстве [42], позволили сделать предположение, что фуллерен BN, обладающий лучшей теплостойкостью, хорошо подходит для хранения водорода. Авторы также рассчитали емкость хранения водорода и пришли

к выводу о том, что водород легче хранить в BN-материалах, чем в углеродных фуллеренах [43, 44]. В работе Ма (R. Ma) [45] приведены схожие результаты, показывающие, что при комнатной температуре многослойные нанотрубки BN способны хранить водород с массовой долей до 2,6 %. Это говорит о том, что в ближайшее время наноструктуры BN смогут занять место углеродных материалов в технологии хранения водорода, а механизм адсорбции и десорбции станет темой дальнейших исследований. Результаты исследования представлены в табл. 5.

Таблица 5
Наноструктуры нитрида бора для хранения водорода
Table 5
Boron nitride nanostructures for hydrogen storage

Результаты	Ссылка
Получение H_2 с массовой долей 2,6 % после 80 ч фрезерования; десорбция при 570 К	[41]
Гексагональное кольцо $B_{36}N_{36}$ $\Delta E = 14eV$ (на 14,5 % лучше, чем C_{60})	[43]
Получение H_2 с массовыми долями 1,8 ÷ 2,6 % под давлением 10 МПа при комнатной температуре	[45]
Фуллерены BN проявили способность хранить H_2 с массовой долей 3 %	[46]

3. Заключение

В работе представлен обзор технологий хранения водорода на основе бора и отмечена актуальность этих технологий. Бор и его соединения играют крайне важную роль в концепции водородной экономики, поэтому предметом дальнейших исследований должны стать снижение себестоимости и использование гидридов бора для хранения водорода, а также повышение емкости хранилища водорода в наноструктурах на основе бора и в комплексе борана с аммиаком. Другой перспективной темой исследований может стать применение металлгидридных аккумуляторов с небольшими примесями бора на электродах.

Список литературы

[1] Momirlan, M. [Text] / M. Momirlan, T.N. Veziroglu // Renewable Sustainable Energy Rev. – 2002. – Vol. 6. – P. 141–79.
 [2] Stasinevic, D.S. [Text] / D.S. Stasinevic, G.A. Egorenko // Russ. J. Inorg. Chem. – 1968. – Vol. 13. – No 3. – P. 341–3.
 [3] Zuttel, A. [Text] / Zuttel A. [et al.] // J. Power Sources. – 2003. – Vol. 118. – P. 1–7.
 [4] Slattery, D.K. [Text] / D.K. Slattery, M.D. Hampton // Proceedings of the 2002 US DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-610-32405, Florida.
 [5] Ashby, E.C. [Text] / E.C. Ashby, P. Kobetz // Inorg. Chem. – 1966. – Vol. 5. – P. 1615.
 [6] Mikhieva, V.I. [Text] / V.I. Mikhieva, S.M. Arkhipov // Russ. J. Inorg. Chem. – 1967. – Vol. 12. – P. 1066.
 [7] Dilts, J.A. [Text] / J.A. Dilts, E.C. Ashby // Inorg. Chem. – 1971. – Vol. 11. – No 6. – P. 1230–6.
 [8] Bogdanovic, B. [Text] / B. Bogdanovic, M. Schwickardi // J. Alloys Compounds. – 1997. – Vol. 253–254. – P. 1–9.

[9] Zaluski, L. [Text] / L. Zaluski, A. Zaluska, J.O. Strom-Olsen // J. Alloys Compounds. – 1999. – Vol. 290. – P. 71–8.
 [10] Jensen, C.M. [Text] / C.M. Jensen [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy. – 1999. – Vol. 24. – P. 461–5.
 [11] Meisner, G.P. [Text] / G.P. Meisner [et al.] // J. Alloys Compounds. – 2002. – Vol. 337. – P. 254–63.
 [12] Artz G.D., Grant L.R. US Pat. 4468263, August 28, 1984.
 [13] Ayers O.E., Patrick R.E. US Pat. 3948699, April 6, 1976.
 [14] Chew W.M., Ayers O.E., Murfree J.A., Martignoni P. US Pat. 4061512, December 20, 1977.
 [15] Chew W.M., Ayers O.E., Murfree J.A., Martignoni P. US Pat. 4064225.
 [16] Beckert W.F., Barber W.H., Dengel O.H. US Pat. 4231891, November 4, 1980.
 [17] English W.D., Chew W.M. US Pat. 4315786, February 16, 1982.
 [18] Chew W.M., Murfree J.A., Martignoni P., Nappier H.A., Ayers O.E. US Pat. 4157927, June 12, 1979.
 [19] Cavalleri, R.J. [Text] / R.J. Cavalleri // Hydrogen Energy Part B. Proceedings of Hydrogen Economy Miami Energy Conference, Florida. – 1975. – P. 677–684.
 [20] Hu, M.G. [Text] / M.G. Hu, R.A. Geanangel, W.W. Wendlandt // Thermochim Acta. – 1978. – Vol. 23. – P. 249–55.
 [21] Wolf, G. [Text] / G. Wolf [et al.] // Thermochim Acta. – 2000. – Vol. 343. – P. 19–25.
 [22] Shore, S.G. [Text] / S.G. Shore, R.W. Parry // J. Am. Chem. Soc. – 1957. – Vol. 77. – P. 6084–5.
 [23] Shore, S.G. [Text] / S.G. Shore, R.W. Parry // J. Am. Chem. Soc. – 1958. – Vol. 80. – P. 12–5.
 [24] Schlesinger, H.I. [Text] / H.I. Schlesinger [et al.] // J. Am. Chem. Soc. – 1953. – Vol. 75. – P. 215–9.



- [25] Aiello, R. [Text] / R. Aiello [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1998. – Vol. 23. – No 12. – P. 1103–8.
- [26] Kong, V.C.Y. [Text] / V.C.Y. Kong [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1999. – Vol. 24. – P. 665–75.
- [27] Amendola, S.C. [Text] / S.C. Amendola [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2000. – Vol. 25. – P. 969–75.
- [28] Amendola, S.C. [Text] / S.C. Amendola [et al.] // *J. Power Sources*. – 2000. – Vol. 85. – P. 186–9.
- [29] Aiello, R. [Text] / R. Aiello, J.H. Sharp, M.A. Matthews // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1999. – Vol. 24. – P. 1123–30.
- [30] Huot [Text] / Huot, G. Liang, R. Schulz // *J. Alloys Compounds*. – 2003. – Vol. 353. – P. L12–5.
- [31] Tadokoro, M. [Text] / M. Tadokoro [et al.] // *J. Alloys Compounds*. – 1993. – Vol. 192. – P. 179–81.
- [32] Luan, B. [Text] / B. Luan [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1996. – Vol. 21. – No 5. – P. 373–9.
- [33] Hu, W.K. [Text] / W.K. Hu, Z. Ye, D. Noreus // *J. Alloys Compounds*. – 1998. – Vol. 280. – P. 314–20.
- [34] Ye, H. [Text] / H. Ye [et al.] // *J. Alloys Compounds*. – 2000. – Vol. 312. – P. 68–76.
- [35] Ye, H. [Text] / H. Ye [et al.] // *J. Alloys Compounds*. – 2002. – Vol. 330–332. – P. 866–70.
- [36] Ye, H. [Text] / H. Ye [et al.] // *J. Power Sources*. – 2002. – Vol. 103. – P. 293–9.
- [37] Wu, X.B. [Text] / X.B. Wu [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2000. – Vol. 25. – P. 262.
- [38] Mellor, I.M. [Text] / I.M. Mellor, R.J. Mortimer, M. Turpin // *Ext. Abst. 24th Biennial Conference on Carbon, Charleston*. – 1999. – P. 623.
- [39] Fan, Y.Y. [Text] / Y.Y. Fan [et al.] // *Carbon*. – 1999. – Vol. 37. – P. 1649.
- [40] Tibbetts, G.G. [Text] / G.G. Tibbetts, G.P. Meisner, C.H. Olk // *Carbon*. – 2001. – Vol. 39. – P. 2291–301.
- [41] Wang, P. [Text] / P. Wang [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80. – No 2. – P. 318–20.
- [42] Oku, T. [Text] / T. Oku [et al.] // *Int. J. Inorg. Mater.* – 2001. – Vol. 3. – P. 597–612.
- [43] Oku, T. [Text] / T. Oku, I. Narita // *Physica B*. – 2002. – Vol. 323. – P. 216–8.
- [44] Oku, T. [Text] / T. Oku, M. Kuno // *Diamond Relat. Mater.* – 2003. – Vol. 12. – P. 840–5.
- [45] Ma, R. [Text] / R. Ma [et al.] // *J. Am. Chem. Soc.* – 2002. – Vol. 124. – P. 7672–3.
- [46] Oertel, M. / M. Oertel [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1987. – Vol. 12. – No 4. – P. 211–7.
- [47] Zuttel, A. [Text] / A. Zuttel [et al.] // *Hydrogen desorption from lithiumtetrahydroboride. Proceedings, 14th WHEC, June 2002*.
- [48] Kojima Y., Haga T. [Text] / Y. Kojima, T. Haga // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2003. – Vol. 28. – P. 989–93.
- [2] Stasinevic D.S., Egorenko G.A. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 1968;13(3):341–3.
- [3] Zuttel A., Wenger P., Rentsch S., Sudan P., Mauron Ph., Emmenegger Ch. *J. Power Sources*, 2003;118:1–7.
- [4] Slattery D.K., Hampton M.D. *Proceedings of the 2002 US DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-610-32405, Florida*.
- [5] Ashby E.C., Kobetz P. *Inorg. Chem.*, 1966;5:1615.
- [6] Mikhieva V.I., Arkhipov S.M. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 1967;12:1066.
- [7] Dilts J.A., Ashby E.C. *Inorg. Chem.*, 1971;11(6):1230–6.
- [8] Bogdanovic B., Schwickardi M. *J. Alloys Compounds*, 1997;253–254:1–9.
- [9] Zaluski L., Zaluska A., Strom-Olsen J.O. *J. Alloys Compounds*, 1999;290:71–8.
- [10] Jensen C.M., Zidan R., Mariels N., Hee A., Hagen C. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:461–5.
- [11] Meisner G.P., Tibbetts G.G., Pinkerton F.E., Olk C.H., Balogh M.P. *J. Alloys Compounds*, 2002;337:254–63.
- [12] Artz G.D., Grant L.R. US Pat. 4468263, August 28, 1984.
- [13] Ayers O.E., Patrick R.E. US Pat. 3948699, April 6, 1976.
- [14] Chew W.M., Ayers O.E., Murfree J.A., Martignoni P. US Pat. 4061512, December 20, 1977.
- [15] Chew W.M., Ayers O.E., Murfree J.A., Martignoni P. US Pat. 4064225.
- [16] Beckert W.F., Barber W.H., Dengel O.H. US Pat. 4231891, November 4, 1980.
- [17] English W.D., Chew W.M. US Pat. 4315786, February 16, 1982.
- [18] Chew W.M., Murfree J.A., Martignoni P., Nappier H.A., Ayers O.E. US Pat. 4157927, June 12, 1979.
- [19] Cavalleri R.J. *Hydrogen Energy Part B. Proceedings of Hydrogen Economy Miami Energy Conference, Florida, 1975, p. 677–84*.
- [20] Hu M.G., Geanangel R.A., Wendlandt W.W. *Thermochim. Acta.*, 1978;23:249–55.
- [21] Wolf G., Baumann J., Baitalow F., Hofmann FP. *Thermochim. Acta.*, 2000;343:19–25.
- [22] Shore S.G., Parry R.W. *J. Am. Chem. Soc.*, 1957;77:6084–5.
- [23] Shore S.G., Parry R.W. *J. Am. Chem. Soc.*, 1958;80:12–5.
- [24] Schlesinger H.I., Brown H.C., Finholt A.E., Gilbreath J.R., Hoekstra H.R., Hyde E.K. *J. Am. Chem. Soc.*, 1953;75:215–9.
- [25] Aiello R., Matthews M.A., Reger D.L., Collins J.E. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1998;23(12):1103–8.
- [26] Kong V.C.Y., Foulkes F.R., Kirk D.W., Hinatsu J.T. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:665–75.
- [27] Amendola S.C., Sharp-Goldman S.L., Janjua M.S., Spencer M.S., Kelly M.T., Petillo P.J., Binder M. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2000;25:969–75.

References

- [1] Momirlan M., Veziroglu T.N. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2002;6:141–79.



- [28] Amendola S.C., Sharp-Goldman S.L., Janjua M.S., Spencer N.S., Kelly M.T., Petillo P.J., Binder M. *J. Power Sources*, 2000;85:186–9.
- [29] Aiello R., Sharp J.H., Matthews M.A. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:1123–30.
- [30] Huot, Liang G., Schulz R. *J. Alloys Compounds.*, 2003;353: L12–5.
- [31] Tadokoro M., Nogami M., Chikano Y., Kimoto M., Ise T., Nishio K., Furukawa N. *J. Alloys Compounds.*, 1993;192:179–81.
- [32] Luan B., Cui N., Zhao H.J., Liu H.K., Dou S.X. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1996;21(5):373–9.
- [33] Hu W.K., Ye Z., Noreus D. *J. Alloys Compounds*, 1998;280:314–20.
- [34] Ye H., Zhang H., Wu W.Q., Huang T.S. *J. Alloys Compounds*, 2000;312:68–76.
- [35] Ye H., Huang Y.X., Huang T.S., Zhang H. *J. Alloys Compounds*, 2002;330–332:866–70.
- [36] Ye H., Huang Y., Chen J., Zhang H. *J. Power Sources*, 2002;103:293–9.
- [37] Wu X.B., Chen P., Lin J., Tan K.L. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2000;25:262.
- [38] Mellor I.M., Mortimer R.J., Turpin M. *Ext. Abst. 24th Biennial Conference on Carbon*, Charleston, 1999, p. 623.
- [39] Fan Y.Y., Liao B., Liu M., Wei Y.L., Cheng M.Q.L., Cheng H.M. *Carbon*, 1999;37:1649.
- [40] Tibbetts G.G., Meisner G.P., Olk C.H. *Carbon*, 2001;39:2291–301.
- [41] Wang P., Orimo S., Matsushima T., Fujii H. *Appl. Phys. Lett.*, 2002;80(2):318–20.
- [42] Oku T., Kuno M., Kitahara H., Narita I. *Int. J. Inorg. Mater.*, 2001;3:597–612.
- [43] Oku T., Narita I. *Physica B*, 2002;323:216–8.
- [44] Oku T., Kuno M. *Diamond Relat. Mater.*, 2003;12:840–5.
- [45] Ma R., Bando Y., Zhu H., Sato T., Xu C., Wu D. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002;124:7672–3.
- [46] Oertel M., Weirich W., Kugler B., Lucke L., Pietsch M., Winkelmann U. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1987;12(4):211–7.
- [47] Zuttel A., et al. Hydrogen desorption from lithiumtetrahydroboride. *Proceedings, 14th WHEC*, June 2002.
- [48] Kojima Y., Haga T. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2003;28:989–93.



SOLIDS Russia 2018 – главное мероприятие по технологиям сыпучих материалов

29 и 30 мая 2018 г. в ЦБК «Экспоцентр» пройдет SOLIDS Russia – ведущее мероприятие в области технологий для различных сыпучих материалов. В рамках международной выставки и конференции российские и международные производители представят оборудование для обработки, переработки, хранения и транспортировки сыпучих материалов. Выставку и конференцию SOLIDS Russia ежегодно посещают коммерческие и технические руководители ведущих химических, пищевых и фармацевтических производств, горнодобывающих предприятий, а также производители пластмасс, удобрений и строительных материалов. Оборудование, которое будет представлено на выставке, охватывает весь технологический комплекс работ с сыпучими материалами, например, внутривозовскую транспортировку, дозирование, классификацию, просев, грохочение, смешивание и измельчение сыпучих материалов. Технические решения для упаковки, хранения, перевозки, а также пожаро- и взрывозащиты дополняют продуктовые разделы мероприятия. На данный момент идет активное формирование экспозиции. Традиционно параллельно к выставке пройдет конференция, посвященная актуальным вопросам технологического развития отрасли сыпучих материалов. Планируется рассмотреть перспективы российского машиностроения и оборудования иностранного производства в свете программы импортозамещения. SOLIDS Russia 2018 – это спрос и предложение на рынке технологий для различных сыпучих материалов на одной площадке.

Актуальные темы в областях переработки, обработки, хранения и транспортировки сыпучих материалов, а также вопросы безопасности и охраны окружающей среды будут рассмотрены на конференции в течение двух дней мероприятия.

Эксперты отрасли представят обзор рынков, актуальные проекты, тематические исследования и инновационные технологии в отрасли сыпучих материалов.

Посетить конференцию будет интересно руководителям компаний и производств, главным инженерам и техническим специалистам, представителям транспортных отделов промышленных предприятий.

К выступлению приглашены ведущие специалисты и производители оборудования, представители университетов и проектных институтов.

Для экспонентов SOLIDS Russia 2018 участие в конференции **БЕСПЛАТНО!**

Для компаний, не являющихся экспонентами выставки, стоимость участия составляет 1000 евро (без учёта НДС).

Наши контакты:

Лилия Куклина
Тел. + 7 (926) 529 8385
lilia.kuklina@businessmediarussia.ru

Кристина Столярова
Тел. +49 (0)89 127 165 130
kristina.stolyarova@easyfairs.com

<http://solids-russia.ru/ru/>

- [28] Amendola S.C., Sharp-Goldman S.L., Janjua M.S., Spencer N.S., Kelly M.T., Petillo P.J., Binder M. *J. Power Sources*, 2000;85:186–9.
- [29] Aiello R., Sharp J.H., Matthews M.A. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:1123–30.
- [30] Huot, Liang G., Schulz R. *J. Alloys Compounds.*, 2003;353: L12–5.
- [31] Tadokoro M., Nogami M., Chikano Y., Kimoto M., Ise T., Nishio K., Furukawa N. *J. Alloys Compounds.*, 1993;192:179–81.
- [32] Luan B., Cui N., Zhao H.J., Liu H.K., Dou S.X. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1996;21(5):373–9.
- [33] Hu W.K., Ye Z., Noreus D. *J. Alloys Compounds*, 1998;280:314–20.
- [34] Ye H., Zhang H., Wu W.Q., Huang T.S. *J. Alloys Compounds*, 2000;312:68–76.
- [35] Ye H., Huang Y.X., Huang T.S., Zhang H. *J. Alloys Compounds*, 2002;330–332:866–70.
- [36] Ye H., Huang Y., Chen J., Zhang H. *J. Power Sources*, 2002;103:293–9.
- [37] Wu X.B., Chen P., Lin J., Tan K.L. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2000;25:262.
- [38] Mellor I.M., Mortimer R.J., Turpin M. *Ext. Abst. 24th Biennial Conference on Carbon*, Charleston, 1999, p. 623.
- [39] Fan Y.Y., Liao B., Liu M., Wei Y.L., Cheng M.Q.L., Cheng H.M. *Carbon*, 1999;37:1649.
- [40] Tibbetts G.G., Meisner G.P., Olk C.H. *Carbon*, 2001;39:2291–301.
- [41] Wang P., Orimo S., Matsushima T., Fujii H. *Appl. Phys. Lett.*, 2002;80(2):318–20.
- [42] Oku T., Kuno M., Kitahara H., Narita I. *Int. J. Inorg. Mater.*, 2001;3:597–612.
- [43] Oku T., Narita I. *Physica B*, 2002;323:216–8.
- [44] Oku T., Kuno M. *Diamond Relat. Mater.*, 2003;12:840–5.
- [45] Ma R., Bando Y., Zhu H., Sato T., Xu C., Wu D. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002;124:7672–3.
- [46] Oertel M., Weirich W., Kugler B., Lucke L., Pietsch M., Winkelmann U. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1987;12(4):211–7.
- [47] Zuttel A., et al. Hydrogen desorption from lithiumtetrahydroboride. *Proceedings, 14th WHEC*, June 2002.
- [48] Kojima Y., Haga T. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2003;28:989–93.



SOLIDS Russia 2018 – главное мероприятие по технологиям сыпучих материалов

29 и 30 мая 2018 г. в ЦБК «Экспоцентр» пройдет SOLIDS Russia – ведущее мероприятие в области технологий для различных сыпучих материалов. В рамках международной выставки и конференции российские и международные производители представят оборудование для обработки, переработки, хранения и транспортировки сыпучих материалов. Выставку и конференцию SOLIDS Russia ежегодно посещают коммерческие и технические руководители ведущих химических, пищевых и фармацевтических производств, горнодобывающих предприятий, а также производители пластмасс, удобрений и строительных материалов. Оборудование, которое будет представлено на выставке, охватывает весь технологический комплекс работ с сыпучими материалами, например, внутривозовскую транспортировку, дозирование, классификацию, просев, грохочение, смешивание и измельчение сыпучих материалов. Технические решения для упаковки, хранения, перевозки, а также пожаро- и взрывозащиты дополняют продуктовые разделы мероприятия. На данный момент идет активное формирование экспозиции. Традиционно параллельно к выставке пройдет конференция, посвященная актуальным вопросам технологического развития отрасли сыпучих материалов. Планируется рассмотреть перспективы российского машиностроения и оборудования иностранного производства в свете программы импортозамещения. SOLIDS Russia 2018 – это спрос и предложение на рынке технологий для различных сыпучих материалов на одной площадке.

Актуальные темы в областях переработки, обработки, хранения и транспортировки сыпучих материалов, а также вопросы безопасности и охраны окружающей среды будут рассмотрены на конференции в течение двух дней мероприятия.

Эксперты отрасли представят обзор рынков, актуальные проекты, тематические исследования и инновационные технологии в отрасли сыпучих материалов.

Посетить конференцию будет интересно руководителям компаний и производств, главным инженерам и техническим специалистам, представителям транспортных отделов промышленных предприятий.

К выступлению приглашены ведущие специалисты и производители оборудования, представители университетов и проектных институтов.

Для экспонентов SOLIDS Russia 2018 участие в конференции **БЕСПЛАТНО!**

Для компаний, не являющихся экспонентами выставки, стоимость участия составляет 1000 евро (без учёта НДС).

Наши контакты:

Лилия Куклина
Тел. + 7 (926) 529 8385
lilia.kuklina@businessmediarussia.ru

Кристина Столярова
Тел. +49 (0)89 127 165 130
kristina.stolyarova@easyfairs.com

<http://solids-russia.ru/ru/>



ИНФОРМАЦИЯ

INFORMATION

МЕЖДУНАРОДНЫЕ НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCES



Technology, Applications & Opportunities
11 - 12 April 2018
Estrel Convention Center, Berlin, Germany

IDTechEx Show!

11–12 April 2018, Berlin. This event is the most commercially-focused conference and exhibition on graphene and other 2D materials. It is where companies unveil their latest technologies, launch their products, where technologists announce their latest commercially-relevant results, and where suppliers and end users from a variety of industries directly connect. New: Networking match making platform – connect with attendees and organise meetings in advance of the Event Focus focus on commercial progress, real application development, and commercially-relevant innovation Connect suppliers and customers from a variety of end user industries Accelerate value chain creation by co-hosting suppliers, intermediary compounders/formulators, end users Cross-fertilise business by co-locating with highly synergetic events such as printed electronics, wearable technologies, electric vehicles and 3D printing Analyst-designed agenda and networking opportunities.

Event Focus focus on commercial progress, real application development, and commercially-relevant innovation Connect suppliers and customers from a variety of end user industries Accelerate value chain creation by co-hosting suppliers, intermediary compounders/formulators, end users Cross-fertilise business by co-locating with highly synergetic events such as printed electronics, wearable technologies, electric vehicles and 3D printing Analyst-designed agenda and networking opportunities.

What is Graphene & 2D Materials? The graphene industry is going through an interesting period. The number of suppliers has grown, resulting in increased production capacity worldwide. There is continued appetite for investment and the end user interest in graphene and its potential grows surprisingly fast. End-users from many industries now want to evaluate graphene and suppliers are increasingly building up very robust pipelines. The go-to-market strategy is still largely based on substituting existing materials. Here, graphene is still in the realm of offering more for more (or the same at the best) although a more-for-same value proposition may soon be reached if cost reductions exceed their current rapid trajectory. The first wave of products has already hit the markets. Most are small volumes and somewhat gimmicky, capitalising on the good brand of 'graphene'. The best however is to yet to come as new applications steadily make their way through the long and winding qualification tunnels.

The IDTechEx Show! Graphene & 2D Materials is co-located alongside a series of synergistic events on printed electronics wearable, 3D Printing and electric vehicles. Each of these is a full two-day executive conference, co-located with a common exhibition. We co-locate these events because there is strong overlap across these topics, exposing you to the full relevant supply chains and customer and supplier bases, saving you time and money from attending separate events.

<https://www.idtechex.com/graphene-europe/show/en/>



International Publishing House for scientific periodicals "Space"



Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Всероссийская научная конференция и XI молодежная школа «Возобновляемые источники энергии»

Приглашаем научных сотрудников, преподавателей вузов, студентов, магистрантов, аспирантов принять участие во Всероссийской научной конференции и XI молодежной школе «Возобновляемые источники энергии», которая состоится 3–5 декабря 2018 г. на Географическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований.

Конференция приурочена к 30-летию основания научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии на Географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

Традиционные Всероссийские молодежные школы по возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) проводятся в МГУ имени М.В. Ломоносова с 1999 г. в сотрудничестве с институтами РАН и РАСХН (ОИВТ РАН, ГНУ ВИЭСХ РАСХН и др.). В предыдущей Школе, прошедшей в 2016 г., приняло участие более 300 человек из различных регионов России, а также ближнего и дальнего зарубежья.

В рамках Всероссийской научной конференции и XI научной молодежной Школы планируется проведение лекций ведущих специалистов в области солнечной, ветровой, геотермальной энергетики, малой гидроэнергетики, биоэнергетики, экономики и экологии, возобновляемой энергетики и др. В программу Школы входят также устные и стендовые доклады студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и специалистов с последующим обсуждением представленных работ, проведением конкурса работ и награждением победителей. Планируется проведение консультаций со специалистами, знакомство с компаниями, работающими в области возобновляемой энергетики.

Тематика Всероссийской научной конференции и XI научной молодежной Школы «Возобновляемые источники энергии» охватывает следующие научные направления:

1. Повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.
2. Современные подходы к преобразованию солнечной энергии в тепло: солнечные коллекторы, солнечные системы PV/T и hot-PV.
3. Оптимизация параметров ветроэнергетических установок для получения конкурентоспособных решений и достижения минимума себестоимости производимой электроэнергии.
4. Накопители электрической и тепловой энергии для систем на основе ВИЭ – особенности и ниши применения.
5. Современные виды биотоплива и особенности технологий их получения.
6. Комплексное использование геотермальных месторождений для производства электроэнергии, тепла и извлечения ценных химических соединений.
7. Разработка технических решений в области малой гидроэнергетики для водо- и энергообеспечения
8. Развитие инструментов математического моделирования и инженерных методов расчета оптимальных систем солнечной тепловой и электроэнергетики.
9. Повышение точности оценки ресурсов возобновляемой энергетики и эффективности их использования
10. Экологические аспекты этапов жизненного цикла систем возобновляемой энергетики.
11. Экономика и конкурентоспособность возобновляемой энергетики: реальность и перспективы.
12. Геоинформационное картографирование в возобновляемой энергетике.

Ключевые даты

Первое информационное письмо – март 2018 г.

Прием регистрационных форм и тем докладов – до 1 апреля 2018 г.

Подтверждение участия, второе информационное письмо – до 15 мая 2018 г.

Приём текстов докладов для рецензирования – до 15 сентября 2018 г.

Подтверждение принятия текстов статей, программа конференции – до 1 ноября 2018 г.

Дни работы конференции – 3–6 декабря 2018 г.

Публикация

К началу работы Всероссийской научной конференции и XI научной молодежной Школы «Возобновляемые источники энергии» материалы докладов участников будут опубликованы. Сборник материалов является периодическим изданием, которому присвоен номер ISSN 2312-3354. Все статьи рассматриваются экспертами Школы и рецензируются. Сборник будет размещен в базе данных РИНЦ.

Требования к оформлению публикаций будут размещены на сайте мероприятия.

Культурная программа

Участникам будет предложено посещение музеев, лабораторий и кафедр МГУ, ОИВТ РАН, а также вечерняя программа культурных мероприятий.

Внимание!

Приглашаем к участию вузы, ведущие подготовку специалистов, магистрантов, аспирантов в области возобновляемой энергетики, и компании, работающие в этой сфере для анонсирования своих учебных программ, проектов, возможностей трудоустройства. Информация может быть представлена в стендовом и устном формате.

Организаторы

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии

Контактная информация

E-mail: rsemsu2016@mail.ru

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, МГУ, Географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии

мы на Facebook <https://www.facebook.com/groups/resconference/?ref=bookmarks>

Стоимость участия

ОРГВЗНОС ЗА УЧАСТИЕ НЕ ВЗИМАЕТСЯ.

Участникам предоставляется бесплатно доступ ко всем мероприятиям, публикация в сборнике, раздаточные материалы, кофе-брейки, визовая поддержка иностранным участникам.

<https://lomonosov-msu.ru/rus/event/4889/>



IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

ЭКОЛОГИЯ

22-23 МАРТА 2018
МОСКВА

IX Международный форум «Экология»

Итоги работы первого дня

22 марта 2018 года начал работу IX Международный форум «Экология». В первый день в мероприятии приняли участие более 1 000 представителей из 75 регионов страны и 10 иностранных государств. Своих делегатов для участия на форум отправили все профильные органы федеральной и региональной власти.

Открыл пленарное заседание Николай Валуев, первый заместитель председателя Комитета по экологии и охране окружающей среды Государственной Думы ФС РФ, председатель Общественного совета АНО «Общественный форум «Экология».

«Уверен, что мы сможем с вами активно поработать и составить такой полный итоговый документ – резолюцию, который ляжет на стол всех заинтересованных ведомств, представителей исполнительной власти, экспертов в министерствах, всех тех, для кого слова «экология» и «защита окружающей среды» являются важными», – отметил Николай Валуев.

В свою очередь, Ольга Тимофеева, заместитель Председателя Государственной Думы ФС РФ отметила, что сегодня на форуме представлена вся страна.



Дни работы конференции – 3–6 декабря 2018 г.

Публикация

К началу работы Всероссийской научной конференции и XI научной молодежной Школы «Возобновляемые источники энергии» материалы докладов участников будут опубликованы. Сборник материалов является периодическим изданием, которому присвоен номер ISSN 2312-3354. Все статьи рассматриваются экспертами Школы и рецензируются. Сборник будет размещен в базе данных РИНЦ.

Требования к оформлению публикаций будут размещены на сайте мероприятия.

Культурная программа

Участникам будет предложено посещение музеев, лабораторий и кафедр МГУ, ОИВТ РАН, а также вечерняя программа культурных мероприятий.

Внимание!

Приглашаем к участию вузы, ведущие подготовку специалистов, магистрантов, аспирантов в области возобновляемой энергетики, и компании, работающие в этой сфере для анонсирования своих учебных программ, проектов, возможностей трудоустройства. Информация может быть представлена в стендовом и устном формате.

Организаторы

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии

Контактная информация

E-mail: rsemsu2016@mail.ru

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, МГУ, Географический факультет, НИЛ возобновляемых источников энергии

мы на Facebook <https://www.facebook.com/groups/resconference/?ref=bookmarks>

Стоимость участия

ОРГВЗНОС ЗА УЧАСТИЕ НЕ ВЗИМАЕТСЯ.

Участникам предоставляется бесплатно доступ ко всем мероприятиям, публикация в сборнике, раздаточные материалы, кофе-брейки, визовая поддержка иностранным участникам.

<https://lomonosov-msu.ru/rus/event/4889/>



22-23 МАРТА 2018
МОСКВА

IX Международный форум «Экология»

Итоги работы первого дня

22 марта 2018 года начал работу IX Международный форум «Экология». В первый день в мероприятии приняли участие более 1 000 представителей из 75 регионов страны и 10 иностранных государств. Своих делегатов для участия на форум отправили все профильные органы федеральной и региональной власти.

Открыл пленарное заседание Николай Валуев, первый заместитель председателя Комитета по экологии и охране окружающей среды Государственной Думы ФС РФ, председатель Общественного совета АНО «Общественный форум «Экология».

«Уверен, что мы сможем с вами активно поработать и составить такой полный итоговый документ – резолюцию, который ляжет на стол всех заинтересованных ведомств, представителей исполнительной власти, экспертов в министерствах, всех тех, для кого слова «экология» и «защита окружающей среды» являются важными», – отметил Николай Валуев.

В свою очередь, Ольга Тимофеева, заместитель Председателя Государственной Думы ФС РФ отметила, что сегодня на форуме представлена вся страна.

«Именно благодаря вам России удастся сохранить леса и реки. Вы умеете задавать неудобные, но очень важные вопросы, и провоцировать власть давать вам ответ. Я хочу сказать, что вашими руками сегодня совершаются подвижки в сфере экологии», – обратилась Тимофеева к участникам форума.

На открытии также выступил директор Всемирного фонда дикой природы (WWF) России Игорь Честин и заместитель Министра – начальник Управления Федерального министерства экономики и энергетики Федеративной Республики Германия Ульрих Бентербуш.

По мнению директора WWF, для обеспечения инвестиционной привлекательности экологических проектов необходимо срочное восстановление института экологической экспертизы и экологических фондов. Замминистра министерства экономики и энергетики ФРГ заявил о двусторонней заинтересованности России и Германии в развитии экологического сотрудничества. «Новая энергетическая концепция Германии построена на эффективности для потребителей и на расширении использования возобновляемых источников энергии», – сообщил Ульрих Бентербуш и призвал российское экологическое сообщество еще активнее лоббировать принципы «зеленой экономики». Отметим, что в программе форума запланировано проведение более 20 мероприятий, в том числе выставка технологических достижений в области экологии.

В первый день отраслевое сообщество обсудило государственную политику в сфере охраны окружающей среды, развитие отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами, перспективы развития в России альтернативной энергетики, деятельность нефтегазовых компаний в Арктике, механизмы привлечения инвестиций в экологические проекты, а также экологическое воспитание и эко-добровольчество.

Напомним, что завтра, 23 марта, IX Международный форум «Экология» продолжит свою работу. В деловой программе запланированы дискуссии на такие темы как: ликвидация накопленного экологического ущерба, технологии и внедрение НДТ, охрана лесов, ответственность производителей и импортеров, снижение выброса загрязняющих веществ в атмосферу, переработка и утилизация отходов.

Также состоится круглый стол «Тема экологии в информационной повестке современных СМИ» и заседание Общественного совета АНО «Общественный форум «Экология».

Пресс-служба Форума

В сфере водоснабжения и водоотведения главное – ответственность

В работе IX Международного форума «Экология» принимала участие Марина Гассий – заместитель генерального директора – директор по правовому обеспечению ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», заслуженный юрист Российской Федерации.

В рамках рабочей сессии «Актуальные вопросы водоснабжения и водоотведения: разграничение ответственности за негативное воздействие на окружающую среду» она выступила с докладом о перспективах управления рисками ответственности в сфере водоотведения в условиях обновленного отраслевого и экологического законодательства.

В последние годы в России происходит реформа экологического регулирования: внедряются технологические нормы, которые служат методологической основой для оценки воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Сфера водоотведения не исключение – подобное регулирование в ней введено в соответствии с Федеральным Законом от 29.07.2017 № 225.

В рамках своего выступления Марина Гассий представила системный взгляд на проблему риска наступления ответственности за негативное воздействие на окружающую среду в сфере водоотведения. Речь шла о распределении ответственности между всеми участниками регулируемых отношений, а также о возможных путях управления подобными рисками.

«Сфера водопроводно-канализационного хозяйства – это не только и не столько «право», сколько обязанность и ответственность», – считает Марина Гассий.

IX Международный форум «Экология» состоялся **22–23 марта 2018 года** в Москве в конгресс-парке отеля «Рэдиссон Ройал, Москва».

Организатор:
АНО «ОБЩЕСТВЕННЫЙ
ФОРУМ ЭКОЛОГИЯ»

Оператор форума:



+7 (812) 327-93-70
www.confspb.ru



РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT
COMPANIES AND MANUFACTURERS

191123 Россия
Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., д. 37А
Пресс-центр
Тел.: +7 (812) 643-60-63
tass_spb@tass.ru
tass.ru

21 марта (среда) в 13:00

Изменения климата в Арктике: риски и последствия

В ТАСС (г. Санкт-Петербург) состоится пресс-конференция, посвященная Всемирному дню метеорологии.

О влиянии глобального потепления на природные процессы, происходящие в Арктической зоне, исследованиях полярных циклонов и локальном экологическом мониторинге расскажут ведущий научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Росгидромета **Андрей Киселёв**, проректор по научной работе и взаимодействию с государственными органами и филиалами Российского государственного гидрометеорологического университета **Иван Мушкет**, профессор кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, д.м.н. **Сергей Смышляев**, ведущий научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета, д-р физ.-мат. наук **Елизавета Заболотских**.

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



Asia needs nuclear energy to supply clean and reliable electricity

21 March 2018

“Asia needs nuclear energy to meet its economic, energy and environmental goals” according to Agneta Rising, Director General of World Nuclear Association, who was speaking at the Sustainable Energy Technology Asia 2018 conference in Bangkok, Thailand.

Nuclear energy is growing rapidly in Asia. Over the last five years nuclear generation in Asia increased by 35%.

Asia is a focus of new nuclear build, with 40 of the 56 reactors under construction globally being built in Asian countries. New countries are planning to start using nuclear generation, with construction of Bangladesh’s first reactor underway and preparations progressing in countries such as Jordan, Saudi Arabia and Turkey.

South East Asia

However, plans for nuclear energy are still in the development phase in South East Asia.

South East Asia has become reliant on fossil fuels for electricity supplies, with coal-fired generation increasing dramatically, quadrupling since 2000. Electricity demand has risen sharply in the region and is expected to double over the next 20 years.

“Countries in South East Asia can be part of a global clean energy future by committing to use nuclear energy. This will help reduce pollution, improve air quality and deliver better public health”, said Agneta Rising.

Rising told the conference that international vendors and supply chain companies are ready to work with businesses in the region to bring investment and help develop a highly skilled workforce. To enable this, governments need to establish clear energy policies and develop nuclear energy infrastructure, training and education.

“Nuclear energy will provide a clean and reliable 24/7 supply of electricity at a competitive price”, Rising added.

World Nuclear Association is the international organisation that represents the global nuclear industry. Its mission is to promote a wider understanding of nuclear energy among key international influencers by producing authoritative information, developing common industry positions, and contributing to the energy debate, as well as to pave the way for expanding nuclear business.

Media Contact

Jonathan Cobb: +44(0)20 7451 1536
press@world-nuclear.org



**Toward the tipping point: new research provides
 a reality check on the outlook for renewable energy**

Technology Radar 2018 “Renewable Energy” report – launched today by Lloyd’s Register – analyses the sizeable renewable energy impacts in the next five (5) years and beyond. It provides answers from leading industry experts on their optimism, concerns and investment outlook on tomorrow’s energy mix.

If there were doubts that renewable energy sources could ever compete effectively with oil, natural gas and coal in power generation, developments in the past two years should have dispelled them! But, what will it take for renewable energy to become the primary form of energy consumed?

The Lloyd’s Register 2018 Technology Radar – Renewable Energy study, published today, asks the question: when will renewable energy become the dominant source of energy? Furthermore, the study examines which technologies are likely to have the greatest impact in different countries, and what are the key drivers and inhibitors for success.

The research sought the insights and opinions of leaders across the sector, as well as a survey of 800 professionals and experts around the world. The survey included respondents from organisations across the renewables value chain, including traditional energy companies with renewable energy assets or activities.

Respondents were asked to give their perspective on the challenges that need to be overcome for renewables to be the primary form of energy consumed, the rate of growth in their country and to rate a number of technologies and developments in terms of their potential impact, the amount of time it would take for these technologies to hit the market, and how likely they are to be adopted once they do. Respondents were also asked to reflect on the pace and success of innovation in their sector – and what they see as the major drivers and blockers post 2018.

Key findings include:

Respondents expect grid parity for solar to be achieved first in China (2022), followed by Spain and UAE in 2024, and by Australia and the US in 2025. For wind power generation, grid parity is expected in Germany and UK by 2024, USA and Denmark in 2025, and in Sweden by 2033.

Although a minority of respondents (10%) believe that renewables have already overtaken fossil fuels in their country, or will do so in the next two years, 58% believe that this milestone will not be reached until after 2025.

Renewable economics are unquestionably improving, but 62% of respondents say that high development costs remain the primary argument against pursuing renewables in their country. However, the cost of building solar capacity for utility-scale generation has more than halved in the past 10 years, which has helped to fuel the rapid expansion of solar capacity worldwide since 2014.

More than 45% of the surveyed executives (including 55% of those based in Europe) say that resistance to on-shore wind turbines in their countries is too strong to enable significant growth from this source.

An overwhelming 71% agree that technology advances will do more in the next five (5) years to improve the economic case for renewables than policy or regulatory changes. There is an expectation for advanced metering infrastructure (AMI), demand response management (DRM) systems, networked sensors and accuracy of asset monitoring data to have a beneficial impact on operational performance. However, 36% identify policy inconsistency as an inhibiting factor.

37% of respondents indicate the slow development of storage technologies as the most important factor inhibiting the growth of renewables in the energy mix. Utilities need to be able to call on energy producers for additional power whenever it is required, whether for load balancing or meeting surges. Green hydrogen provides an alternative form of storage to electrochemical batteries as hydrogen fuel cells can store power for considerably longer.

42% of respondents agree that reaching grid parity will not be enough to cause a sustained increase in investment in renewables. Subsidies are critical to support developments in most markets.

“Our latest Technology Radar – Renewable Energy research reflects the most current and forward-looking attitudes, actions, and investment behaviours in both global and local renewable energy markets. These trends are striving to shape tomorrow’s sustainable energy mix and are framing a clear end in sight for a big transformational shift in



РЕКЛАМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ФИРМ И ФИРМ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙADVERTISING MATTERS OF INVESTMENT
COMPANIES AND MANUFACTURERS

191123 Россия
Санкт-Петербург,
Шпалерная ул., д. 37А
Пресс-центр
Тел.: +7 (812) 643-60-63
tass_spb@tass.ru
tass.ru

21 марта (среда) в 13:00

Изменения климата в Арктике: риски и последствия

В ТАСС (г. Санкт-Петербург) состоится пресс-конференция, посвященная Всемирному дню метеорологии.

О влиянии глобального потепления на природные процессы, происходящие в Арктической зоне, исследованиях полярных циклонов и локальном экологическом мониторинге расскажут ведущий научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Росгидромета **Андрей Киселёв**, проректор по научной работе и взаимодействию с государственными органами и филиалами Российского государственного гидрометеорологического университета **Иван Мушкет**, профессор кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, д.м.н. **Сергей Смышляев**, ведущий научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета, д-р физ.-мат. наук **Елизавета Заболотских**.

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



Asia needs nuclear energy to supply clean and reliable electricity

21 March 2018

“Asia needs nuclear energy to meet its economic, energy and environmental goals” according to Agneta Rising, Director General of World Nuclear Association, who was speaking at the Sustainable Energy Technology Asia 2018 conference in Bangkok, Thailand.

Nuclear energy is growing rapidly in Asia. Over the last five years nuclear generation in Asia increased by 35%.

Asia is a focus of new nuclear build, with 40 of the 56 reactors under construction globally being built in Asian countries. New countries are planning to start using nuclear generation, with construction of Bangladesh’s first reactor underway and preparations progressing in countries such as Jordan, Saudi Arabia and Turkey.

South East Asia

However, plans for nuclear energy are still in the development phase in South East Asia.

South East Asia has become reliant on fossil fuels for electricity supplies, with coal-fired generation increasing dramatically, quadrupling since 2000. Electricity demand has risen sharply in the region and is expected to double over the next 20 years.

“Countries in South East Asia can be part of a global clean energy future by committing to use nuclear energy. This will help reduce pollution, improve air quality and deliver better public health”, said Agneta Rising.

Rising told the conference that international vendors and supply chain companies are ready to work with businesses in the region to bring investment and help develop a highly skilled workforce. To enable this, governments need to establish clear energy policies and develop nuclear energy infrastructure, training and education.

“Nuclear energy will provide a clean and reliable 24/7 supply of electricity at a competitive price”, Rising added.

World Nuclear Association is the international organisation that represents the global nuclear industry. Its mission is to promote a wider understanding of nuclear energy among key international influencers by producing authoritative information, developing common industry positions, and contributing to the energy debate, as well as to pave the way for expanding nuclear business.

Media Contact

Jonathan Cobb: +44(0)20 7451 1536
press@world-nuclear.org



**Toward the tipping point: new research provides
 a reality check on the outlook for renewable energy**

Technology Radar 2018 “Renewable Energy” report – launched today by Lloyd’s Register – analyses the sizeable renewable energy impacts in the next five (5) years and beyond. It provides answers from leading industry experts on their optimism, concerns and investment outlook on tomorrow’s energy mix.

If there were doubts that renewable energy sources could ever compete effectively with oil, natural gas and coal in power generation, developments in the past two years should have dispelled them! But, what will it take for renewable energy to become the primary form of energy consumed?

The Lloyd’s Register 2018 Technology Radar – Renewable Energy study, published today, asks the question: when will renewable energy become the dominant source of energy? Furthermore, the study examines which technologies are likely to have the greatest impact in different countries, and what are the key drivers and inhibitors for success.

The research sought the insights and opinions of leaders across the sector, as well as a survey of 800 professionals and experts around the world. The survey included respondents from organisations across the renewables value chain, including traditional energy companies with renewable energy assets or activities.

Respondents were asked to give their perspective on the challenges that need to be overcome for renewables to be the primary form of energy consumed, the rate of growth in their country and to rate a number of technologies and developments in terms of their potential impact, the amount of time it would take for these technologies to hit the market, and how likely they are to be adopted once they do. Respondents were also asked to reflect on the pace and success of innovation in their sector – and what they see as the major drivers and blockers post 2018.

Key findings include:

Respondents expect grid parity for solar to be achieved first in China (2022), followed by Spain and UAE in 2024, and by Australia and the US in 2025. For wind power generation, grid parity is expected in Germany and UK by 2024, USA and Denmark in 2025, and in Sweden by 2033.

Although a minority of respondents (10%) believe that renewables have already overtaken fossil fuels in their country, or will do so in the next two years, 58% believe that this milestone will not be reached until after 2025.

Renewable economics are unquestionably improving, but 62% of respondents say that high development costs remain the primary argument against pursuing renewables in their country. However, the cost of building solar capacity for utility-scale generation has more than halved in the past 10 years, which has helped to fuel the rapid expansion of solar capacity worldwide since 2014.

More than 45% of the surveyed executives (including 55% of those based in Europe) say that resistance to on-shore wind turbines in their countries is too strong to enable significant growth from this source.

An overwhelming 71% agree that technology advances will do more in the next five (5) years to improve the economic case for renewables than policy or regulatory changes. There is an expectation for advanced metering infrastructure (AMI), demand response management (DRM) systems, networked sensors and accuracy of asset monitoring data to have a beneficial impact on operational performance. However, 36% identify policy inconsistency as an inhibiting factor.

37% of respondents indicate the slow development of storage technologies as the most important factor inhibiting the growth of renewables in the energy mix. Utilities need to be able to call on energy producers for additional power whenever it is required, whether for load balancing or meeting surges. Green hydrogen provides an alternative form of storage to electrochemical batteries as hydrogen fuel cells can store power for considerably longer.

42% of respondents agree that reaching grid parity will not be enough to cause a sustained increase in investment in renewables. Subsidies are critical to support developments in most markets.

“Our latest Technology Radar – Renewable Energy research reflects the most current and forward-looking attitudes, actions, and investment behaviours in both global and local renewable energy markets. These trends are striving to shape tomorrow’s sustainable energy mix and are framing a clear end in sight for a big transformational shift in



sustainable energy provision,” says Alasdair Buchanan, Director of Lloyd’s Register’s Energy business, a leading global provider of engineering and technology-centric professional services.

“It is this insight and the future-forward energy implications that position Lloyd’s Register’s 2018 Technology Radar Renewable Energy report as essential to investor, developer, operator and regulator strategies for the years ahead.”

Karl Ove Ingebrigtsen, Director of Lloyd’s Register’s Low Carbon Power Generation business highlights: “I am heartened by the optimistic outlook and by the measured and realistic approach that is displayed throughout the results and insights in this year’s research. It illuminates the outlook for renewable energy – and highlights the technologies that are expected to deliver the greatest impact, especially in grid transformation which must be based on a sound understanding of each country’s individual ecosystem; it is clear that this is advancing alongside technology, policy and investment.”

This is the fourth year Lloyd’s Register has conducted its award-winning Technology Radar research. Whilst earlier editions have focused on the oil and gas sector and low carbon, this time around, the research concentrates on the renewable energy sector, with particular attention to sustainable energy drivers, geo-and political demographics, energy demand, market design, policy, technology, public appetite and social licence.

The research delivers insights that will help to inform industry debate and energy policy across the world, and may help to raise further discussions on areas such as standardisation and putting a price on carbon that treats all carbon equally which is an increasing focus for industry. For oil and gas producers a standardised carbon price scheme for emissions provides a financial incentive to seek solutions through efficiency and innovation in lower carbon technologies.

“We are seeing a real shift in thinking by the oil and gas majors as they increase their renewable energy portfolio and diversify their offering in the market. The halcyon days of high oil prices scuppering renewable energy growth and development is a distant memory; the energy industry is on a new low carbon growth and efficiency drive which will change the source of our energy supply forever,” says Ingebrigtsen.

The 2018 Technology Radar Renewable Energy report is published today, February 13, 2018. Go to lr.org/techradar to download the 2018 Technology Radar Renewable Energy report and findings, plus the Executive Summary in English, Chinese, French, German, Portuguese or Norwegian.

If you have questions or feedback, email nova.garabetian@lr.org.

If you are an editor or reporter and want to arrange an interview to talk through the findings of the 2018 Technology Radar Renewable Energy report, email jason.knights@lr.org.

Join the conversation online #techradar

ENDS

Notes to editors

About Lloyd’s Register

Lloyd’s Register (LR) is a global engineering, technical and business services organisation wholly owned by the Lloyd’s Register Foundation, a UK charity dedicated to research and education in science and engineering. Founded in 1760 as a marine classification society, LR now operates across many energy industry sectors, with around 9,000 employees in the Group across 78 countries.

LR has a long-standing reputation for integrity, impartiality and technical excellence. Our compliance, risk and technical consultancy services give clients confidence that their assets and businesses are safe, sustainable and dependable. Through our global technology centres and research network, LR is at the forefront of understanding the application of new science and technology to future-proof our clients’ businesses.

About the Technology Radar series

Global research, sector insights and in-country reports and industry surveys form part of the Technology Radar series managed by the energy business of Lloyd’s Register. The reports combine Lloyd’s Register’s expert knowledge with third-party insights, to provide data-driven findings on the role of innovation, technology, safety and sustainability in the current and future energy industry.

Our role at LR is to ensure that we provide that independent viewpoint to help government, energy producers, manufacturers, regulators and policy makers to the energy industry extract energy safely, and to deliver energy sustainably, with minimal risk to people and to the environment, and in socially responsible ways. We recognise that true value can be created by nurturing stakeholder relationships, based on trust and understanding. LR is addressing industry’s most significant technology and sustainability challenges by interacting and working with energy stakeholders on an ongoing basis. Through interviews with senior industry practitioners and surveys of energy professionals, the Technology Radar series provides a compelling insight on latest industry thinking, trends and insights.

For media enquiries contact

Jason Knights

Head of External Communication and Media Relations
T +44 (0)33 0414 1070
M +44 (0)78 2728 2569
E jason.knights@lr.org

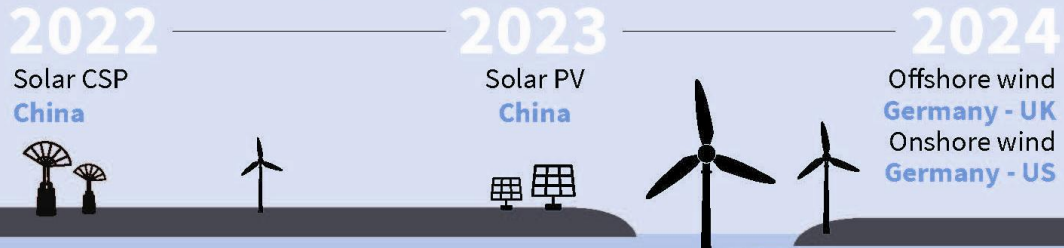
Lloyd’s Register
71 Fenchurch Street, London EC3M 4BS, UK
T +44 (0)20 7709 9166
E news@lr.org

Visit www.Ir.org or follow me on Twitter @jasonknights_LR or @saferenergy
Follow me on LinkedIn at www.linkedin.com/in/

Lloyd's Register and variants of it are trading names of Lloyd's Register Group Limited, its subsidiaries and affiliates.
Lloyd's Register launches its 2018 Technology Radar Renewable Energy insight on low carbon including renewable

Technology drives renewable energy growth, policy change remains an investment inhibitor

Where executives predict grid parity will be reached first:



Technology advances will do more to improve the economic case for renewables than policy or regulation

71%
of renewable energy executives agree

Gains in offshore wind performance will come from larger turbines as well as installation and process improvements, with opportunities for floating platforms and next-gen dynamic positioning vessels, for example.

Electrochemical and other utility-scale storage technologies are advancing, but development costs remain high and capacity limited

Inhibitors of renewable energy growth (aside from cost):



Digital technologies are ready to have impact:

1. Demand response management
2. Predictive analytics
3. Advanced metering infrastructure
4. Blockchain
5. Machine learning



International Publishing House for scientific periodicals "Space"



Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Пресс-релиз

29/03/2018

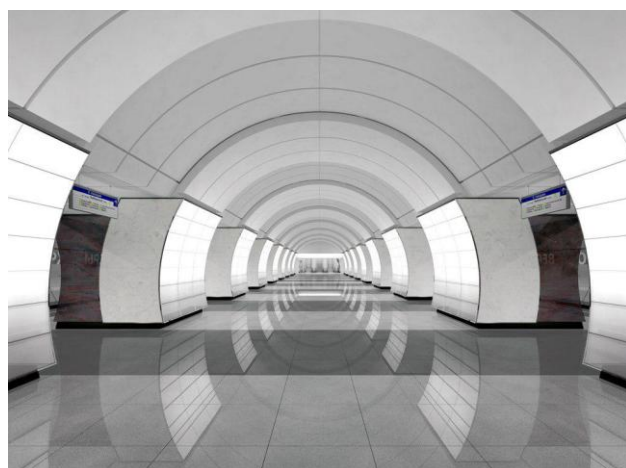
Новые станции метро построены с применением российских инновационных материалов

Решения BASF применены при строительстве станций «Окружная», «Верхние Лихоборы», «Селигерская» и новых перегонов Люблинской линии метро.

22 марта 2018 г. Сергей Собянин под аплодисменты жителей севера Москвы торжественно открыл новый участок Люблинской линии. Запущены в эксплуатацию три станции столичной подземки – «Селигерская», «Верхние Лихоборы» и «Окружная». Оперативно завершить проходку подземного маршрута позволили современные технологии тоннелестроения, в том числе выпускаемые в России особые составы для инъекций грунта, изменяющие его свойства.



строительство станции метро «Верхние Лихоборы»



станция метро «Верхние Лихоборы»

«Участок обеспечил доступ к метро для 450 тысяч москвичей. Экономия времени на ежедневные поездки по городу составит для них 30–40 минут. Строительство большей части северного радиуса велось в сложнейших геологических условиях на глубине около 60 метров», – отметил на церемонии открытия мэр Москвы.

Для преодоления гидрогеологических трудностей специалистами строительно-монтажного управления № 1 и тоннельного отряда № 6 – ОАО «Мосметрострой» были использованы кондиционеры грунта, выпускаемые концерном BASF в Москве и Санкт-Петербурге.

«Изучив ситуацию непосредственно на объекте и выполнив необходимые анализы грунта, мы предложили применить пенный реагент MasterRoc SLF 41 и полимер типа «антиглина» MasterRoc ACP 143. Первый состав обеспечивает снижение крутящего момента на роторе ТПК и замедляет износ режущего инструмента, что положительно сказывается на стоимости работ. Если говорить о полимере типа «антиглина», то это наиболее передовая на сегодняшний день технология для эффективной и экономичной проходки забоя в глинистых грунтах», – рассказывает Антон Рокотянский, технический специалист концерна BASF, ведущего мирового производителя строительной химии.

Кроме того, проходчики применяли реактив MasterRoc SLP 2 – стабилизирующий полимер для работ в водонасыщенных глинах, при высоком давлении, а также при нестабильных грунтах и наличии мелкого песка. Как отмечает Антон Рокотянский, использованная московскими метростроевцами технология активно применяется и за рубежом. Например, составы MasterRoc SLF 41 и ACP 143 применялись при строительстве высокоскоростного тоннеля Спарво (Италия), прославившегося своим рекордным диаметром: более 15 метров.

Помимо кондиционеров грунта, в процессе строительства тоннелей московского метро широко применялись разработанные BASF смазки для ТПК. Так, MasterRoc TSG 6 и 7 для щёток хвостового уплотнения предотвращают попадание в механизм воды, грунта и цементного раствора. Составы BSG 11 и EPB 11 необходимы для защиты и



продления срока службы главного подшипника – наиболее дорогостоящего элемента тоннелепроходческого щита.

Для остановки различных водопроявлений станционных комплексов и кабельных коллекторов использовались двухкомпонентная полиуретановая смола MasterRoc MP 355 Thix, акрилатный состав MasterRoc MP 304, а также однокомпонентный эластичный полиуретановый состав MasterRoc MP 350 и микроцемент MasterRoc MP 650. Так, при строительстве фурнели подходной штольни станции «Верхние Лихоборы» для предынжекций применя-

лась полиуретановая двухкомпонентная смола MasterRoc MP 355 Thix, а при постройке кабельного коллектора – микроцемент MasterRoc MP 650.

Северный радиус Люблинской линии обеспечит быстрый доступ к метро жителям районов Бескудниково и Дегунино, для которых время поездок по городу сократится в среднем на 20 минут. Нужно отметить, что это уже не первый пуск в 2018 году. Всего месяцем ранее поехали по долгожданному первому участку Третьего пересадочного контура между станциями метро «Петровский парк» и «Деловой центр».

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



ОБЗОР МИРОВОЙ ВЕТРОИНДУСТРИИ ЗА 2016 ГОД

*В.В. Долгошеев, Д.В. Коробатов, А.С. Мартыанов, А.А. Мирошниченко,
Я.Р. Мужагитов, Д.А. Хвостов, М.С. Чиненов*

Южно-Уральский государственный университет
д. 76, пр. Ленина, г. Челябинск, 454080, Россия
тел/факс: +7(912)317-18-05; e-mail: denis_vk@inbox.ru

Введение

Предлагаемая статья является переводом ряда отчетов Мировой ассоциации ветроиндустрии (The World Wind Energy Association, WWEA [1]) с комментариями авторов. Перевод сделан с целью ознакомления более широкого круга российских ученых, инженеров, разработчиков и потребителей с достижениями ветроэнергетики, в первую очередь малой ветроэнергетики.

По данным [2] роль возобновляемых источников в общемировой выработке электроэнергии растет с каждым годом. Ряд стран уже достиг равновесия в своих энергетических системах между углеродной и постуглеродной энергетикой, однако эта ситуация не стабильна. В этой статье анализировались данные по установленным в 2016 г. ветровым мощностям.

Преимущества использования энергии ветра

Во всем мире рынки энергии ветра быстро расширяются [3, 4]. Это связано с преимуществами ветроэнергетики перед традиционными конкурентами [5]: экологичность; использование только локальных ресурсов; достаточно быстрая установка оборудования практически в любой точке, где есть ветер; независимость от существующей инфраструктуры (ветровые фермы и сельскохозяйственное сообщество являются продуктивными партнерами; для турбин и подъездных дорог требуется всего один процент общей площади, а оставшиеся площади бесплатны, например, для фермерства [5, 6]). Кроме того, децентрализованный характер ветроэнергоустановок повышает безопасность системы энергоснабжения перед лицом экстремальных явлений [7, 8]. В 2016 г. производство турбин стало более стандартизированным, а размеры, эффективность и мощность турбин еще больше увеличились.

Необходимо отметить, что анализ общего рынка ветроэнергетики не учитывает распределения ветроэнергоустановок по мощности (крупные и малые до 100 кВт), классам (горизонтально-осевые, вертикально-осевые), функциональности (сетевые, автономные).

Причины развития малой ветроэнергетики

Сегодня ветроэнергетика выделилась в ряде стран в отдельные отрасли энергетики и играет существенную роль в энергобалансах Китая, Испании, США, Дании, Голландии и т.д. Если ранее информация доводилась до общественности в основном по крупным ветроустановкам мегаваттного класса, составляющим свыше 98 % мирового парка ветроэнергетики, то с 2013 г. особая роль отводится именно малым установкам до 100 кВт. Связано это со следующими обстоятельствами.

1. В связи с изменением мирового климата человечество обязано предпринимать меры как по снижению нагрузки на экологию, так и совершенствованию «зеленой» или возобновляемой энергетики, не оказывающей влияния на окружающую среду [7]. Одним из путей является развитие распределенной энергетики с малой установленной мощностью (в случае глобального потепления или похолодания человек будет думать не о фабриках и заводах, а о собственном спасении).

2. Малый потребитель энергии уже давно нацелен на отказ от магистральных линий электропередач и теплоцентралей, потому что не хочет зависеть от местной энергокомпании, тем более когда тарифы поднимаются без его участия, а отключения порой происходят на основе неплатежей недобросовестных соседей этого потребителя. Подтверждением тому является все возрастающий поток обращений на разработку и приобретение устройств на основе возобновляемых источников энергии.

3. Рынок малой ветроэнергетики уже начал свое интенсивное развитие во всем мире. Так, Минобрнауки РФ с 2006 г. объявляет ежегодные конкурсы на разработку устройств малой распределенной энергетики; в 2013 г. Еврокомиссия впервые опубликовала конкурсы на разработку малых (до 100 кВт) ветроэнергоустановок; Департамент Энергетики США также в 2013 г. объявил о целом ряде конкурсов на развитие малой ветроэнергетики; китайские малые ветроустановки мощностью 1 ÷ 10 кВт известны каждому, кто интересуется малой автономной энергетикой, причем цены грозят обрушить ми-



ровой рынок малой энергетики уже в ближайшем будущем, а качество оборудования не уступает европейскому и т.д. Кроме того, Интернет-магазины предлагают сегодня малые ветроагрегаты широкого спектра мощности с конструкциями от традиционных до экзотических.

4. Малая распределенная энергетика экономически выгодна любому государству, поскольку в случае аварий распределенного электрооборудования и локальных (частных) тепловых сетей ответственность несет сам потребитель или некоторая группа негосударственных потребителей. Простые расчеты сравнения убытков любого государства в результате веерных отключений электроэнергии или аварий крупных электростанций с суммами выделения государственных субсидий/грантов или налоговых льгот дают результаты в пользу последних. По этому пути финансовой помощи идут США, Индия, Германия, Австралия, Россия и ряд других стран, оказывая государственную помощь малым потребителям, а в ряде случаев и разработчикам, изготовителям и обслуживающим организациям.

5. Крупные ветроустановки вобрала в себя все современные технологии авиационной и электротехнической промышленности, однако мощность крупных ветроэнергетических установок практически достигла своего апогея на уровне 8 МВт (Siemens, Vestas, Enercon). Дальнейшее увеличение мощности представляется чрезвычайно сложным в связи с конечной прочностью применяемых материалов и конструкций. Более того, ряд стран, в том числе Германия, стараются демонтировать крупные установки для выноса их в офшоры (океанические акватории и т.п.). Имеется ряд фактов, говорящих о большом количестве отказов германских поселений от использования мегаваттных ветроагрегатов, аналогичные отказы наблюдаются в США и Испании. Малая же ветроэнергетика завоевывает места на мировых рынках, стремительно совершенствуя технологии [9–12]. Поэтому через 2–3 года эти тенденции, по прогнозу авторов, будут заметными на фоне мировой ветроэнергетической статистики. Ассоциация WWEA уже в начале 2014 г. начала публиковать информацию о малой ветроиндустрии как о свершившемся факте. Ежегодное количество саммитов, форумов и конференций по малой ветроэнергетике составляет уже десятки мероприятий, что также говорит о значительном росте внимания к этому пока еще формирующемуся сегменту рынка.

6. В странах, богатых углеводородами, эта тенденция также просматривается. В газифицированных районах возобновляемые источники не могут сегодня конкурировать с традиционными энергоносителями, но в неэлектрифицированных районах и при отсутствии газа они могут с успехом замещать традиционные. Например, при решении проблемы энергоснабжения индивидуального потребителя встает вопрос – или поставить ветроустановку (сол-

нечные модули или другие альтернативные источники) на 10 кВт стоимостью в 1 млн. руб., или оплатить строительство линии электропередач с теплоцентралью протяженностью 10 км и стоимостью 20 млн. руб. с оплатой по всевозрастающим тарифам. Однако на сегодняшний день малые ветроустановки не так совершенны, как их крупные аналоги: предлагаемые на рынке изделия, как правило, не отработаны, дают частые отказы, не универсальны и т.п. Международный стандарт по ветроэнергетике IEC-61400, имеющий ряд разделов по малой ветроэнергетике, вышел в полной версии только в 2008 г., а в России начал действовать с 2014 г. (ГОСТ 54418). Тем не менее наличие качественной продукции на рынке – вопрос спроса и времени. Спрос уже существует, а сроки повышения качества являются приоритетами на заводах-производителях малой ветроэнергетики.

7. Страны, в которых в достаточных количествах отсутствуют полезные ископаемые, являющиеся энергоносителями, заинтересованы в переходе на стопроцентное энергоснабжение от возобновляемых источников. Ветроэнергетика в этом случае играет важную роль.

8. Косвенным подтверждением стремления мало-го потребителя к распределенной энергетике является тенденция совершенствования аккумуляторов энергии. Даже поверхностный анализ графика потребления отдельно стоящего дома или квартиры показывает, что, во-первых, выгодно использовать не избыточные, а адекватные мощности для зарядки аккумулирующих устройств; во-вторых, график потребления запасенной энергии является неравномерным, поэтому многие предприятия и разработчики наращивают усилия по улучшению качества аккумуляторов [6].

Введенные мощности мировой ветроэнергетики

По результатам анализа ветроэнергетических мощностей на конец 2016 г. введенная мощность достигла 486 661 МВт, из которых в течение 2016 г. было добавлено 54 846 МВт. Глобальная мощность ветровых электростанций увеличилась на 11,8 % в течение года, немного уступая 2015 г., когда рост составил 17,2 %, то есть 63 690 МВт. К концу 2016 г. более 90 стран имели положительный опыт в выработке электроэнергии из энергии ветра, при этом у 29 стран мощность составила более 1 ГВт. Все ветряные турбины в мире к концу 2016 г. удовлетворяли около 5 % мирового спроса на электроэнергию [2]. На рис. 1 отражены добавленные мощности за период 2012–2016 гг.



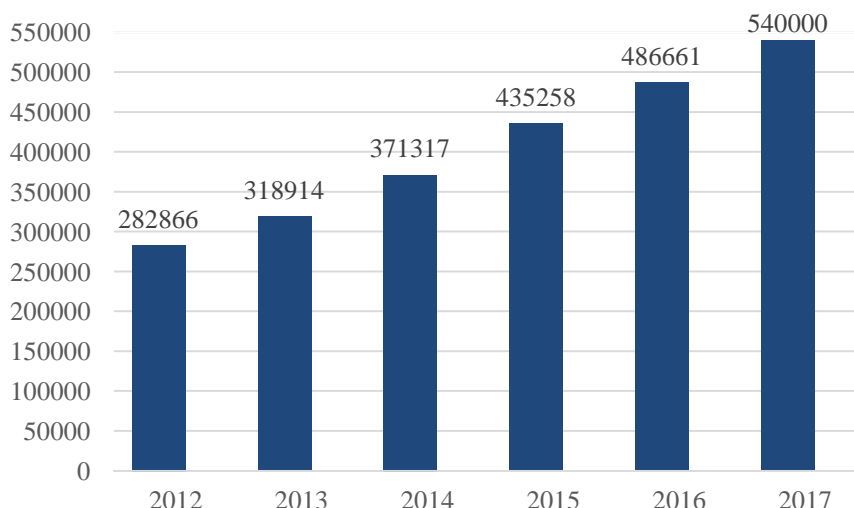


Рис. 1 – Мощности ветроэнергетики, установленные в 2012-2016 (МВт)

Значительное снижение прироста установленных мощностей ветроэнергетики на китайском рынке (после очень сильного прироста в 2015 г.) привело к сокращению выработки электроэнергии во всем мире. Тем не менее Китай сохранил свое лидерство по объемам добавленной мощности в 23 369 МВт, за ним следуют США и Германия с приростом в 8 203 МВт и 5 443 МВт соответственно. На четвертом месте расположилась Индия с приростом в 3 520 МВт. Замыкает «большую пятерку» Испания, увеличение мощности которой составило всего 34 МВт. Существенный рост объемов выработки электроэнергии с помощью энергии ветра продемонстрировала Бразилия,

увеличив мощности на 2 ГВт. Остальные страны, входящие в десятку по объемам прироста, – это Франция (1 772 МВт), Турция (1 363 МВт), Великобритания (898 МВт), Нидерланды (887 МВт) и Канада (693 МВт). Новые рынки продолжают открываться по всему миру: например, Боливия и Грузия установили свои первые ветроустановки только в 2016 г. Самый большой прирост в процентном соотношении за 2016 г. осуществил Пакистан (130,9 %), но по общей мощности ему далеко до стран «большой пятерки» [4]. Установленная мощность на конец 2016 г. отражена на рис. 2.

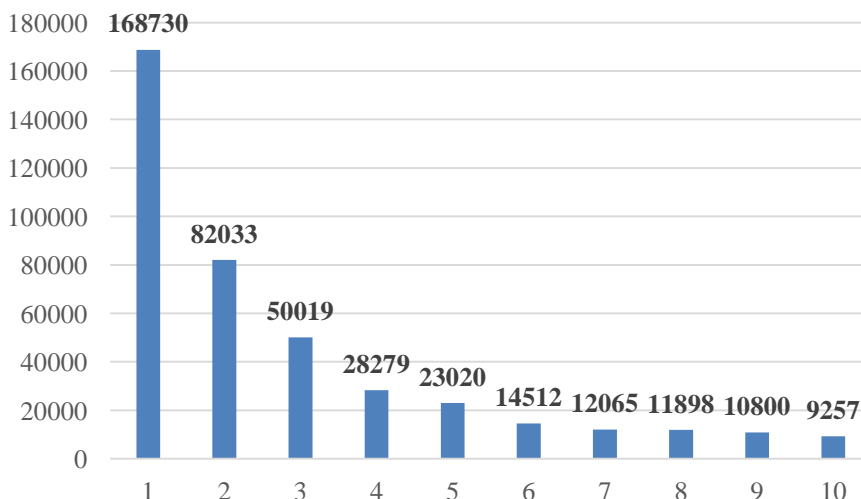


Рис. 2 – Установленная ветровая мощность по странам (МВт):

1 – Китай; 2 – США; 3 – Германия; 4 – Индия; 5 – Испания; 6 – Великобритания; 7 – Франция; 8 – Канада; 9 – Бразилия; 10 – Италия

Восьмой год подряд Азия является крупнейшим региональным рынком, который составляет около половины добавленной мощности во всем мире, другая половина приходится на страны Европы и Север-

ной Америки. На рост некоторых крупнейших рынков повлияли политические трудности, однако увеличение мощности было обусловлено экономической конкурентоспособностью, усилением мер по



охране окружающей среды и другими факторами. Следует отметить, что практически повсеместно внедрение генерирующих мощностей на основе энергии ветра является на сегодняшний день наибо-

лее экономичным вариантом решения проблемы энергоснабжения.

На рис. 3 показано распределение установленной мощности на конец 2016 г. по регионам [13].

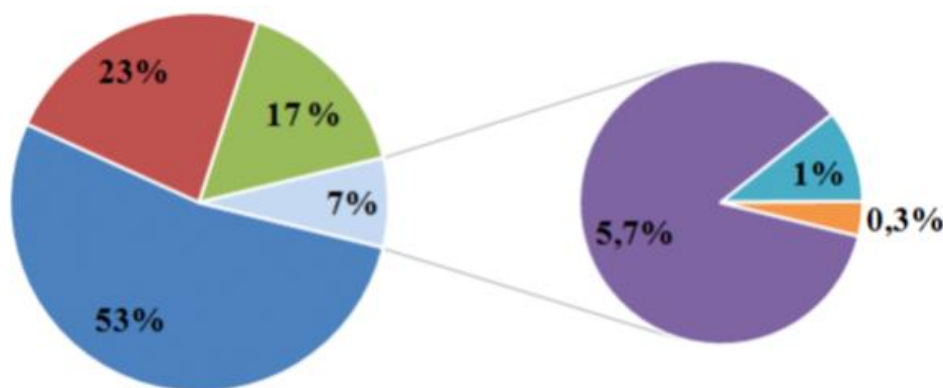


Рис. 3 – Установленные мощности ветроэнергетики в 2016 г. по регионам (МВт): 53 % – Азия; 23 % – Европа; 17 % – Северная Америка; 5,7 % – Латинская Америка; 1 % – Океания; 0,3 % – Африка

Китай добавил 23,4 ГВт и с общей установленной мощностью, приближающейся к 169 ГВт, составил одну треть от общего объема мировых мощностей к концу 2016 г. Доля новых установок снизилась на 24 % по отношению к 2015 г., когда рекордный объем рынка был обусловлен увеличением льготных тарифов на возобновляемую энергетику. Падение в 2016 г. было вызвано отчасти слабым ростом спроса на электроэнергию. Самый большой прирост новых мощностей был в провинциях Юньнань (3,3 ГВт), Хэбэй (1,7 ГВт) и Цзянсу (1,5 ГВт). В северных и западных провинциях по-прежнему вырабатывается значительная часть ветровой мощности в Китае, однако к концу 2016 г. количество новых установок существенно возросло и в южных, и восточных регионах. Несмотря на постановления центрального правительства о новых правилах обеспечения гарантированных ежегодных часов нагрузки для ветровой энергии, сокращение прироста мощности остается серьезной проблемой для Китая. Ввиду плохого взаимодействия между распределительными сетями, отсутствия единой системы передачи, спрос рос медленно по сравнению с прогнозами. В целом, по оценкам специалистов, за счет описанных ограничений технический потенциал Китая в объеме 49,7 ТВт был снижен в среднем по стране на 17 % за год, несмотря на относительно более высокие темпы роста в некоторых других регионах страны. Невзирая на сокращение, доля ветровой энергетики в общем объеме производства электроэнергии Китая стабильно росла в последние годы и достигла 4 % в 2016 г. (по сравнению с 3,3 % в 2015 г.), или 241 ТВт полной мощности [14].

Другие страны Азии также демонстрировали рост. Индия установила 3,6 ГВт до конца 2016 г. с общей установленной мощностью в 28,7 ГВт и укрепилась на четвертом месте. Турция имела рекордный год, добавив почти 1,4 ГВт в 2016 г., снова оказав-

шись на 3 месте среди первой десятки стран по новым произведенным мощностям – в общей сложности мощность оставила 6,1 ГВт. Пакистан (0,3 ГВт), Республика Корея (0,2 ГВт) и Япония (около 0,2 ГВт) также добавили мощности, что позволило Азии вырабатывать свыше 203 ГВт энергии. К концу 2016 г. значительный дополнительный потенциал в стадии строительства ветропарков в таких регионах, как Индонезия и Вьетнам прибавят еще 940 МВт [15].

США занимают второе место по приросту мощностей (8,2 ГВт) с общей мощностью в конце года (82,1 ГВт). Энергия ветра в стране занимает третье место после солнечной фотоэлектрической энергии и энергии природного газа для валового прироста мощностей, и второе – в альтернативной энергетике. Рекордсменом по добавленной мощности стал штат Техас (2,6 ГВт) – к концу 2016 г. в штате генерировалось четверть мощностей США. Далее идут штаты Оклахома (1,5 ГВт), Айова (0,7 ГВт), Канзас (0,34 ГВт) и Северная Дакота (0,27 ГВт). Небраска стала восемнадцатым штатом США, превысившим вырабатываемую ветром мощность в 1 ГВт. С учетом крупных ветроэнергетических мощностей в США стоимость коммунальных услуг в ряде регионов (Калифорния, Техас) значительно зависит от годовых флуктуаций ветра с наличием безветренных периодов, когда стоимость электроэнергии за счет перетоков от других источников стоит дороже. Экономическая конкурентоспособность энергии ветра вынудила корпоративных и частных покупателей электроэнергии обращаться к разнообразным компаниям, выходящим на рынок [3].

В Канаде в 2014 г. и 2015 г. общая установленная мощность находилась на уровне 9,7 ГВт и 11,2 ГВт, прирост составил 2,0 ГВт и 1,5 ГВт соответственно [2], а концу 2016 г. общая установленная мощность –



11,9 ГВт [13]. По данным Канадской ассоциации ветроэнергетики (CanWEA) в течение 2016 г. был завершен 21 проект, который добавил 0,7 ГВт установленной мощности. Рост замедлился почти наполовину, однако Канада остается на 8-м месте в десятке лидеров мировой ветроэнергетики и продолжает развиваться в этом направлении. Правительство и коммунальные службы продолжают испытывать потребность в доступном, надежном и чистом электро-

снабжении и в качестве решения чаще рассматривают энергию ветра. На конец 2016 г. в Канаде действовали 272 ветроэлектростанции. При этом за последние пять лет стоимость энергии ветра снизилась на 60 %, что делает ее одной из самых доступных видов энергии [3]. В таблице приведен рейтинг стран по общей установленной и добавленной в 2013–2016 гг. ветроэнергетической мощности.

Таблица

Рейтинг стран по установленной ветровой мощности

Страна	Общая установ. мощность на конец 2016 г.	Добав. мощность за первое полугодие 2016 г.	Общая установ. мощность на конец 2015 г.	Добав. мощность за первое полугодие 2015 г.	Общая установ. мощность на конец 2014 г.	Добав. мощность за первое полугодие 2014 г.	Общая установ. мощность на конец 2013 г.	Добав. мощность за первое полугодие 2013 г.
	МВт							
Китай	158 000	10 000	148 000	10 101	114 763	7 175	91 324	80 827
США	74 696	830	73 867	1 994	65 754	835	61 108	59 884
Германия	47 420	2 389	45 192	1 991	40 468	1 830	43 660	32 458
Индия	27 151	2 392	24 759	1 297	22 465	1 112	20 150	19 564
Испания	22 987	–	22 987	–	22 987	–	22 959	22 918
ВБ	13 940	320	13 614	872	12 440	649	10 711	9 776
Канада	11 298	109	11 205	510	9 694	723	7 698	6 578
Франция	10 861	568	10 293	523	9 296	338	8 254	7 697
Бразилия	9 810	1 095	8 715	838	5 962	1 301	3 466	2 788
Италия	9 101	143	8 958	124	8 663	30	8 551	8 417
Швеция	6 338	309	6 029	157	5 425	354	4 470	4 271
Польша	5 300	200	5 100	283	3 834	337	3 390	2 798
Турция	5 146	428	4 718	431	3 763	466	2 959	2 619
Дания	5 089	25	5 064	76	4 883	83	4 772	4 578
Португалия	5 040	6	5 034		4 953	105	4 724	4 547
Остальной мир	44 309	2 900	41 409	2 600	35 968	2 275	29 718	26 861
Итого	456 486	21 714	434 944	21 678	371 317	17 613	318 914	296 581

Анализ проведенных исследований

Наиболее полные исследования в области настоящего и будущего ветроэнергетики провела Компания GE Energy Consulting по заказу CanWEA [13]. В рамках этих исследований смоделированы электрические сети в Канаде и большинстве Соединенных Штатов Америки. Развитие ветроэнергетики предполагает четыре возможных сценария – удовлетворение от 5 %

до 35 % потребности в электроэнергии с учетом прогнозируемого годового производства электроэнергии к 2025 г. Сценарий, называемый BusinessAsUsual (BAU), предполагает введение ветроэнергетических мощностей в объеме всего 5 % от прогнозируемых объемов производства электроэнергии. Для целей бизнеса в данном сценарии используются существующие ветроэлектростанции и те, которые строились по состоянию на апрель 2015 г. (рис. 4).



Рис. 4 – План развития ветроэнергетики в Канаде (BAU):
 • – существующие ветроэнергетические установки (ВЭУ)

Второй вариант развития ветроэнергетики, называемый Dispersed Wind Locations (DISP), предполагает относительно равномерное распределение ветроэлектростанций в береговой зоне и обеспечение на их основе 20 % потребностей в электроэнергии в 2025 г. От

сценария BAU этот вариант отличается тем, что дополнительные станции устанавливаются в тех местах, которые считаются наиболее подходящими для обеспечения этих потребностей в каждой провинции и на каждой территории (рис. 5).



Рис. 5 – План развития ветроэнергетики в Канаде (DISP):
 • – существующие площадки • – 20 % DISP площадки

Третий вариант исследования, названный Concentrated Wind Locations (CONC), предполагает сосредоточение генерирующих ветровых станций внутри континента в провинциях и на территории

я, имеющих самый высокий ветровой потенциал (рис. 6). В этом варианте также рассмотрено покрытие 20 % потребностей в электроэнергии за счет энергии ветра.



Рис. 6 – План развития ветроэнергетики в Канаде (CONC):
 • – существующие ВЭУ • – 20 % CONC площадки

Четвертый вариант с целевым расположением ветроэлектростанций Targeted Wind Locations (TRGT) и 35%-ным покрытием потребностей в элек-

троэнергии основан на определении провинций с высоким ветровым потенциалом (рис. 7).



International Publishing House for scientific periodicals "Space"



Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Рис. 7 – План развития ветроэнергетики в Канаде (TRGT):

- – существующие ВЭУ
- – 35 % TARG площадки

В результате было выявлено, что в сценариях с 20-ти и 35-типроцентным вкладом ветровых электростанций ветроэнергетика вытеснила более дорогой природный газ и генерацию на основе углеродов. В сценарии DISP 20 % можно избежать ежегодного выброса CO₂ до 12,3 млн т, в сценарии CONC 20 % – 17,0 млн т, TRGT 35 % – до 32,3 млн т и можно было бы сэкономить 47 долл. / МВт·ч производственных затрат по сравнению с существующими показателями [4]. Следует отметить, что Канада обладает высококачественными ветровыми ресурсами во всех провинциях, а канадская электрическая сеть может принять больше чем 35 % энергии ветра. Благодаря уникальным ресурсам ветра в Канаде существуют возможности для максимизации экономического, промышленного развития и экологических выгод, связанных с развитием ветроэнергетики. Правительство Канады взяло обязательство перейти на низкоуглеродную экономику и задало целью обеспечить 50-процентную чистую электроэнергетику к 2025 г. [14].

Страны с активно развивающейся ветроэнергетикой

В Бразилии общая установленная мощность в 2014 г. равнялась 6,0 ГВт, прирост за год составил 2,5 ГВт, в 2015 г. – 8,7 ГВт, прирост – 2,7 ГВт [2]. В 2016 г. Бразилия оказалась на 9-м месте в десятке лидеров мировой ветроэнергетики и снова возглавила рынок Латинской Америки [5]. 2016 г. стал важным годом для ветроэнергетики Бразилии – установленная мощность превысила 10 ГВт. В конце 2016 г. совокупная мощность ветроэнергетики в Бразилии составила 10,74 ГВт, то есть 7 % национального производства. В 2016 г. Бразилия добавила 2 ГВт ветровой мощности, установив 947 ветровых турбин на 81 ветроэлектростанции и создав тем самым 30 000 новых рабочих мест, и сократила выбросы CO₂ приблизительно на 16 млн т в год. Несмотря на то что данный сектор сталкивался с серьезными проблемами: экономический кризис; снижение спроса на электро-

энергию; недостаток линий передач в областях с наибольшим потенциалом мощности (3 штата – Рио-Гранде-ду-Норте, Рио Гранде-ду-Сул и Баия – все крупные инвесторы в ветроэнергетике не смогли участвовать в аукционе по резервированию из-за отсутствия пропускной способности); недостаточное финансирование, – тем не менее ветроэнергетика Бразилии поддерживала устойчивый рост благодаря проектам, которые были заключены на аукционах и на свободном рынке в предыдущие годы. Эта страна продолжает оставаться самым перспективным рынком по использованию энергии ветра в регионе [16].

Италия замыкает десятку лидеров мировой ветроэнергетики по итогам 2016 г. с общей установленной мощностью 9,3 ГВт и приростом 0,3 ГВт. В 2014 г. этот показатель был на уровне 8,7 ГВт с приростом 0,1 ГВт, а в 2015 г. – 9,0 ГВт с приростом 0,3 ГВт [2, 17]. Как видно, тенденция роста стабильно сохраняется. В Европе 10,8 % спроса на энергию покрывается за счёт энергии ветра, при этом Италия занимает пятое место в Европейском союзе – её доля составляет 18 %, а генерация 116 ГВт·ч. В 2016 г. финансирование ветроэнергетики в Италии составило 538 млн евро, то есть страна заняла 10-е место в Евросоюзе [18].

В условиях континентального климата, преобладающего в центральной части России, техническое и экономическое преимущество остается за малой и средней ветроэнергетикой мощностью до 1 МВт по целому ряду причин (малые ветра, удаленность объектов друг от друга, малая степень электрификации территорий с отсутствием линий электропередач и локальных сетей).

Германия занимает 3 место по общей мощности ветроэнергоустановок и ведущую роль в Европе. В конце 2016 г. общая мощность ветроэнергетики Германии, составляющая около 46 000 МВт, покрывала 11 % валового потребления энергии в стране. В качестве основы энергетического перехода весь спектр возобновляемых решений, включая ветроэлектростанции, в настоящее время составляет 33 % от энергетического баланса, и этот показатель, как ожидается,

возрастет до 40 ÷ 45 % к 2017 г. и 55 ÷ 60 % к 2035 г. При этом в 2016 г. вырос объем оффшорной ветровой энергии и составил 57 %, а это примерно 13 млрд

кВтч. В то же время объемы энергии ветра, добываемой на суше, снизились на 6 %, до 67 млрд кВтч [19].

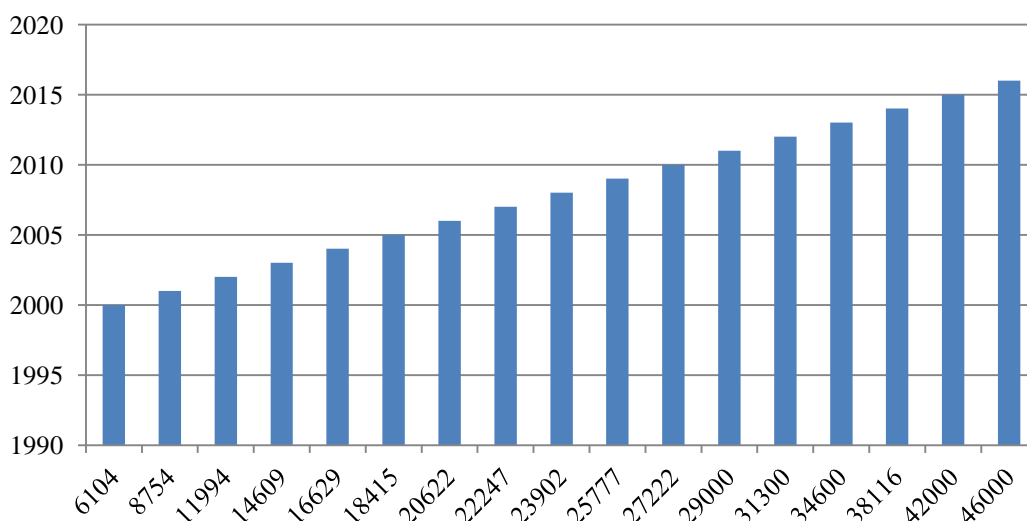


Рис. 8 – Рост мощностей ветроэлектростанций в Германии

В Испании в 2016 г. суммарная мощность ветроэнергоустановок увеличилась на 34 МВт, в результате общая сумма составила 23 026 МВт в соответствии с данными, собранными Испанской ассоциацией ветроэнергетики (АЕЕ) на основе официального сертификата ввода в эксплуатацию в качестве критерия. Установки с суммарной мощностью 32 МВт были введены в ветряных хозяйствах, расположенных в Кастилии и Леоне, и уже были зарегистрированы в старом регистре предварительного распределения. Кроме того, в Канарской области было установлено 4,6 МВт, а в Галисии – 2,1 МВт. Таким образом, к 31 декабря 2016 г. установленная мощность ветра составила 23 026 МВт. При этом энергия, вырабатываемая на ветроэлектростанциях, покрыла спрос на электроэнергию на 19,3 %.

Индия занимает четвертое место в мире по мощности установленных ветрогенераторов. Установленная мощность возобновляемых источников в Индии выросла на 25 %, от 31,7 ГВт в марте 2014 г. до 39,5 ГВт в январе 2016 г. В течение финансового года (2016–2017 гг.) в Индии были введены в эксплуатацию ветроэлектростанции суммарной мощностью 5,4 ГВт. Это на 57 % превышает предыдущий годовой рекорд 2015–2016 гг., когда в стране были построены ветроэнергостанции суммарной мощностью 3,423 ГВт. Суммарная установленная мощность индийских ветроэлектростанций по итогам года достигла 31,117 ГВт. Ожидается, что будут построены ветроэлектростанции мощностью около 5 ГВт [20]. По мнению основателя крупнейшего производителя ветряных турбин, TulsiTanti, в 2017 г. в стране планируется ввести установки суммарной мощностью 6 ГВт. [3]

В 2016 г. мощность сетевой ветроэнергетики во Франции увеличилась на 1 351 МВт до 11 722 МВт. Показатель за весь год составил на 37 % больше по сравнению с 2015 г. Только в четвертом квартале 2016 г. Франция подключилась к 530 МВт по сравнению с 304 МВт и 442 МВт за те же три месяца 2015 г. и 2014 г. соответственно. Даже с увеличением мощности, производство энергии в прошлом году снизилось до 20 ТВт·ч из-за неблагоприятных условий ветра. В 2016 г. ветровые турбины произвели около 4,1 % от потребления энергии. Кроме того, в конце 2016 г. во Франции было проектов на 7 799 МВт наземной и на 3,196 МВт морской ветроэнергетики. Страна установила целевую мощность ветра в 15 ГВт на 2018 г. и между 21,8 ГВт и 26 ГВт на 2023 г. Как заявила Французская ассоциация ветроэнергетики (FEE), для этого ежегодный прирост должен составлять до 2 ГВт [21].

Заключение

Проведенный анализ показал, что крупнейшим региональным рынком является Азия. Введенные на этой территории мощности составляют около половины мощности, добавленной во всем мире. Другая половина приходится на страны Европы и Северной Америки. На некоторые крупнейшие рынки повлияли политические трудности, тем не менее на мировом рынке наблюдается рост установленной мощности ветроэнергетических электростанций, что обусловлено экономической конкурентоспособностью, усилением мер по охране окружающей среды и рядом других факторов. Отметим, что энергия ветра в мире стала одним из наиболее привлекательных ва-

риантов благодаря наименьшим затратам на новые генерирующие мощности.

Список литературы

[1] Сайт Мировой ассоциации ветроиндустрии (The World Wind Energy Association). – <http://www.wwindea.org/home/index.php>.

[2] WWEA half-year report. URL: <http://www.wwindea.org/11961-2/>

[3] Renewables 2017 global status report. URL: http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_02/chapter_02/#target-wind_80

[4] Sirotkin, E.A. State of world wind industry development [Text] / E.V. Solomin, E.A. Sirotkin // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2014. – No 1. – P. 22–26.

[5] Сироткин, Е.А. Состояние малой ветроэнергетики в мире [Текст] / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – № 1. – С. 26–31.

[6] Возмилов, А.Г. Анализ причин разбалансировки аккумуляторных батарей [Текст] / А.А. Андреев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2012 – № 11. – С. 65–68.

[7] Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль [Текст] / Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – № 1. – С. 10–15.

[8] Киндряшов, А.Н. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения [Текст] / А.Н. Киндряшов, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2013 – № 1–2. – С. 59–62.

[9] Кирпичникова, И.М. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения [Текст] / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Вып.10. – № 26 (126). – С. 32–35.

[10] Пат. 2347104 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.1). Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения / Ю.В. Грахов, Е.В. Соломин и др. – № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 12с. [30]

[11] Пат. 2244996 Российская Федерация, МПК H 02 K 19/16 1/06. Генератор переменного тока / С.А.Ганджа, Е.В. Соломин и др. – № 2003124088/09; заявл. 31.07.2003; опубл. 20.01.2005, Бюл. № 2. – 3с.

[12] Кирпичникова, И.М. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально–осевых ветроэнергетических установок [Текст] / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 78–81.

[13] CanWEA Awards GE for Work on Pan-Canadian Wind Integration Study. URL: <http://www.genewsroom.com/press-releases/canwea-awards-ge-work-pan-canadian-wind-integration-study-283674>

[14] Соломин, Е.В. Результаты испытаний и эксплуатации вертикально-осевых ветроэнергетических установок [Текст] / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Е.Е. Соломин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 3 (15). – С. 70–83.

[15] Троицкий, А.О. Классификация систем управления ветроэнергетических установок [Текст] / Д.В. Коробатов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 13–14. – С. 38–45.

[16] Сироткин, Е.А. Историко-экономический анализ ветроэнергетических установок и систем управления [Текст] / Д.В. Коробатов, С.В. Козлов, Сироткин Е.А. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 15–18. – С. 54–66.

[17] Коробатов, Д.В. Регулирование мощности ветроэнергетической установки [Текст] / Д.В. Коробатов, Е.А. Сироткин, А.О. Троицкий // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 15–18. – С. 67–74.

[18] Соломин, Е.В. Перспективы использования малых ветроэнергетических установок в агропромышленном комплексе [Текст] / Е.В. Соломин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва. – 2011. – Вып. 7. – С.12–15.

[19] Соломин, Е.В. Методология разработки и создания вертикально–осевых ветроэнергетических установок: монография ISBN:9785696041995 [Текст] / Е.В. Соломин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 324 с.

[20] Hydrogen. Chemical Economics Handbook. June 2015. <https://www.ihs.com/products/hydrogen-chemical-economics-handbook.html>.

[21] Кирпичникова, И.М. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках [Текст] / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2010. – № 1. – С. 93–97.





Сибирские ученые сделали эффективный вакуумный фотодиод для солнечных батарей

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН совместно с ЗАО «Экран ФЭП» создали новый тип вакуумного фотодиода, который позволяет эффективно преобразовывать свет в электричество и является перспективным для солнечной энергетики, особенно при размещении устройств в космосе. Результаты этой работы опубликованы в журнале *Scientific Reports*.

При преобразовании света в электричество существует две проблемы: как выбить много электронов и как собрать и заставить их двигаться в определенном направлении (в противном случае, если электроны мечутся по полупроводнику бесцельно, он просто нагревается). В настоящее время наиболее эффективны многокаскадные полупроводниковые преобразователи. Сибирские ученые предложили использовать вакуумный фотодиод, отличие которого заключается в том, что полупроводниковые электроды не соприкасаются, а находятся на определенном расстоянии друг от друга в вакууме – это позволяет взять анод независимо от катода, то есть сделать их структуру и состав, не ориентируясь на то, как они будут сочетаться между собой. Исследователи ИФП СО РАН предложили упростить электронам выход в вакуум за счет состава и структуры катода: они использовали арсенид галлия, покрытый одним слоем атомов цезия и кислорода. У такого электрода очень низкая работа выхода – около 1 эВ (для сравнения у большинства материалов показатель составляет 4–6 эВ), а значит, электрон можно извлечь в вакуум, затратив предельно малую энергию. Другими словами, при использовании таких структур электроны выбиваются проще (не нужно греть катод или подавать напряжение).

В ходе эксперимента ученые осветили один из электродов в диапазоне длин волн 350–900 нм (на этот диапазон приходится максимум солнечной энергии излучения), в результате в цепи возник электрический ток без приложения разности потенциалов между электродами.

Теоретически коэффициент полезного действия фотодиода сравним с квантовой эффективностью

фотокатода – 50 % и выше. В перспективе это позволит фотоэмиссионным преобразователям конкурировать с используемыми сейчас многокаскадными полупроводниковыми, особенно для применения в космосе. Квантовая эффективность – это величина, которая характеризует fotocувствительные приборы и материалы, количественная мера, показывающая разницу между тем, сколько фотонов материал поглотил, и сколько при этом испустилось электронов.

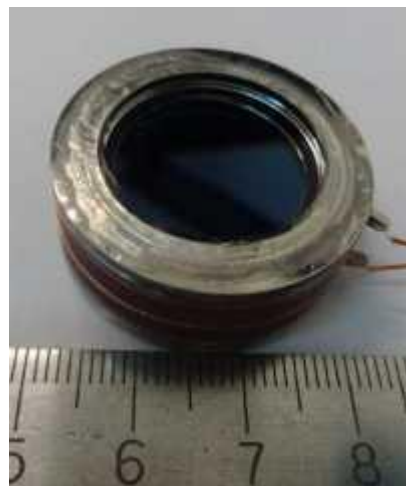


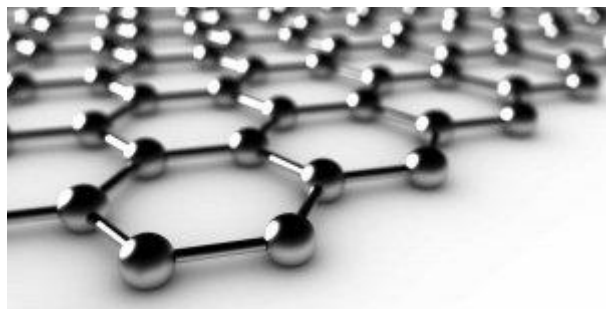
Фото предоставлено Олегом Терещенко

«Помимо прикладного значения, в таком приборе оказалось возможным изучать очень богатую физику фотоэмиссии низкоэнергетических электронов, а также процессы инжекции свободных спин-поляризованных электронов. На базе изготовленного вакуумного фотодиода можно создать детектор спин-поляризованных электронов с пространственным разрешением, что в свою очередь пригодится в электронных спектрометрах для получения информации о зависимости энергии электронов в кристалле от его импульса и спиновой поляризации», – рассказал научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН доктор физико-математических наук Олег Евгеньевич Терещенко. Статья об этом опубликована в *Physical Review Applied*.

www.sbras.info



Предсказаны сотни новых одноатомных материалов



Графен постоянно называют «материалом будущего», хотя технологии получения больших образцов в промышленных количествах до сих пор не созданы. Тем не менее графен – одноатомный слой углерода – демонстрирует потрясающие свойства: электропроводность лучше меди, прочность выше стали и т.д. Не менее интересны и другие двумерные кристаллы, полученные в последнее время, такие как борофен, силицен или дисульфид гафния.

В новой работе европейских ученых предсказываются сотни таких материалов с самыми разными полезными свойствами. Об этом Николя Моне (Nicolas Mounet) из Федеральной политехнической школы Лозанны и его коллеги пишут в статье, опубликованной журналом Nature Nanotechnology.

В самом деле, множество плоскостей графена, уложенных «стопкой», образуют всем известный и широко распространенный графит. В поисках аналогичных структур ученые проанализировали информацию, собранную в открытых базах данных, содержащих сведения о примерно 108 тыс. трехмерных кристаллических структур.

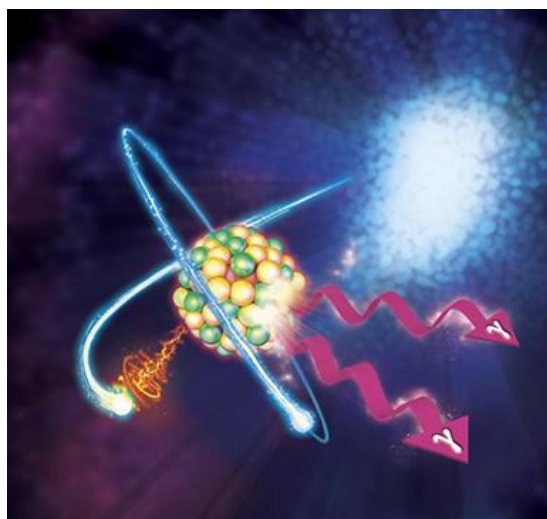
Авторов интересовали кристаллы, ковалентные связи между атомами которых в плоском слое чрезвычайно прочны, тогда как сами слои соединяют достаточно слабые силы Ван дер Ваальса – как у того же графита и его графеновых плоскостей. Специально разработанный компьютерный алгоритм позволил выделить около 5 600 подходящих кристаллических структур. Более точные расчеты межатомных связей сузили результат уже до 1 825 вариантов.

Среди них ученые обнаружили структурные аналоги различных известных одноатомных материалов, связи между атомами в которых очень схожи – в частности, 13 аналогов двумерного дисульфида молибдена (перспективный полупроводник). Для оценки были проведены расчеты свойств 258 предсказанных двумерных материалов. 166 из них оказались полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 0 до 1,5 эВ, а 92 материала – проводниками.

naked-science.ru



Изотопная батарейка заменит 100 тыс. литиевых



Многонациональный исследовательский коллектив успешно осуществил контролируемое высвобождение сохраненной изотопной энергии с помощью физического механизма, который был предложен

более 40 лет назад, но до сих пор не был подтвержден экспериментально.

Базой для этой работы послужило подразделение энергетических компонентов Лаборатории армейских исследований США (U.S. Army Research Laboratory, ARL). Команда под руководством доктора Джеймса Кэрролла (James Carroll) продемонстрировала на примере особого изотопа молибдена, что энергия хранится в его возбужденном ядре на протяжении примерно семи часов, но может быть высвобождена гораздо быстрее с помощью свободного электрона, продельвающего «дыру» в оболочке атома. Проникая внутрь, этот электрон приносит с собой небольшое количество энергии, которого как раз достаточно, чтобы инициировать высвобождение значительно большего объема энергии, хранящейся в изотопе.

Идея такого эксперимента была выдвинута Кэрроллом в 2012 г. в соавторстве с представителем Объединённого института ядерных исследований (Россия). Полномасштабная подготовка началась в ARL летом 2014 г.

Предварительные результаты в мае 2015 г. были получены Австралийским национальным университетом, а собственно демонстрацию провели в декабре в исследовательском центре ATLAS Аргоннской Национальной Лаборатории. Анализ более 10 терабайт экспериментальных данных затянулся до 2017 г. Окончательные итоги проекта опубликованы в виде письма журналом Nature.

По мнению авторов, это достижение открывает перспективное направление в разработках альтернативных источников энергии. «Уже ведутся исследования для определения возможности использования энергии изотопов с плотностью хранения в 100 тыс. раз выше того, что могут обеспечить химические процессы», – заявил Кэрролл.

<http://ko.com.ua/>



Совершен прорыв в разработке высокотемпературных топливных элементов



Фото: EAST NEWS

ливного элемента и не обеспечивают ожидаемого выхода мощности.

Команда американских исследователей смогла решить эту проблему, объединив высокоактивный катод из двойного перовскита PBSCF с химически стабильным электролитом, получившим маркировку VZCYb4411. Новый электролит обеспечил быстрое перемещение ионов и оставался стабильным даже после работы в течение многих сотен часов. В целом установка продемонстрировала исключительную удельную мощность.

Высокая температура работы означает высокую энергоэффективность системы без увеличения издержек на расходные элементы. Открытие должно привести к созданию более экономичных топливных элементов и в конечном счете трансформировать всю энергетику. Следующим этапом работы команды станет разработка прототипа коммерческого устройства на основе технологии.

Перовскиты, используемые в этом исследовании, считаются одним из наиболее перспективных материалов. Так, они позволяют существенно увеличить эффективность солнечных панелей. Недавно американским исследователям удалось создать версию перовскитной солнечной панели, стабильно работающую в уличных условиях.

hightech.fm

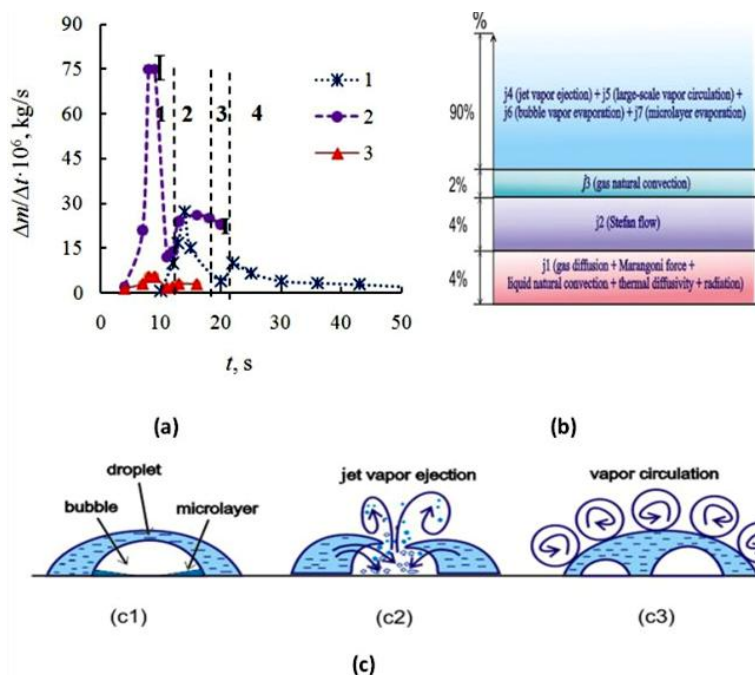


Новая модель испарения растворов повысит эффективность технологий в энергетике

Ученый Томского политехнического университета получил новые экспериментальные данные об испарении водных растворов солей. Результаты исследования помогут повысить эффективность технологий в энергетике. Статья с исследованием опубликована в журнале Scientific Reports.

«Испарение воды регулирует теплообмен и в этом качестве используется, например, в биологии. Высококонцентрированные водные растворы соли применяются в химической промышленности и в энергетике,

в абсорбционных тепловых насосах. При этом испарение многокомпонентных растворов, в том числе водных растворов солей, изучено слабо. Новые данные, полученные нами экспериментально, помогут скорректировать модели испарения и повысить эффективность технологических циклов в различных областях энергетики», – рассказал корреспондентам российского информационного агентства ТАСС автор исследования Сергей Мисюра (лаборатория моделирования процессов тепломассопереноса ТПУ).



В процессе эксперимента ученые осаждали на рабочую поверхность капли воды и водных растворов солей – бромида лития, хлорида кальция и хлорида лития. Начальная температура каплей была равна температуре окружающего воздуха 21 °С, а испарение проводилось при нагреве стенки от 80 °С до 150 °С.

Исследователи обратили внимание на принципиальное отличие испарения капли раствора соли от капли воды при интенсивном пузырьковом кипении. Скорость испарения небольшой капли воды во времени более-менее постоянна. Совсем иное поведение у капли солевого раствора.

Процесс кипения раствора ввиду изменения концентрации состоит из нескольких временных отрезков, в каждом из которых меняется как скорость испарения, так и роль конвекции. Эксперименты показали, что для определения скорости испарения существенное значение имеет конвекция.

«Концентрация растворов постоянно изменялась, ведь вода испаряется, а соль остается. Возникающее из-за конвекции движение воздуха ускоряет испарение каплей с меняющейся концентрацией. Однако этим фактором, как и теплопереносом внутри самой капли, в теоретических моделях до сих пор пренебрегали, как несущественным. Мы же показали, что таким образом предполагаемая скорость испарения может быть ошибочно занижена почти в десять раз», – отметил ученый.

Предсказание скорости испарения каплей солевых растворов необходимо для разработки новых технологий струйной печати и покрытий, медицинской диагностики и охлаждения микроэлектроники. Правильное моделирование испарения водных растворов важно для повышения эффективности тепловых насосов.

news.tpu.ru

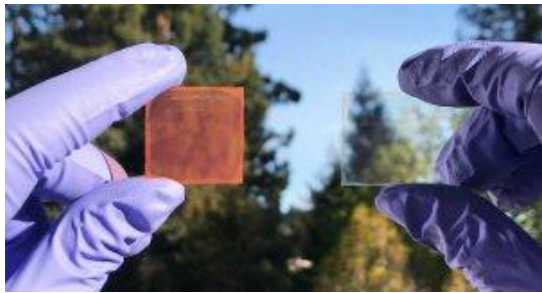


Создан материал для «умных» окон, на свету превращающийся в солнечную панель

Группа химиков из США разработала материал, который превращается в малопрозрачный фотоэлемент при нагревании, а при контакте с водой становится прозрачным, как стекло. Из подобных материалов можно будет делать окна, генерирующие электроэнергию в солнечные дни.

В журнале Nature Materials вышла статья с описанием материала, который в зависимости от температуры существует как прозрачная стеклоподобная субстанция или как темный, слабо пропускающий свет материал со структурой перовскита, работаю-

щий как фотоэлектрический элемент. Авторы статьи полагают, что однажды из этого материала можно будет делать оконные стекла, в пасмурную погоду и в сумерки пропускающие свет, а в солнечные дни работающие, как солнечная батарея. Электроэнергия, выработанная в часы работы в режиме солнечной батареи, может быть использована для зарядки аккумуляторов бытовой электроники или для охлаждения салона автомобиля, припаркованного на солнце в жаркий день.



Переход от стеклоподобной прозрачной фазы к перовскитной происходит при повышении температуры. Пока прототип, собранный Летьеном Ду (Letian Dou) и его коллегами из Университета Пердью в США, приобретает структуру перовскита при нагревании до 105 °С; это намного больше, чем температура стекла, находящегося под прямыми солнечными лучами даже в самый жаркий день. Сейчас химики работают над снижением пороговой температуры до 70 °С – этого было бы достаточно, чтобы

прозрачное стекло, нагретое лучами солнца, само превращалось в фотоэлемент.

Процесс обратим: структура перовскита теряется при контакте с влагой. После увлажнения прозрачность материала вырастает до 81,7 %, в то время как в фазе перовскита материал приобретает коричневатый оттенок и пропускает только 35,4 % видимого света. В дальнейшем Ду и его коллеги рассчитывают найти другой способ изменения фазы, чтобы владельцам будущих «умных» окон не пришлось брызгать на них водой с целью сделать их вновь прозрачными.

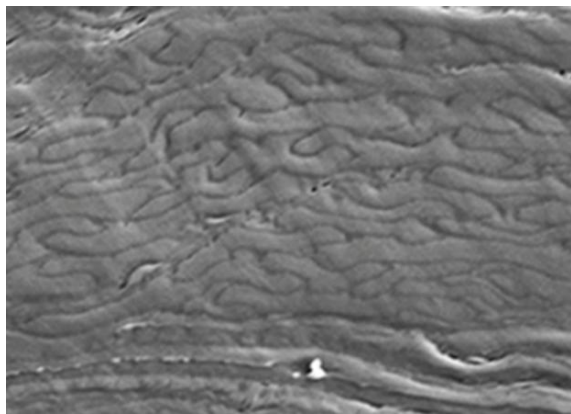
Структура кристаллов, использованных в экспериментальных фотоэлементах, называется «структурой перовскита» из-за сходства с кристаллической решеткой одноименного природного минерала, титаната кальция. В работе Ду и его коллег применялись органические комплексные соединения на основе йодида и бромиды цезия, выбранные учеными за способность к резким фазовым переходам при изменении температуры в пределах значений, при которых возможна работа фотоэлементов.

naked-science.ru



Варка в щелочи и прессование сделали дерево на порядок прочнее

Как сообщается в журнале Nature, исследователи научились повышать прочность древесины с помощью варки деревянных брусков в щелочном растворе и прессования. После этой процедуры бруски становятся в пять раз тоньше и в 11,5 раз прочнее.



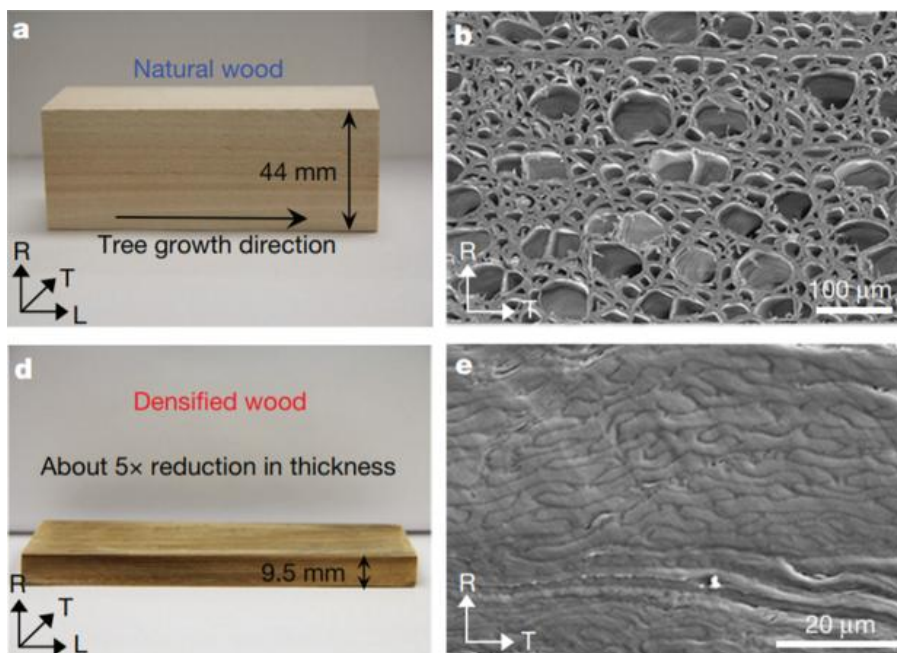
Структура древесины после обработки. Jianwei Song et al. / Nature, 2018

Далеко не все ученые-материаловеды разрабатывают новые материалы с нуля, синтезируя их искусственно. Некоторые предпочитают брать за основу уже существующие природные материалы и улучшать их характеристики различными способами. Нередко в качестве основы используется древесина – один из самых распространенных природных материалов. К примеру, в прошлом году ученые создали композитный аналог паутины, на 90 % состоящий из нановолокон целлюлозы, полученных из дерева.

Исследователи под руководством Лянбин Ху (Liangbing Hu) из Мэрилендского университета также взяли за основу древесину и разработали метод, повышающий ее прочность на порядок. Этот метод состоит из двух основных этапов. Сначала деревянные бруски помещаются в кипящий раствор гидроксида и сульфата натрия и варятся семь часов. После этого их несколько раз промывают кипящей деионизированной водой и удаляют остатки раствора. Такая обработка оставляет в древесине почти все целлюлозные волокна, но удаляет большую часть окружающих их лигнина и гемицеллюлозы. За счет этого древесина становится более пористой и менее жесткой.

После этого древесные бруски прессуются при температуре 100 °С. Тесты исследователей на дубовых и липовых брусках показали, что при этом их толщина уменьшается в пять раз, а плотность в три раза, тогда как без удаления лигнина и гемицеллюлозы плотность уменьшается гораздо меньше.

Помимо этого, ученые протестировали механические свойства обработанного дерева. Выяснилось, что после обработки прочность липы возрастает в 11,5 раз с 52 до 587 мегапаскалей. Исследователи смогли упрочнить до похожих значений (608 мегапаскалей) дубовые бруски, но их прочность была изначально в два раза выше. Такая прочность сравнима со многими марками нержавеющей стали. Удельная прочность такой древесины оказалась заметно выше, чем у многих сплавов, к примеру, в 1,7 раз выше, чем у титанового сплава Ti-6Al-4V.



Фотографии и микроструктура древесины до и после обработки. Jianwei Song et al. / Nature, 2018

Ученые проанализировали структуру на сканирующем микроскопе и выяснили, что в отличие от спрессованной древесины, из которой не удалялись лигнин и гемицеллюлозы, в обработанной древесине целлюлозные структуры при прессовании становятся гораздо ближе и переплетаются.

В 2016 г. эта группа исследователей создала похожим образом другой материал на основе древесины. Вместо того чтобы прессовать дерево после варки, они залили ее эпоксидной смолой, которая удалила из полостей внутри древесины воздух и сделала ее прозрачной.

nplus1.ru



Создан первый работоспособный прототип перезаряжаемой «протонной батареи»

Исследователи из университета RMIT, Мельбурн, Австралия, разработали и изготовили первый работоспособный образец перезаряжаемой «протонной батареи», которая в перспективе сможет выступить в качестве источника энергии для электрических автомобилей, домашних хозяйств и электронных устройств различного класса. У нового устройства, при условии его дальнейшей доработки, может оказаться более высокий показатель плотности хранения энергии, нежели у традиционных литий-ионных аккумуляторов, а некоторые другие характеристики протонной батареи сделают ее идеальным вариантом для создания устройств промежуточного хранения энергии, призванных снизить пиковую нагрузку на энергетические сети.

В прототипе протонной батареи используется электрод из углеродистого материала, который выступает в качестве своего рода хранилища водорода. Электрод представляет собой пористую структуру из активированного углерода, полученную путем соответствующей термической и химической обработки заготовки из фенольной смолы. В настоящее время

этот электрод может поглотить и хранить водород в количестве, равном 1 % от веса самого электрода.



Хранимый водород сжигается на поверхности самовосстанавливающегося топливного элемента, который может выступать в качестве катализатора, расщепляющего воду на кислород и водород. Когда производится процесс зарядки этой батареи, протоны (ядра водорода), получающиеся в результате расще-

пления молекул воды, насыщают объем углеродистого электрода и хранятся там до тех пор, пока не начнется процесс отбора энергии из батареи.

При начале отбора энергии происходит обратный процесс: попадая на поверхность топливного элемента, протоны реагируют с кислородом из атмосферы, образуя молекулы воды. В данном процессе атомы углерода не принимают никакого участия, и батарея в процессе работы не выбрасывает в окружающую среду ничего вредного.

Созданный опытный образец протонной батареи имеет площадь в $5,5 \text{ см}^2$, а ее электрическая емкость

пока соответствует емкости литий-ионной аккумуляторной батареи такой же площади средней толщины. При этом максимальное напряжение, вырабатываемое протонной батареей, составляет 1,2 В.

Дальнейшая оптимизация структуры новой батареи, по мнению ее разработчиков, позволит увеличить ее емкость, а с точки зрения эффективности преобразования и хранения энергии протонная батарея и так уже превосходит все другие системы накопления и хранения энергии, в которых используется водород.

dailytechninfo.org



Графену придали свойства «магнитного золота»

Ученые модифицировали графен и наделили его свойствами кобальта и золота – магнетизмом и спин-орбитальным взаимодействием. Разработка поможет усовершенствовать квантовые компьютеры. Результаты исследования международного коллектива с участием российских ученых из СПбГУ и ТГУ опубликованы в журнале Nano Letters.

Графен – самый легкий и прочный из всех существующих сегодня материалов, который к тому же обладает высокой электропроводностью. При взаимодействии с кобальтом и золотом графен не только сохраняет свои уникальные характеристики, но и частично перенимает свойства этих металлов – магнетизм и спин-орбитальное взаимодействие. Ученые синтезировали систему, состоящую из строго упорядоченного графена на магнитной подложке кобальта с ультратонким слоем атомов золота между ними, а затем изучили новые свойства такой системы.

«Классически спин электрона можно представить как «магнит», возникающий вследствие вращения электрона вокруг своей оси, – объяснил руководитель исследования, сотрудник СПбГУ Александр Шикин. – При этом электрон вращается еще и вокруг ядра, что создает круговой ток, а значит, и магнитное поле. Таким образом, между этим «магнитом» и магнитным полем происходит взаимодействие, которое называется спин-орбитальным. Собственное спин-орбитальное взаимодействие графена пренебрежимо мало, а у золота оно крайне велико, поэтому взаимодействие золота с графеном приводит к появлению

спин-орбитального взаимодействия у последнего, равно как и взаимодействие кобальта с графеном намагничивает его».



Одной из областей применения полученного магнитно-спин-орбитального графена может стать квантовый компьютер. Сейчас элементы информации (кубиты) для квантовых вычислений делают в основном на холодных атомах или сверхпроводящих переходах. Основной проблемой прототипов квантовых компьютеров остается скорость: кубиты не успевают сделать нужное количество операций и сохранить результат вычислений из-за взаимодействия с внешней средой. Одним из решений этой проблемы может стать изготовление кубитов на новых «квантовых» материалах – например, на основе магнитно-спин-орбитального графена.

indicator.ru



Компания C7 хочет взять в концессию МКС и запускать буксиры с ядерным двигателем

Администрация Трампа предлагает приватизировать американский сегмент МКС и передать его для

использования частным фирмам по окончании срока эксплуатации в 2025 г. В связи с этим встает вопрос

о том, что делать с российским сегментом. Здесь тоже возможен вариант с коммерческим использованием. Например, генеральный директор компании «С7 космические транспортные системы» Сергей Сопов рассказал в интервью газете «Известия» о планах создания орбитального космодрома.

«Роскосмос», NASA и другие космические агентства планируют создать на окололунной орбите посещаемую станцию. Однако средств на эксплуатацию сразу двух станций – МКС и у Луны – не хватит ни у России, ни у США. В этой связи все государства-участники проекта МКС заинтересованы в привлечении частных компаний к работе на низкой околоземной орбите. Мы готовы сотрудничать с «Роскосмосом» в этом вопросе. Для нас российский сегмент МКС представляет интерес как научная и промышленная площадка, где можно наладить уникальные производства, сборку космических аппаратов, организовать «хаб» для дальнейшей экспансии – освоения Луны и Марса».



По мнению бизнесмена, межпланетные корабли и зонды выгоднее и безопаснее собирать из мелких модулей прямо на орбите, а экипажи сначала доставлять на станцию и оттуда перевозить на корабль, который летит, допустим, к Луне. Другими словами, орбитальный космодром будет работать как перевалочная база для полётов в дальний космос.

Сергей Сопов считает, что его компания может осуществлять доставку грузов к Луне и Марсу с помощью буксира с ядерной энергодвигательной установкой (ЯЭРДУ) мегаваттного класса. Для того чтобы обойти международный запрет на использование ядерных систем на низкой околоземной орбите, Сопов предлагает в перспективе увеличить высоту полета МКС до 600 км.

Теперь компания «С7 космические транспортные системы» намерена обратиться к «Роскосмосу» с предложением сдать российскую часть станции в концессию.

В 2016 г. материнское предприятие ЗАО «Группа компаний “С7”» Владислава Филёва купило у Sea Launch плавучий космодром «Морской старт» и товарный знак Sea Launch. Пока сделка не закрыта, компания предлагает на рынке услуги по выводу спутников на ракетах-носителях «Зенит» с Байконура («Наземный старт»). ООО «С7 космические транспортные системы» является оператором проекта.

Первые две ступени ракеты-носителя для компании изготавливает предприятие «Южмаш» (город Днепр). Сейчас сделан заказ на 12 «Зенитов», один находится в производстве. Окончательная сборка осуществляется в США.

Как полагает Сергей Сопов, использование дешёвых двухступенчатых ракет «Зенит» выгоднее, чем трёхступенчатых дорогих носителей вроде «Союз-5» (по сути, потолстевшая ракета «Зенит»), а также выгоднее ракет с возвращаемой ступенью вроде Falcon 9 от SpaceX. «В теории известно, что эффективность многоразовой системы начинается с шести стартов в год. Если запусков меньше, то целесообразнее использовать дешёвую одноразовую ракету», – сказал Сопов.



Рисунок NASA

Гендиректор компании также сказал, что представляет «С7 космические транспортные системы» в качестве первой космической транспортной компании мира, если в наличии будут следующие элементы:

- дешёвый и надёжный носитель с запусками с экватора по программе «Морской старт», а также с Байконура по программе «Наземный старт»;
- инфраструктура на низкой околоземной орбите в виде МКС;
- транспортные средства для межорбитальных и межпланетных перевозок с ЯЭРДУ.

geektimes.ru





Предложен новый способ серийного производства полупроводников

Химики канадского Университета Ватерлоо упростили процесс создания нового класса быстрых и недорогих полупроводников. Благодаря открытому ими методу можно использовать углерод вместо кремния, что позволит уменьшить размер и увеличить скорость и срок службы этих устройств.

«Мы приближаемся к пределам физических возможностей кремниевых устройств, – сказал один из исследователей Дерек Шиппер. – Электроника на основе одностенных углеродных нанотрубок будет не только более мощной, но и станет потреблять меньше энергии».

Процесс, названный химиками Alignment Relay Technique, основан на жидких кристаллах, которые передают информацию об ориентации металлоксидной поверхности. Затем небольшие ароматические молекулы иптические прикрепляются к поверхности, формируя паттерны направления; их структура содержит небольшие углубления, достаточные

для того, чтобы вместить углеродные нанотрубки определенного размера.

При этом сам процесс, после того как он разработан, уже не представляет особой сложности и не требует специального оборудования. Всю тяжелую работу берет на себя молекула. В отличие от метода самосборки, основанного на создании подходящих молекул, которые должны точно соответствовать друг другу, этим процессом можно управлять на каждом этапе, включая создание «кармана» в иптической. Кроме того, как пишет Phys.org., это первый метод, который решает одновременно проблему ориентации и очистки углеродных нанотрубок.

«Впервые химики смогли управлять ориентацией маленьких молекул, ковалентно связанных с поверхностью, извне, – говорит Шиппер. – Мы не первые, кто нашел потенциальное решение для углеродных нанотрубок. Но оно единственное позволяет решить одновременно и проблему ориентации, и проблему чистоты».

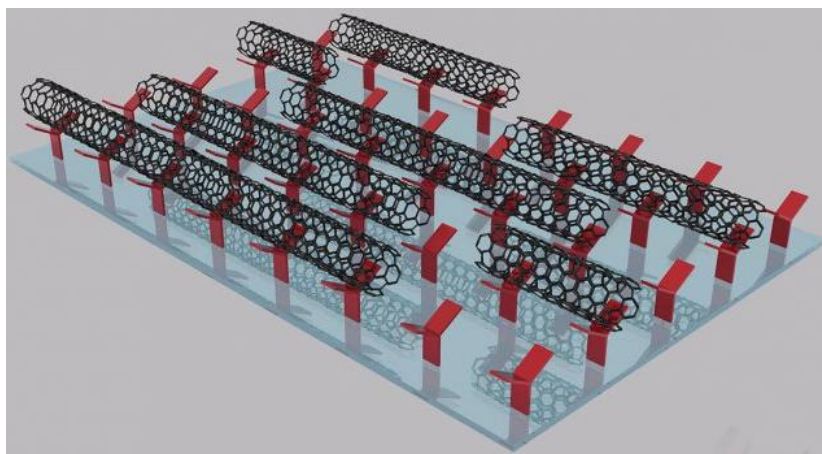


Фото: Angewandte Chemie International Edition

Физики Техасского университета в Далласе разработали принципиально новую вычислительную систему, созданную исключительно из углерода. Электроны, движущиеся через углеродные нанотрубки, создают магнитное поле, воздействующее на ток в графеновой наноленте, и попадают в логические вентили, физически между собой не соединенные.

рубки, создают магнитное поле, воздействующее на ток в графеновой наноленте, и попадают в логические вентили, физически между собой не соединенные.

hightech.fm



Из жидкого сплава сделали прозрачный и гибкий проводник

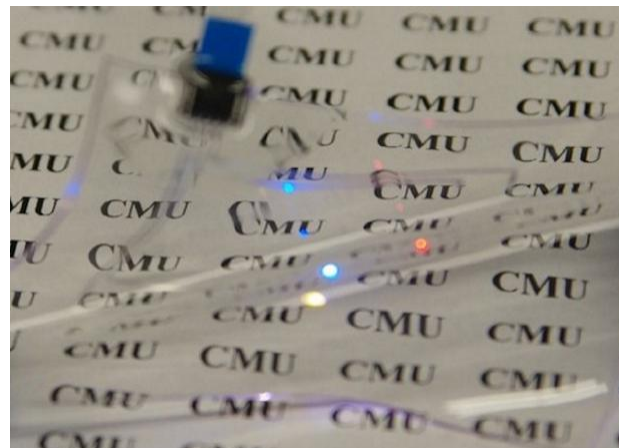
Инженеры разработали прозрачный, эластичный и электропроводный материал на основе сплавов. Как сообщается в журнале *Advanced Materials*, этот сплав состоит из тонких полосок нескольких сплавов металлов, в том числе жидкого, которые слишком малы, чтобы их можно было увидеть невооружен-

ным глазом, но достаточно электропроводны, чтобы снабжать энергией электронные устройства, такие как светодиоды. Поскольку все больше инженеров создают гибкую электронику, требуются новые материалы, которые могут не только проводить ток, но и быть прозрачными. Как правило, для этого исполь-

зуют прозрачные полимеры, но они плохо реагируют на механические нагрузки – даже если они могут растягиваться, многие теряют электропроводность и выдерживают мало циклов растяжения. Другое популярное решение – наносить на прозрачную и эластичную полимерную основу проводящие металлические дорожки. Проблема такого подхода заключается в том, что пока никому не удалось сделать такой композит с высокой общей прозрачностью и незаметными человеческому глазу полосками.

Инженеры под руководством Кармела Маджиди (Carmel Majidi) из Университета Карнеги – Меллона смогли создать по такой схеме прозрачный, эластичный и электропроводный материал. В его основе лежит прозрачный эластомер полидиметилсилоксан, на который наносят 20-нанометровый слой хрома и 100-нанометровый слой меди. После этого образец погружают в жидкий при комнатной температуре сплав EGaIn, который на три четверти состоит из

галлия и на четверть из индия. При этом он взаимодействует с медью и образует новый сплав. После того как образец достали из емкости с жидким сплавом и промыли, часть сплава все же осталась на поверхности.



Chengfeng Pan et al. / Advanced Materials, 2018

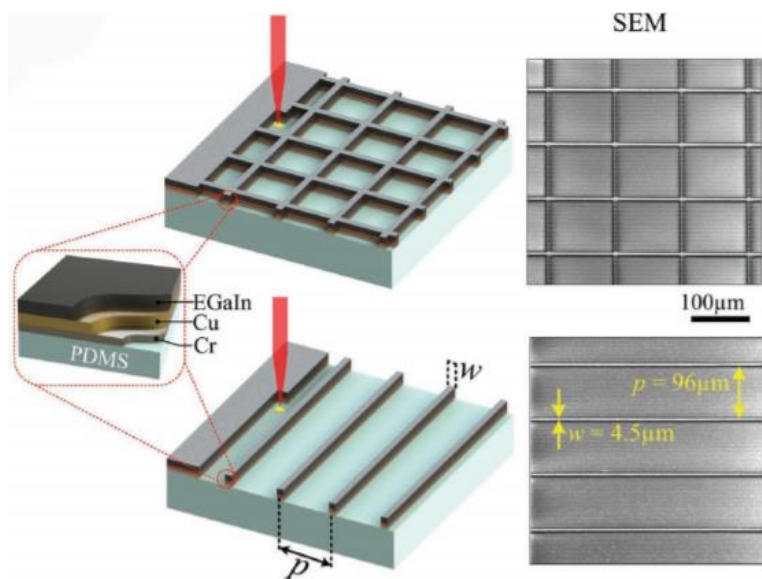


Схема вырезания проводящих дорожек лазером.
Chengfeng Pan et al. / Advanced Materials, 2018

Инженеры показали, что такие электропроводящие дорожки можно использовать для соединения электронных компонентов. К примеру, на основе такого материала можно создавать сенсорные контактные линзы для камер. Инженеры припаяли к проводящим дорожкам несколько светодиодов и подключили образец к компьютеру и датчику углекислого газа. После распыления газа из баллончика

на линзе последовательно загораются светодиоды, сигнализирующие о разных концентрациях газа.

Прозрачные и эластичные материалы уже не первый год используются в разных разработках. Так, на их основе создали прозрачный тачпад, который можно прикрепить на руке, и прозрачный трибоэлектрический генератор, который вырабатывает электричество из движений тела.

nplus1.ru

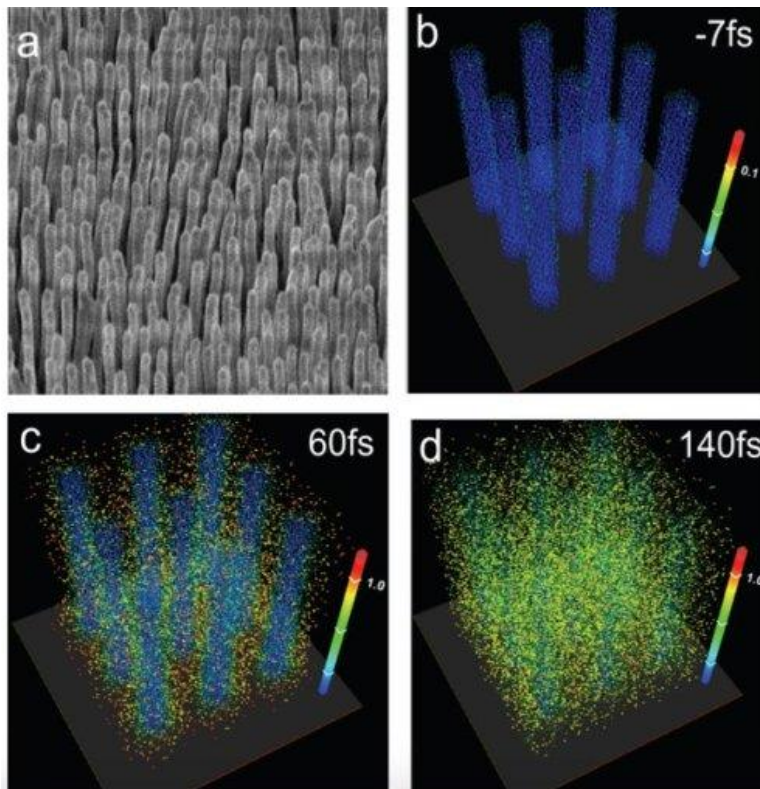


Применение нанопроводников позволило увеличить эффективность микромасштабного ядерного синтеза



Исследователи из университета Колорадо (Colorado State University, CSU) установили новый рекорд в области эффективности ядерного синтеза, реализованного на микромасштабном уровне. Используя импульсы сверхскоростного мощного лазера, исследователи инициировали реакции ядерного синтеза, эффективность которых в 500 раз превышала эффективность в других подобных экспериментах. А ключевым моментом этого достижения является то, что в качестве цели для лазерного света выступал не традиционный плоский полимерный материал, в данном случае свет лазера фокусировался на множестве нанопроводников, материал которых образовал невероятно горячую и плотную плазму.

Отметим, что у нас в распоряжении имеется собственный термоядерный реактор, Солнце, которому мы обязаны своим существованием. В центре Солнца атомы водорода, проходя через цепочки ядерных реакций, превращаются в ядра гелия, выделяя при этом огромное количество энергии. Теоретически, если мы сможем использовать подобные процессы на Земле, то человечество получит ничем неограниченный источник экологически чистой энергии. В настоящее время в этом направлении проводится целый ряд работ и экспериментов, однако, практическое применение термоядерного синтеза в энергетике так и остается за пределами досягаемости.



Однако процесс термоядерного синтеза может оказаться очень полезным, работая в гораздо меньшем масштабе, нежели солнце и ядерные реакторы. Кроме того, для толчка термоядерного синтеза на микромасштабе не требуются огромные лазерные установки и атомная электростанция неподалеку. Исследователям из CSU вполне хватает одного лазера, который можно разместить на поверхности обычного лабораторного стола и который способен вырабатывать быстрые импульсы света.

В других подобных экспериментах в качестве мишени для лазерного света обычно используется плоская поверхность специального полимерного материала. Но в данном случае исследователи использовали «сеть» из нанопроводников, изготовленных из полиэтилена, насыщенного дейтерием. Мощные импульсы лазерного света разрушают и испаряют тончайшие нанопроводники в течение нескольких фемтосекунд (квадриллионных долей секунды), создавая в области пространства сверхвысокоплотную и

высокотемпературную плазму, которая, в свою очередь, испускает гелий и большое количество свободных нейтронов.

Ученые сообщили, что в своих экспериментах им удалось получить до 2 млн нейтронов в расчете на один джоуль энергии лазерного света. Это приблизительно в 500 раз больше, чем было получено в других экспериментах, что является абсолютным рекордом на сегодняшний день.

Однако термоядерный синтез, реализованный на микромасштабе, вряд ли можно будет использовать для получения энергии. Данное направление исследований нацелено на улучшение нашего понимания взаимодействия света и материи, кроме того, термоядерный синтез является достаточно эффективным «генератором» нейтронов, которые могут быть использованы для проведения съемки различных процессов внутри материалов, куда не может проникнуть даже рентгеновское излучение.

dailytechinfo.org



Аморфные нанокompозиты увеличат мощность преобразования энергии



В Университете Карнеги – Меллона группа профессора материаловедения Мака Мак-Генри (Mike McHenry), занимающаяся разработкой металлических аморфных нанокompозитов (Metal Amorphous Nanocomposite Materials, MANC), создала два новых фазовых магнитных материала, сочетающих большую магнитную индукцию нанокристаллов и высокое электрическое сопротивление металлического стекла.

MANC недавно нашли применение в мощных трансформаторах, необходимых для преобразования энергии, поступающей от солнечных и ветроэлек-

тростанций, в индукторах энергосети и в электромоторах для машин и самолётов.

Обычно используемая в трансформаторах кремнистая (электротехническая) сталь характеризуется быстрым ростом потерь энергии и увеличением частоты переменного тока, но изотропная структура MANC позволяет этим материалам перемагничиваться с частотой, достигающей десятков килогерц, практически без потерь энергии.

Для синтеза новых материалов авторы применили технику наплавки планарным потоком (planar flow casting) на вращающийся медный барабан. Достижимая при этом очень высокая скорость охлаждения жидкого сплава железа, кобальта и никеля (миллион градусов в секунду) «замораживает» его в метастабильном состоянии металлического стекла.

В настоящее время команда Мак-Генри вместе с NASA, корпорацией Eaton и Национальной лабораторией энергетических технологий (NETL) и Университетом Северной Каролины работают над финансируемым Министерством энергетики США проектом создания мощного трёхпортового трансформатора, который свяжет фотоэлектрические панели с накопителем генерируемой ими электроэнергии.

ko.com.ua





Изобретен наногенератор, который вырабатывает электрический ток при сгибании пальца



Сотрудники Университета Буффало и Китайской академии наук разработали специальное устройство, которое может преобразовывать движения человеческого тела в электроэнергию. Возможно, в скором времени мы сможем заряжать смартфоны и планшеты, всего лишь сгибая пальцы рук.

В основе работы наногенератора лежит трибоэлектрический эффект – явление, при котором электрические заряды появляются во время трения материалов. В качестве основы разработчики использовали золото и полидиметилсилоксан (ПДМС). Прибор крепится на палец руки, и, когда человек начинает им двигать, электроны перемещаются между золотыми слоями и слоем ПДМС, в результате выра-

батывается электроток. Чем сильнее и чаще происходят движения, тем большее количество энергии получается на выходе.

Размер устройства составляет полтора сантиметра в длину и один сантиметр в ширину; максимальное напряжение – 124 В, сила тока – 10 микроампер, а плотность мощности – 0,22 милливольт на квадратный сантиметр. Этого недостаточно, чтобы полностью зарядить, например, смартфон, но зато ученым уже удалось зажечь одновременно 48 светодиодов.

Создатели новинки утверждают, что, в сравнении с другими трибоэлектрическими приборами, этот отличается низкой стоимостью и простотой производства.

«Никому не нравится повсюду носить с собой дополнительный источник электроэнергии или быть привязанным к розетке, – сказал один из создателей прибора Киаканг Ган (Qiaoqiang Gan), – поэтому мы решили использовать ресурсы человеческого тела».

Ученые планируют увеличить размер пластин и в дальнейшем превратить наногенератор в достойную замену переносным зарядным устройствам.

Статья опубликована в журнале NanoEnergy.

naked-science.ru



Китайская Hanergy побила сразу три рекорда КПД солнечных элементов

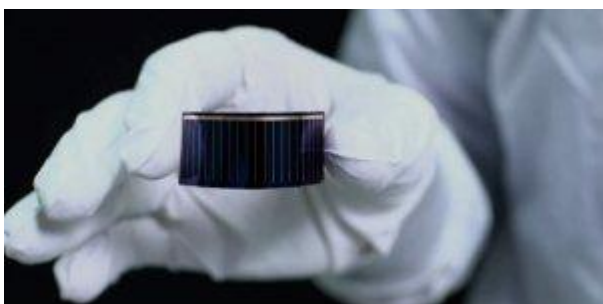


Фото: EAST NEWS

Новая технология преобразования солнечной энергии, разработанная китайской компанией Hanergy, побила сразу три мировых рекорда по энергоэффективности. Как пишет China Daily, новая технология может использоваться в беспилотных летательных аппаратах, солнечных панелях в домах, транспортных средствах и цифровых устройствах.

Hanergy – крупнейший производитель тонкопленочных солнечных элементов. Три вида панелей, выпускаемых дочерними компаниями Hanergy – Alta Devices, Solibro и MiaSole, – побили мировой рекорд по энергоэффективности. Это одноэлементный солнечный модуль GaAs, двойные стеклянные солнечные модули CIGS и солнечные модули CIGS на гибкой подложке, которые имеют рекордную эффективность преобразования энергии в 25,1%, 18,72 % и 17,88 % соответственно.

Новая технология может использоваться для беспилотных летательных аппаратов, работающих на солнечной энергии, а также в панелях на крышах домов, новых транспортных средствах и различной электронике. По словам представителей компании, возможности применения «бесконечны», так как технология может применяться практически во всех инновационных областях.

Кроме того, компания выпустила дрон на солнечных батареях. Без подзарядки он способен находить-

ся в воздухе 6–10 часов, тогда как время работы беспилотников, оснащенных только литий-ионными батареями, составляет всего полтора – два часа.

Как пишет издание, ожидается, что в ближайшие три года рынок солнечных панелей в КНР увеличится до \$15,1 млрд и станет дополнительным стимулом для роста экономики Китая.

hightech.fm



Физики научились управлять порядком слоев в трехслойном графене

Японские физики разработали способ селективного получения трехслойного графена, с помощью которого можно контролировать точный порядок и взаимное положение слоев. Как пишут ученые в NPG Asia Materials, это позволяет управлять электронными свойствами графена, в частности, меняя линейную структуру электронных зон на параболическую.

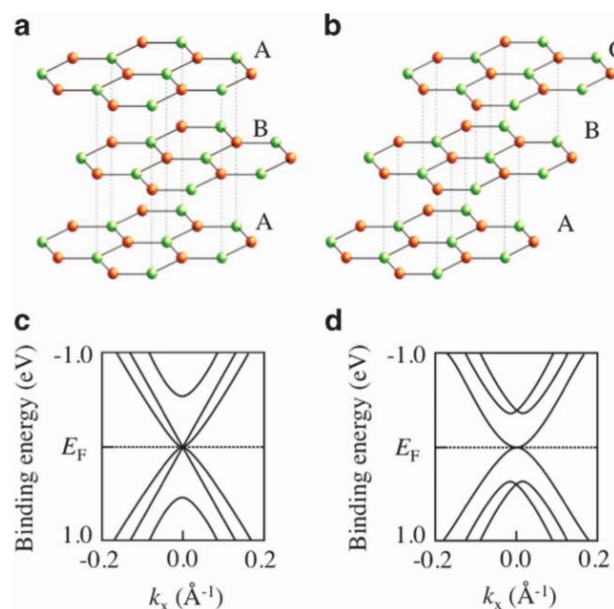
Структура кристаллов с гексагональной симметрией, как правило, определяется правилами плотнейшей шаровой упаковки, при которой атомы укладываются таким образом, чтобы занимать максимальный объем и сводить к минимуму свободное пространство между собой. Такая упаковка представляет собой составленные в стопку гексагональные слои, в которой каждый следующий слой оказывается смещенным относительно предыдущего. Всего возможно два варианта смещений, поэтому минимальное количество слоев разного типа в таком кристалле составляет два (в таком случае просто чередуются слои типов А и В), а максимальное – три (такие структуры могут быть как упорядоченными, например, ...ABCABC..., так и со случайным порядком слоев).

Поскольку гексагональную структуру решетки имеет и графен, то все эти правила верны как для графита, так и для графена, который образован не единственным слоем, а несколькими. В частности, если в трехслойном графене первые два слоя имеют структуру АВ, то третий слой может иметь две возможные пространственные ориентации: А или С. Согласно теоретическим оценкам, в зависимости от типа слоя, у двух типов трехслойного графена должны быть различными и электронные свойства, однако до настоящего дня получить селективно один из двух типов графена и исследовать их свойства экспериментально не удавалось.

Японские физики под руководством Такаси Такахаши (Takashi Takahashi) из Университета Тохоку предложили способ получения трехслойного графена с управляемым порядком слоев. Для этого сначала на подложке из карбида кремния исследователи выращивали двухслойный графен, оставляя между графеном и подложкой еще один, буферный, слой, состоящий из атомов углерода и связанный со структурой карбида кремния. Условия для получения графе-

на с разным порядком слоев отличались: в одном случае использовался отжиг в разреженной атмосфере аргона при температуре около 1 500 градусов Цельсия, а в другом – отжиг в вакууме при температуре 1 300 градусов. После отжига с помощью дополнительной обработки водородом при 500 градусах буферный слой заменялся слоем графена.

Полученные трехслойные структуры авторы работы исследовали с помощью электронной микроскопии, а их электронные свойства изучали с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES). Согласно теоретическим предсказаниям, характерная для однослойного графена линейная связь между импульсом и энергией электронов (которая на энергетической диаграмме проявляется в форме правильного дираковского конуса) в одном из типов трехслойного кристалла должна полностью пропасть, а в другом – сохраниться лишь для одной из трех пар энергетических зон.



Кристаллическая структура трехслойного графена с двумя типами упаковки слоев (сверху) и соответствующая структура энергетических зон, рассчитанная теоретически (снизу).

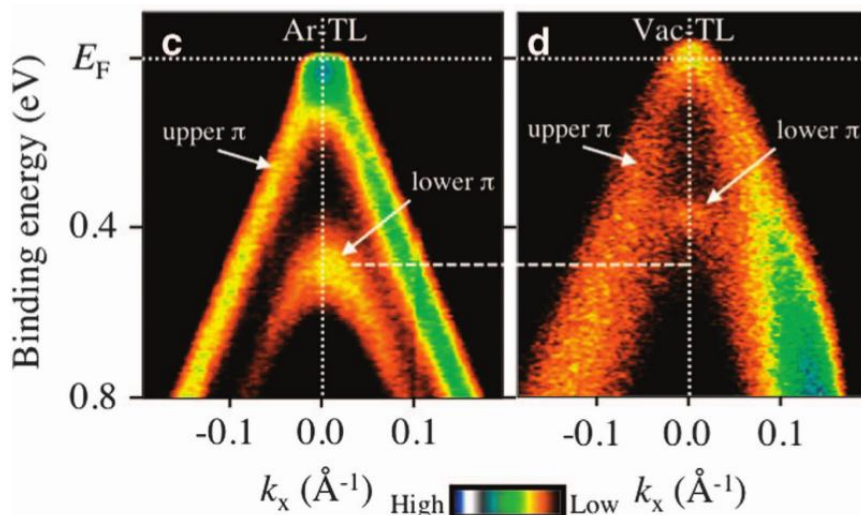
K. Sugawara et al./ NPG Asia Materials, 2018

SPACE

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

SPACE

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Данные измерений фотоэлектронной спектроскопии с формой энергетических зон трехслойного графена с двумя типами упорядочения слоев (справа – АВА, слева – АВС). К. Sugawara et al./ NPG Asia Materials, 2018

Экспериментальные измерения подтвердили, что две различные модификации трехслойного графена обладают разными электронными свойствами. В случае порядка слоев АВА образуются три энергетические зоны, две из которых сходятся на уровне Ферми (одна линейная, как в однослойном графене, а другая – параболическая), тогда как для графена типа АВС лишь одна из трех пар зон имеет контакт на уровне Ферми, для двух других потолок валентной зоны расположен на уровне примерно 0,35 электрон-вольт ниже уровня Ферми.

Авторы работы отмечают, что подобное отличие в электронной структуре трехслойного графена, которым можно управлять просто с помощью расположения слоев друг относительно друга, открывает

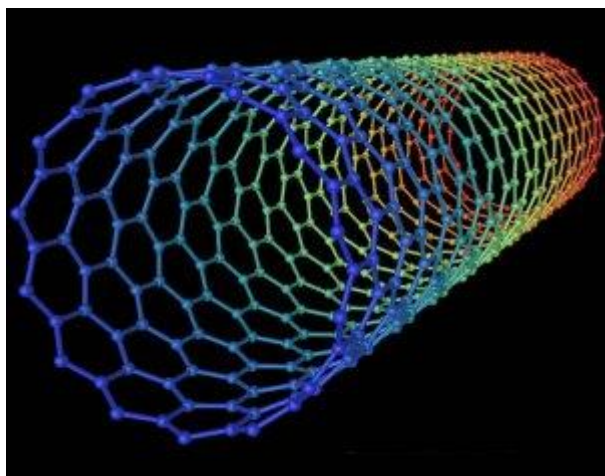
дополнительные возможности для создания электронных устройств на основе многослойных структур из двумерных кристаллов.

Стоит отметить, что уникальными свойствами (электронными, тепловыми и механическими), которые отличаются от свойств объемного кристалла, обладает графен, в котором содержится один, два или три углеродных слоя. Например, только двухслойный графен можно сжать в алмазоподобную структуру с повышенной поперечной жесткостью. Для структур, состоящих из четырех и более слоев, значительная часть свойств не отличается от свойств графита. Это же характерно и для других двумерных материалов, в частности дихалькогенидов переходных металлов.

nplus1.ru



Ученые разработали высокопроводящий прозрачный электрод на основе углеродных нанотрубок



Специалисты из Сколтеха под руководством профессора Альберта Насибулина придумали, как улучшить оптические и электрические свойства пленок из углеродных нанотрубок

Полученные результаты могут ускорить развитие гибкой и носимой электроники, основанной на углеродных нанотрубках.

Рынок сенсорной электроники активно растет, и для создания электроники следующего поколения необходимы новые материалы. Устройства и приборы на основе таких материалов должны быть гибкими и растягиваемыми, работать дольше и в условиях любого освещения на улице.

Применяемые в современной электронике прозрачные проводники на основе оксидов металлов имеют ряд недостатков: хрупкость, сложности при

использовании в солнечную погоду из-за высокого коэффициента отражения, неестественные цвета пленки электрода, невозможность сгибаться и растягиваться. Все это ограничивает различные возможности применения прозрачных электродов в современных дисплеях и носимой электронике.

Пленки из однослойных углеродных нанотрубок – потенциальные кандидаты электроники будущего, способные заменить наиболее часто используемые оксиды металлов на основе цинка и олова. Они гибкие, прочные, химически стабильные. Однако для того, чтобы пленки из углеродных нанотрубок все-таки смогли заменить пленки из оксида металла, необходимо улучшить их опико-электрические характеристики, которые ограничивают их область применения.

Ученым из Сколтеха удалось создать пленки из углеродных нанотрубок, не уступающие по своим характеристикам пленкам из оксидов металлов, широко используемым в электронике.

При производстве таких тонких пленок важным этапом является процесс легирования, он меняет электрические и оптические характеристики получаемого материала. Специалисты усовершенст

ли технологию легирования однослойных углеродных нанотрубок, что позволило значительно улучшить характеристики обработанных пленок.

«В нашей работе мы использовали хлорид золота как наиболее эффективный легирующий элемент. С его помощью мы смогли улучшить опико-электрические характеристики пленок из однослойных углеродных нанотрубок. В частности, мы оптимизировали условия легирования и выбрали оптимальный растворитель для такого легирования. Мы изучили, как наиболее распространенные растворители при разных температурах оказывают влияние на опико-электрические характеристики», – рассказал первый автор исследования, аспирант Сколтеха Алексей Цапенко.

В результатах исследования показаны рекордные значения опико-электрических характеристик для пленок из однослойных углеродных нанотрубок, а именно, эквивалентное поверхностное сопротивление, равное $40 \Omega/\square$, при пропускании 90 % в видимом диапазоне спектра. Полученные значения существенно превосходят описанные ранее для пленок из однослойных углеродных нанотрубок.

naked-science.ru



Создан первый в мире солнечный топливный реактор, который будет продолжать работать в темное время суток



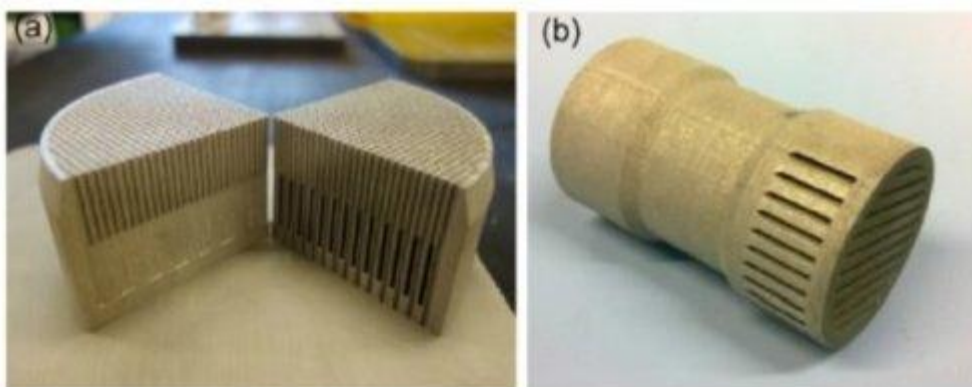
Ученые из Немецкого космического агентства DLR разработали первый в своем роде солнечный топливный реактор, особенности строения которого позволяют ему продолжать функционировать и в темное время суток. Реактор, получивший название

CONTISOL, способен вырабатывать водород и другие виды топлива, используя концентрированную солнечную энергию. А в качестве теплоносителя, позволяющего аккумулировать и передавать тепло в пределах устройства, выступает обычный воздух.



Эффективность традиционных солнечных топливных реакторов напрямую зависит от количества тепла, получаемого от энергии солнечных лучей, стоит только солнцу скрыться за тучами или горизонтом, такие реакторы полностью перестают работать. «Нам удалось совместить в одном устройстве две разные технологии: технологию эффективного аккумулирования энергии и технологию химических преобразований под воздействием тепловой энергии», – написали исследователи.

Собственно химические превращения происходят внутри изолированных каналов, внутренняя поверхность которых покрывается слоем соответствующего катализатора. А вся остальная структура реактора CONTISOL представляет собой теплообменник и хранилище тепловой энергии, запасов которой хватает для продолжения работы реактора в случае исчезновения притока энергии извне.



В настоящее время исследователями из DLR был создан небольшой опытный образец реактора CONTISOL, который работает при температуре 850 градусов Цельсия и который способен превратить в химическую энергию вырабатываемого топлива до 5 кВт тепловой энергии, подаваемой извне. «Это масштаб экспериментального опытного образца, который мы используем для разработки принципов контроля и управления такими устройствами, – сообщили исследователи. – Когда мы завершим работы, можно будет говорить о подобных установках, мощностью от 1 МВт до 5 МВт и даже до 100 МВт».

Испытания опытного реактора CONTISOL проводились в двух местах, сначала на установке «ис-

кусственного солнца» Synlight, которая находится в распоряжении агентства DLR и которая обеспечивала нагрев реактора до температуры 850 градусов Цельсия. Позже этот же реактор был испытан в более жестких условиях – на солнечной башне, стоящей в середине поля зеркал, а температура нагрева реактора в последнем случае составила около 1 100 градусов Цельсия.

В заключение следует отметить, что немецкие ученые надеются на то, что их разработка превратится в будущем в полномасштабную систему, которая сделает водородную энергетику и водородные автомобили еще на один шаг ближе к массовому внедрению и использованию.

dailytechinfo.org

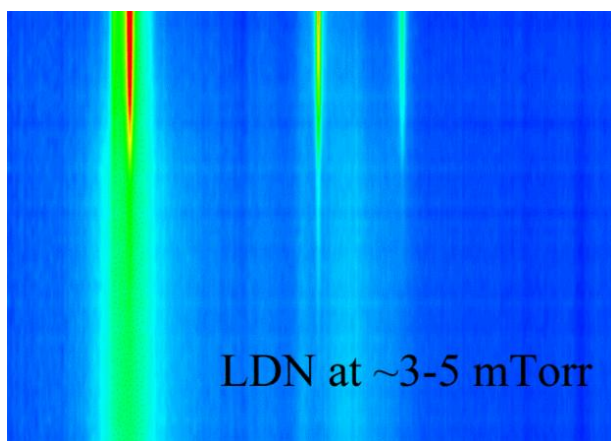


Быстрая декомпрессия льда помогла получить воду пониженной плотности

С помощью быстрой декомпрессии льда физикам впервые удалось получить в лабораторных условиях фазу жидкой воды пониженной плотности. Существование подобной метастабильной фазы воды наблюдается при температуре от -135 до -110 градусов Цельсия и давлении от 0,4 до 0,7 паскаля, сообщили ученые в Proceedings of the National Academy of Sciences.

На данный момент для водного льда известно 17 различных кристаллических фаз, устойчивых при различных температурах и давлениях. Изменяя внешние условия, лед можно переводить из одного состояния в другое. При этом проводить эти изменения можно с разной скоростью: если делать это достаточно мед-

ленно, то происходит образование термодинамически устойчивых состояний, а если быстро, то молекулы не успевают подстроиться под новые условия и образуются метастабильные фазы. Однако для воды значительная часть возможных метастабильных фаз пока описана только теоретически или с помощью компьютерного моделирования. Добиться же получения необходимых условий в эксперименте весьма затруднительно. Одни из таких метастабильных фаз – жидкая вода пониженной и повышенной плотности, существование которых возможно при низких температурах и давлениях и на данный момент только теоретически.

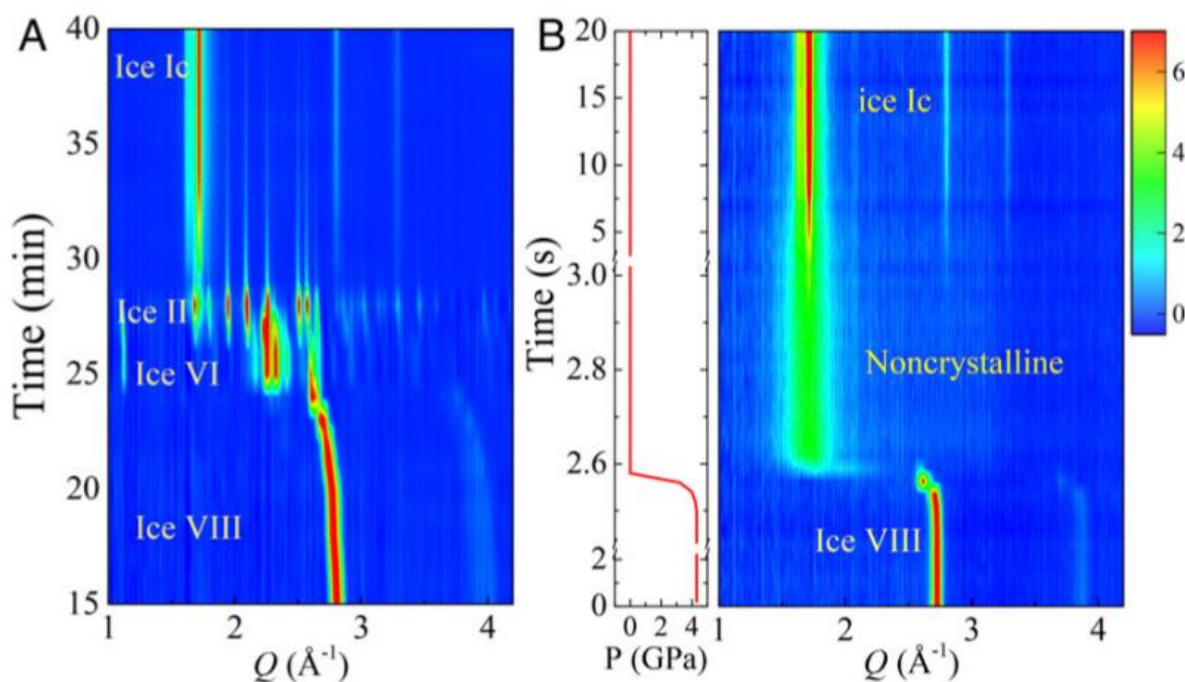


Картина изменения интенсивности рентгеновских дифракционных пиков при декомпрессии льда при температуре 150 кельвинов. Фаза воды низкой плотности на рисунке обозначена надписью (LDN – low-density noncrystalline). С. Lin et al./ PNAS, 2018

Американские физики из Института Карнеги под руководством Гоиня Шэня (Guoyin Shen) обнаружили, что фазу жидкой воды пониженной плотности можно получить при быстрой декомпрессии фазы льда VIII. Это твердая фаза с тетрагональной сим-

метрией устойчива при давлении больше двух гигапаскалей в широком диапазоне температур. При медленном снижении давления (со скоростями ниже 0,01 гигапаскалей в секунду) до 0,5 паскаля при температуре ниже -100 градусов Цельсия этот лед переходит в фазу льда VI, а затем – в кубическую модификацию льда I (Ic).

Оказалось, что если снижать давление быстро, то при температуре от -135 до -110 градусов Цельсия фазовые превращения происходят по-другому: вместо последовательного перехода между различными равновесными фазами, лед VIII переходит в Ic через единственное промежуточное состояние в этом случае – метастабильную некристаллическую фазу. У льда таких фаз несколько, в первую очередь аморфный твердый лед различной плотности. Однако в данном случае температуры проведения эксперимента выше температуры стеклования льда, и исходя из данных времязависимой рентгеновской дифракции, обнаруженная некристаллическая фаза соответствует жидкой фазе пониженной плотности.



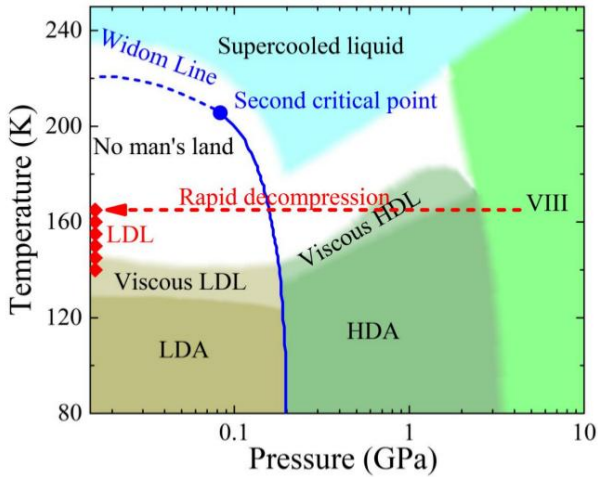
Изменение дифракционной картины при декомпрессии льда VIII: слева – при медленном снижении давления (скорость меньше 0,01 гигапаскаля в секунду), справа – при быстрой (48 гигапаскалей в секунду). Температура в обоих случаях 160 кельвинов.

С. Lin et al./ PNAS, 2018

Ученые утверждают, что для этой фазы характерно формирование сетки с тетраэдрической структурой, которая сильно отличается от структуры переохлажденной воды и скорее соответствует кристал-

лическим мотивам, которые можно найти в структуре аморфного льда. По словам авторов работы, одним из подтверждений образования именно фазы воды пониженной плотности служит сильная зави-

симость от температуры скорости кристаллизации кубической фазы льда из фазы воды пониженной плотности. Это отличие составляет сразу шесть порядков и меняется от получаса при 140 кельвинах до 8 миллисекунд при 165 кельвинах.



Фазовая диаграмма некристаллических (жидких и аморфных) метастабильных состояний воды при температурах ниже -20 градусов Цельсия. Красными точками обозначены условия, при которых экспериментально наблюдалось существование воды пониженной плотности при быстрой декомпрессии льда VIII. C. Lin et al./ PNAS, 2018

Диапазон условий, при которых наблюдается образование фазы жидкой воды пониженной плотности, сильно зависит и от скорости декомпрессии. Если понижать давление со скоростью 50 гигапа-

скалей в секунду, то максимальная температура, при которой наблюдается образование нужной фазы, составляет 165 кельвинов. При уменьшении скорости декомпрессии до пяти гигапаскалей в секунду область существования нужной фазы сужается и уже при температуре выше 145 кельвинов происходит прямой переход из фазы льда VIII в состояние льда VI.

Авторы работы отмечают, что на фазовой диаграмме метастабильных состояний льда еще остаются области параметров, которые пока недоступны экспериментально. В будущем ученым предстоит изучение этих состояний воды, а также переходов между ними в лабораторных условиях.

Напомним, что совсем недавно другая группа ученых впервые получила в лабораторных условиях другую необычную фазу воды – суперионный лед. В таком состоянии ионы кислорода образуют жесткую кристаллическую решетку, а ионы водорода свободно перемещаются по ней. Также ученые успешно получают и другие метастабильные фазы льда: например, недавно физики смогли получить лед с рекордной долей кубической фазы – 78 процентов. Кроме того, с помощью компьютерного моделирования исследователи обнаружили, что при отрицательных давлениях (когда к кристаллу приложена растягивающая сила) возможно существование пористых фаз пониженной плотности.

nplus1.ru

