



## ГЛОБАЛЬНОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Г. Филимонов, А.А. Филимонова, Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

agfilimonov@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Провести анализ перспективы встраивания водородных технологий в традиционные направления развития электроэнергетической отрасли в мире и России. Выделить конкурентные преимущества России в изменяющейся структуре отрасли с переходом на «зеленый» водород. *МЕТОДЫ.* Проводится анализ литературных данных и данных международного информационного обмена. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Наиболее актуальной научно-технической проблемой экономики, затрагивающей практически любой аспект хозяйственной деятельности человека, является вопрос доступности энергоресурсов и влияние на окружающую среду. Именно сейчас, в условиях ограничений, вызванных пандемией COVID-19, особенно остро проявились тенденции глобализации, кратно возросла степень трансграничной информационной коммуникации с использованием цифровых возможностей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Как никогда актуален переход на новую технологическую ступень энергообеспечения нашего общества, основанную на инновационных подходах к созданию интеллектуально управляемых глобальных энергосистем с их укрупнением и, в то же время, децентрализацией и распределением на локальные уровни центров, производства, потребления и управления, увеличением доли малых ВИЭ, внедрением новых цифровых решений, применением в промышленном масштабе водородных технологических цепочек и гибридных систем на их основе и других перспективных энерготехнологий.

**Ключевые слова:** энергетика, водород, возобновляемые источники энергии, парогазовые технологии.

**Для цитирования:** Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-13.

## GLOBAL ENERGY ASSOCIATION: NEW OPPORTUNITIES OF HYDROGEN TECHNOLOGIES

AA. Filimonova, AA. Chichirov, ND. Chichirova, AG. Filimonov

Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia

agfilimonov@mail.ru

**Abstract:** *PURPOSE.* To analyze the prospects of integrating hydrogen technologies into the traditional directions of development of the electric power industry in the world and Russia. To highlight the competitive advantages of Russia in the changing structure of the industry with the transition to "green" hydrogen. *METHODS.* The analysis of the literature data and the data of the international information exchange is carried out. *RESULTS.* The most urgent scientific and technical problem of the economy, affecting any practical aspect of human economic activity, is the issue of the availability of energy resources and the impact on the environment. It is now, in the context of the restrictions caused by the COVID-19 pandemic, that the trends of globalization are particularly acute, and the degree of cross-border information communication using digital capabilities has increased many times. *CONCLUSION.* The transition to a new technological

*stage of energy supply for our society is more urgent than ever, based on innovative approaches to the creation of intelligently managed global energy systems with their consolidation and, at the same time, decentralization and distribution to local levels of centers, production, consumption and management, increasing the share of small RES, the introduction of new digital solutions, the use of hydrogen technology chains and hybrid systems based on them and other promising energy technologies on an industrial scale.*

**Key words:** *energy, hydrogen, renewable energy sources, combined cycle gas technologies*

**For citation:** Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonov AG. Global energy association: new opportunities of hydrogen technologies. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(2):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-13.

### **Введение**

В настоящее время центральным вопросом международной энергетической повестки стало влияние на климат парникового эффекта. Парижским соглашением от 2015 года приняты общемировые цели по обеспечению нулевых выбросов парниковых газов к 2050-60 годам. При этом, влияние энергетической отрасли на климатические процессы является определяющим [1]. Более того, проблемы климатических и, в целом, экологических последствий энергетических преобразований становятся ограничивающими факторами устойчивого развития мировой экономики [2]. Решение этой проблемы возможно путем трансформации энергетической отрасли с повышением степени ее глобализации и переходом на новые технологии.

### **Материалы и методы**

Проводится анализ актуальных литературных данных по вопросу резкого ускорения в условиях ограничений из-за пандемии повестки «зеленого» водорода в энергетике. Изучаются по данным открытой печати и обсуждений конкурентные преимущества и экономические риски России с учетом зависимости страны от углеводородных ресурсов.

### **Основные результаты и обсуждение**

Расширение системообразующих транснациональных электроэнергетических связей является уже фактически устоявшейся системной задачей и устойчиво происходит со второй половины прошлого века. В дополнение к традиционным подходам современные технологии позволяют совершить качественный скачок развития путем использования водорода непосредственно для трансформации электроэнергетического кластера по двум направлениям.

Во-первых, водород является удобным для длительного хранения больших объемов электрической энергии. Технологии по производству водорода, например, прямым электролизом из воды, в результате парового метанового или автотермического риформинга, хранения и сжигания в газовых турбинах или топливных элементах, достаточно отработаны и активно развиваются [3]. Более того, нефтегазохимические производства производят водород в качестве отработанного технологического газа, возможного к непосредственному коммерческому использованию или после соответствующей очистки. На установках возобновляемой энергетики с неравномерной, спорадической производительностью, таких как ветряные и солнечные электростанции, можно организовать производство водорода для его накопления и длительного хранения как носителя энергии. В последующем он используется как топливо для газовых турбин при возникновении соответствующего спроса на электрическую энергию.

Вторым потенциальным применением водорода является его использование в качестве носителя энергии для транспортирования на большие расстояния. В течение прошлого века с развитием электротехники и ее интеграцией в хозяйственную деятельность человека стали возникать локальные электроэнергетические системы (ЭЭС) для снабжения электрической энергией как промышленных, так и бытовых потребителей. Стала очевидной одна из основных проблем электроэнергетической отрасли, а именно невозможность накопления в значимых объемах электрической энергии при равномерном режиме ее производства и сложности при передаче ее на дальние расстояния. При этом график потребления электроэнергии обладает высокой неравномерностью. Попытка выравнивания режимов производства и потребления, а также другие известные системные эффекты привели к объединению локальных систем в региональные, национальные, межгосударственные и даже межконтинентальные энергетические пулы [4].

В конце 20-го века возникает концепция Глобального Энергетического Объединения (далее ГЭО, англ. *GEI*). В 1986 году в Сан-Диего, США, для исследования задач по его созданию создается Институт Глобальной Энергетической Сети (*GENI*). В 1996 году в Токио учрежден Азиатско-Тихоокеанский Энергетический Исследовательский Центр (*APERC*), в задачи которого включено исследование потенциала и проблем создания межгосударственных энергетических объединений в регионе АТЭС [5].

С 2010-х годов с развитием технологий электропередачи на ультра высоких напряжениях больших объемов электроэнергии на дальние расстояния с минимумом потерь возникает новый импульс развития идеи ГЭО. Создана Организация по развитию и сотрудничеству в области глобального объединения энергосистем (*GEIDCO*) в Пекине, Китай, которая является международной организацией заинтересованных фирм, ассоциаций, учреждений и частных лиц, занимающихся продвижением устойчивого развития энергетики во всем мире. Цель *GEIDCO* заключается в содействии созданию системы ГЭО для удовлетворения глобального спроса на зеленую, экологически чистую электроэнергию в целях реализации инициативы ООН «Устойчивая энергетика для всех» и инициатив по изменению климата, а также для обеспечения устойчивого развития человечества. Концепция ГЭО, разработанная этой организацией представлена на рисунке 1.

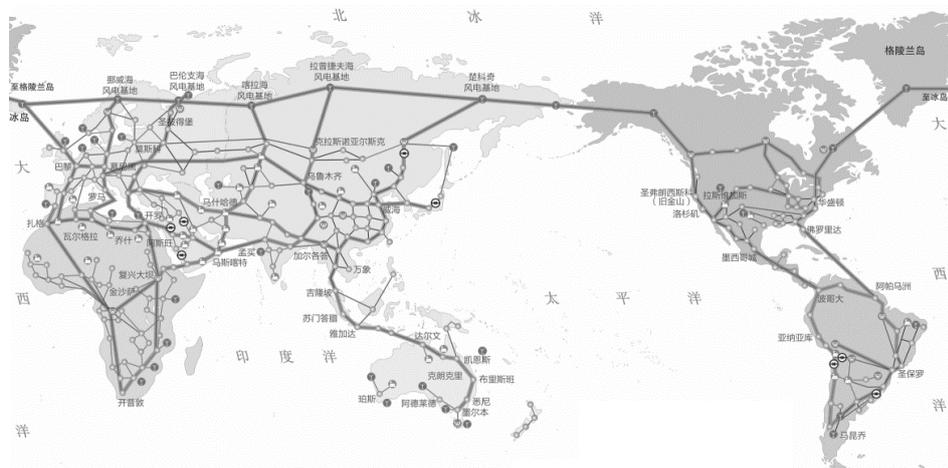


Рис.1. Концепция Глобального Энергетического Объединения (ГЭО) от организации *GEIDCO*, Китай  
Fig.1. Global Energy Interconnection (GEO) Concept from *GEICO*, China

В концепции передачи энергии на дальние расстояния существуют технические ограничения при объединении локальных энергосистем на параллельную работу с использованием линий электропередач переменного тока. Эти ограничения связаны с возникновением низкочастотных, слабо демпфированных колебаний, а также с высокой вероятностью крупных системных аварий в таких протяженных энергообъединениях и рядом других факторов. Проблемы изучаются, вырабатываются меры по их недопущению, например, одним из перспективных направлений является изучений свойств высокотемпературной сверхпроводимости. Однако существуют экономические пределы целесообразности обмена электроэнергией на сверхдальние расстояния, что с учетом фактической дифференциации стран по уровню экономического развития является одним из значимых сдерживающих факторов глобализации мировой энергетики.

Развитие энергетических систем при этом не останавливается, продолжается развитие систем электропередачи регионального и национального уровней на фоне развития национальных экономик, роста электропотребления и объемов генерирующих мощностей.

Электроэнергетика сейчас играет важнейшую инфраструктурную роль и эта роль будет усиливаться в будущем. Происходит расширение энергообъединений и межсистемных обменов, что увеличивает возможности по обеспечению надежности электроснабжения потребителей. Указанный фактор стимулирует создание межнациональных и межконтинентальных электроэнергетических объединений и безальтернативность формирования ГЭО для целей устойчивого развития. Данные задачи коррелируют с целями и задачами Парижского соглашения по климату.

Концепция ГЭО в том числе основывается на замене традиционных видов топлива на экологически чистые ресурсы и повышении доли электроэнергии в структуре конечного

энергопотребления. Наибольшую значимость в подобной системе начинают играть возобновляемые источники энергии: солнечные и ветровые электростанции, малая гидроэнергетика и другие энергоисточники на возобновляемых ресурсах. Обсуждается концепция участия атомной энергетики, например, закрытого цикла с реакторами на быстрых нейтронах. Рассматриваются и другие перспективные технологии, не достигшие пока стадии коммерциализации.

Учитывая ожидания по росту доли возобновляемых энергетических ресурсов до 80% к 2050 году, а также появление интеллектуальных систем управления большой производительности, имеются предпосылки к началу реализации концепции ГЭО в формате моделирования и прототипирования.

На первой стадии до 2030 года планируется согласованное развитие национальных и межгосударственных систем, а также развитие возобновляемых источников энергии промышленного уровня.

Развитие концепции второй стадии (2030-2040 гг.) строится на возникновении крупных кластеров в Арктике и экваториальных районах, как регионов концентрации возобновляемых энергоресурсов, а также формирование и упрочнение континентальных межгосударственных энергосистем.

На третьей стадии (2040-2050 гг.) планируется завершение формирования ГЭО путем запуска межконтинентальных обменов ресурсами и совершенствования систем технологического и коммерческого управления, оптимизации сопутствующих затрат и повышения надежности энергоснабжения потребителей.

В ГЭО будут использованы экологически чистые технологии для производства и передачи электроэнергии на ультравысоких напряжениях. Для передачи больших объемов электроэнергии на дальние расстояния предлагается развитие электрической сети путем строительства линий ультравысоких напряжений постоянного и переменного тока. Китай сейчас имеет 6 успешно работающих передающих линий постоянного тока 800 кВ. Первая в мире ЛЭП 1000 кВ переменного тока введена в Китае еще в 2009 году. Бразилия и Индия вводят ЛЭП постоянного тока этого класса напряжения. Изучается и тестируется оборудование на 1100 кВ постоянного тока для передачи электроэнергии на расстояния порядка 3000 км при пропускной способности до 12 ГВт.

Но помимо традиционного, экстенсивного подхода к развитию и укрупнению энергосистем через количественное улучшение технических характеристик энергооборудования и линий электропередач, наблюдается тенденция к децентрализации энергосистемы на фоне ее укрупнения. Применение данного подхода исключает целый ряд проблем укрупнения, например необходимость мощных систем транзита и резервирования энергетических потоков и, в то же время, повышает ее устойчивость за счет повышения количества малых активных элементов системы: распределенных источников энергии всех видов с разной степенью маневренности и эффективности, формирования структуры приближенных потребителей с развитыми интегрированными системами управления спросом, что позволяет обеспечить прямую передачу энергии без избыточной ее трансформации по уровням напряжения. Такая система требует особых подходов к регулированию и управлению, что становится осуществимым по мере повышения быстродействия управляющих вычислительных систем и дата-центров, мощности которых также рассредоточены в пределах децентрализованной распределенной энергосистемы.

Развитие технологий хранения электроэнергии, особенно интенсивное в последние годы, чрезвычайно важно для крупномасштабного использования возобновляемых энергоресурсов, а также надежного и экономически эффективного функционирования ЭЭС. Накопители электроэнергии имеют ключевую перспективу в будущем ГЭО.

Обоснованность создания распределенных сетей строится на синергетическом эффекте интеграции в единую сеть разнородных (гибридных) энергетических систем. В развитых странах реализовано большое количество пилотных проектов по созданию автономных гибридных энергосистем (ветер – солнце – водород) для жизнеобеспечения изолированных сообществ (островных или удаленных поселений).

Одним из первых проектов подобного типа стала запущенная в 2004 году ветро-водородная энергосистема острова Утсира (*Utsira*), находящегося в 20 км от западного побережья Норвегии. Первоначально на острове Утсира использовался дизель-генератор, но он был полностью замещен гибридной ветро-водородной генерацией. Автономный энергетический комплекс острова Утсира включает в себя ветровую электростанцию (600 кВт), водородный двигатель (55 кВт), щелочной электролизер (10  $\text{нм}^3/\text{ч}$ , 48 кВт), топливные элементы (10 кВт), водородный компрессор (5,5 кВт), хранилище газообразного водорода (2400  $\text{нм}^3$  при 200 бар).

Данный демонстрационный проект был реализован консорциумом норвежской энергетической компании *Statoil ASA* и *Environ*, владеющим технологиями электролиза водорода и строительства ветро- и электростанций соответственно. В создание и управление гибридной энергосистемой были активно вовлечены местные власти, члены местного сообщества и представители местного бизнеса. Энергосистема обеспечивает энергоснабжение 10 домохозяйств, причем она может функционировать до 18 месяцев в автономном режиме [6].

Другим примером применения водородной энергетики по созданию структурного элемента сложной распределенной энергосистемы на изолированных территориях является проект *PURE*, реализованный на небольшом острове Унтс (*Unst*) в северной Шотландии [7]. В ее состав входят две ветряные турбины (6 кВт), электролизер (3,55 нм<sup>3</sup>/ч) и хранилище газообразного водорода (90 нм<sup>3</sup> при 30 бар), водородный автомобиль с топливным элементом (5 кВт). Проект реализован компанией *Unst Partnership Ltd* при поддержке Агентства по развитию сообщества Унтс [8]. Опыт внедрения подобных систем подробно изложен в иностранной печати [9].

Актуальна тема использования водорода не только в качестве нового формата систем локального накопления энергии, но и промежуточного носителя энергии для транспорта на большие расстояния [10].

Водород по сравнению с традиционной схемой передачи электрической энергии по линиям электропередач имеет ряд принципиальных преимуществ:

- имеется возможность транспорта водорода по существующим трубопроводным газотранспортным системам, а также водным транспортом в сжиженном состоянии. При этом возможность использования водорода для топливных элементов малых и средних энергетических систем, например, транспорта, судоходства, любых промышленных систем, существенно расширяет сферу применения электроэнергии;

- применение водорода у потребителей является наиболее экологически чистой технологией энергообеспечения;

- появляется возможность генерации электрической энергии на удаленных площадках, обеспеченных экологичными и доступными видами энергетических ресурсов, например, в Арктике. Первично будут использоваться возобновляемые ресурсы (солнечные, ветровые, малой гидроэнергетики и другие), но и применение традиционных видов углеродного топлива является обоснованным. Требуется оптимизация всей глобальной структуры генерирующих мощностей по критерию наименьшего воздействия на окружающую среду: следом за ВИЭ идут высокоэффективные парогазовые технологии (ПГУ) большой единичной мощности на природном газе с КПД более 60%. Рассматриваться должны также проекты по использовании электростанций, привязанных к открытым месторождениям каменного и бурого угля прямой добычи. То есть те, где низкая стоимость добычи компенсирует внедрение мероприятий по полному улавливанию загрязняющих веществ от сгорания органического топлива, включая улавливание парниковых газов.

Производство водорода растет примерно на 3,5 % ежегодно при объеме потребления более 100 млн тонн [11] (рис.2).

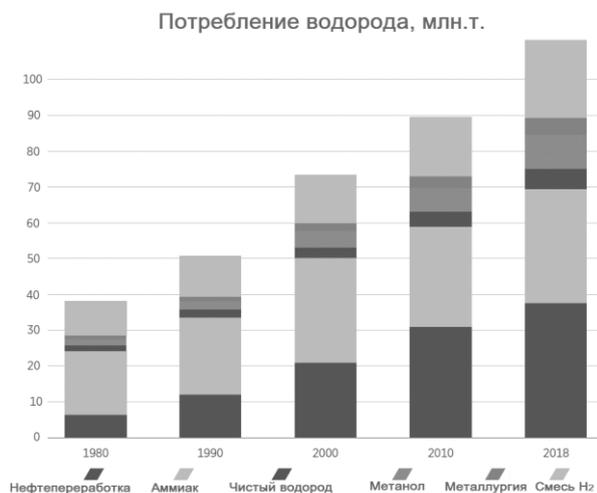


Рис.2. Потребление водорода в мире с 1980 года  
Fig.2. Global hydrogen consumption since 1980

Лидерами по уровню научных исследований в области использования водородных технологий являются США, Япония, Евросоюз, Южная Корея и Китай. Евросоюз и Япония уделяют особое внимание вопросам улучшения экологии при переходе на водород, США работают по повышению собственной энергетической безопасности, а Китай стремится стать лидером мирового технологического прогресса.

По прогнозам аналитиков, к 2050 году водородные технологии будут удовлетворять около четверти всех топливных потребностей Евросоюза: они обеспечат энергию, достаточную для заправки 42 миллионов автомобилей, более полутора миллионов грузовиков и четверти миллиона автобусов.

В процессе организации водородной цепочки имеется ряд технологических трудностей, успешно решаемых за счет научно-технического прогресса и глобализации транснациональных производственных связей [12].

Созданы газовые турбины, полностью работающие на водороде. Они очень маневренны и эффективны в составе распределенной сети в сочетании с возобновляемыми источниками энергии и технологией «умной сети» *SmartGrid*. Одна из главных проблем, стоявших перед газовыми турбинами, сжигающими водород вместо отработанной технологии сжигания природного газа, состоит в высокой скорости водородного пламени [13]. Это делает его более компактным и приближенным к кончику горелки, что приводит к перегреву кончика. Более того, за счет больших скоростей горения пламя может проскакивать в обратном направлении, разрушая горелку (рис.3).

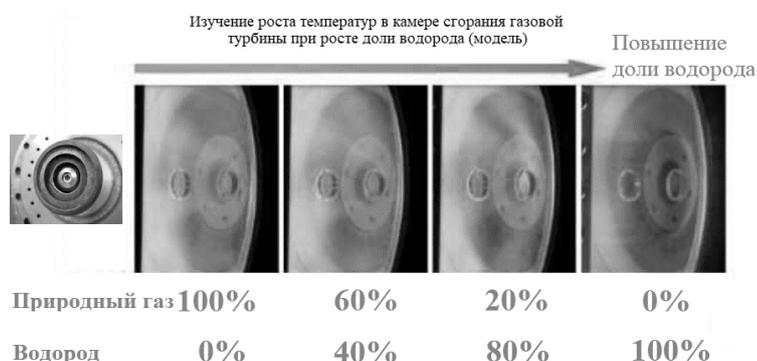


Рис.3. Модель горения смеси метан-водород в камере сгорания газовой турбины после клапана впрыска

*Fig.3. Gorenje model of methane-hydrogen mixture combustion in the combustion chamber of a gas turbine after the injection valve*

Устранение данных проблем удалось достичь путем совершенствования конструкции горелок и регулировки впрыска топлива [14]. Этому содействовало появление аддитивной технологии производства горелок с использованием 3D-печати, что позволило оптимизировать систему охлаждения горелок и снизить уровень тепловых нагрузок на материал горелки (рис.4).



Рис.4. Модифицированные горелки для сжигания водорода на газовых турбинах SGT-600 компании Siemens

*Fig.4. Modified hydrogen burners for gas turbines SGT-600 from Siemens*

Уже работающие газовые турбины на природном газе также могут быть модернизированы для сжигания водорода. При 30% доле водорода необходимые изменения в турбине незначительны и касаются вспомогательных систем. При использовании до 60% водорода требуется перепроектирование систем пожаробезопасности, а также вентиляции корпуса, замена горелок, газовых клапанов и трубопроводов. Требуют корректировки алгоритмы запуска и управления с настройкой выбросов.

Современные газовые турбины выбрасывают порядка 500 г CO<sub>2</sub>/кВт·ч в простом цикле и 250 CO<sub>2</sub>/кВт·ч в комбинированном. Использование водорода в сочетании с природным газом снижает эти показатели до 250 CO<sub>2</sub>/кВт·ч, т.е. в 2 раза. Японская компания *Kawasaki Heavy Industries* совместно с группой японских и австралийских компаний при государственной поддержке реализует пилотный проект, построенный на транснациональной технологической водородной цепочке энергетического трансфера без выбросов парниковых газов (рис.5).



Рис.5. Пилотная водородная энергетическая цепочка японско-австралийского проекта  
 Fig.5. Pilot hydrogen energy chain of the Japanese-Australian project

Цепочка предполагает производство электроэнергии на угольной электростанции, расположенной непосредственно на лигнитном бассейне Латроб-Валли в Австралии. Пласт лигнита залегают на глубину до 250 метров, а его запасы соответствуют 240 годам общего потребления электроэнергии в Японии. Добыча производится открытым способом, себестоимость ее очень невысока. Здесь же расположен завод по производству водорода, как из производимой электроэнергии угольной электростанции путем электролиза воды, так и непосредственно из лигнита, для чего проводятся соответствующие научные исследования и разработки. Для утилизации выбросов загрязняющих веществ при сжигании твердого топлива используются системы улавливания и очистки. Далее водород поставляется на базу сжижения, расположенную в прибрежной зоне штата Виктория, Австралия, в г. Хейстингс, и в сжиженном состоянии поступает на специальный причал для погрузки на танкер в сжиженном состоянии. Строительство объекта завершено в ноябре 2020 года, сейчас идут эксплуатационные испытания. Для транспорта сжиженного водорода в Японию построен специальный танкер «*Suiso Frontier*» с емкостью по сжиженному водороду 1250 м<sup>3</sup> (рис.6). Дальность плавания танкера 20000 км при рейсовой скорости 24 км/ч. В октябре 2020 года был проведен пробный морской рейс, далее планируется испытание систем грузовых резервуаров и технологий грузообработки.

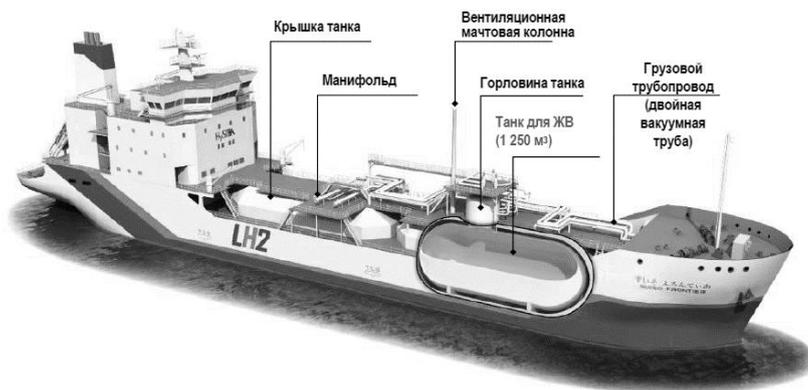


Рис.6. Танкер для перевозки жидкого водорода «Suiso Frontier»  
 Fig.6. Suiso Frontier liquid hydrogen tanker»

В прибрежном городе Кобэ, Порт-Айленд, Япония, расположена промежуточная база жидкого водорода с резервуаром на 2500 м<sup>3</sup> сжиженного водорода в виде шара с двойной вакуумной оболочкой (рис.7).



Рис.7. База приема и хранения жидкого водорода в г. Кобе, Япония

Fig.7. Liquid hydrogen reception and storage facility in Kobe, Japan

Там же расположена построенная в 2015-2018 гг опытная энергетическая когенерационная установка с водородной газовой турбиной мощностью 1 МВт, работающая при комбинированном сжигании водорода и природного газа. С 2019 года ведутся разработки по увеличению производительности всей водородной цепочки с выходом в 2025 году на первые коммерческие контракты и началом полноценной коммерциализации с 2030 года [15].

Другим примером пилотного проекта водородной трансформации выступает проект компании *Braskem*, крупнейшей нефтехимической компании в Латинской Америке, которая модернизирует когенерационную электростанцию на своем объекте в Сан-Паулу, Бразилия. Совместно с компанией *Siemens* создается энергокомплекс, обеспечивающий паровой и электрической энергией установку крекинга по производству этилена и сырья для химической и пластмассовой промышленности. В состав комплекса входит газовая турбина *Siemens SGT-600* мощностью 24 МВт, работающая на технологическом газе с долей водорода до 60%. Снижение выбросов CO<sub>2</sub> относительно традиционной энергетической схемы составит 6,3%. Ввод проекта в эксплуатацию запланирован на 2021 год [16].

Собственные разработки по созданию первой в России газотурбинной установки на метано-водородном топливе ведет компания АО «Силовые машины». Испытания опытного образца такой турбины типа ГТЭ-65В планируется завершить до конца 2024 года.

В России внедрение водородных технологий находится на начальной стадии. Конкуренция с традиционным рынком углеводородов вызывает опасения по созданию угрозы безопасности национальной экономики. Однако развитие водородной энергетики в России в условиях глубоко интегрированных транснациональных рынков, является обязательным условием устойчивого технологического развития страны и условием стимулирования иностранных инвестиций [17]. Правительство России определяет развитие водородной энергетики как одно из приоритетных направлений развития отечественной экономики.

Структура единой энергетической системы России, прошедшая с 2010 года масштабную модернизацию на основе самых современных мировых парогазовых технологий, имеет значительный избыток достаточно эффективных генерирующих мощностей, себестоимость производства электроэнергии на которых является одной из самых низких в мире. Возможность их использования для водородного трансфера энергии в сочетании с наличием обширной трубопроводной газораспределительной сети, наличием портов для погрузки на морские суда и транспорта на дальние расстояния создает уникальные конкурентные преимущества России в мировой гонке энергетических технологий.

#### Заключение

Формирование региональных и межгосударственных электроэнергетических объединений и создание на их основе Глобального Энергетического Объединения остается долгосрочной тенденцией развития энергетической мировой инфраструктуры вследствие возможности реализации известных системных эффектов и повышения инфраструктурной роли электроэнергетики. Причем наиболее активный интерес, подкрепленный ресурсными возможностями, наблюдается в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Эта тенденция в полной

мере соответствует задачам Парижского соглашения по снижению вредных выбросов от объектов энергетики путем замещения традиционных видов топлива на ВИЭ. Интеграция ВИЭ в единую глобальную энергетическую систему и ее развитие вызывает ряд технических трудностей и не всегда экономически обосновано. Применение по ряду направлений развития глобальных энергосистем новых водородных технологий накопления и трансфера энергии является приоритетным направлением научно-технического прогресса в мире и России.

### Литература

1. Schneider S.H. Abrupt non-linear climate change irreversibility by policy. OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers. Paris. 2003. URL: <https://www.oecd.org/env/cc/2482280.pdf>
2. Соловьев Д.А. Направления развития водородных энергетических технологий // Энергетическая политика. 2020. №3 (145). С.64-71.
3. Нефедова Д.В., Соловьев А.А. Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в Арктическом регионе России // Энергетическая политика. 2018. №4. С. 99-108.
4. Тягунов М.Г. Как должна быть построена энергетическая система с установками на основе ВИЭ // Технический оппонент. 2019. №2(3). С.22-29.
5. Воропай Н.И., Подковальников С.В. От локальных электроэнергетических систем к глобальному энергетическому объединению: концепция, технологии, проблемы // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD-2019. Материалы двенадцатой международной конференции Научное электронное издание. Под общей ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2019. С. 46-52.
6. Nakken T., Strand L. R., Frantzen E., et al. The Utsira wind-hydrogen system—operational experience. 2006. Доступно по URL: [http://www.globalislands.net/greenislands/docs/norway\\_135\\_Ewec2006fullpaper.pdf](http://www.globalislands.net/greenislands/docs/norway_135_Ewec2006fullpaper.pdf)
7. Barbara Widera. Renewable hydrogen as an energy storage solution // E3S Web of Conferences 116.00097(2019).URL:[https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/42/e3sconf\\_asee18\\_00097/e3sconf\\_asee18\\_00097.html](https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/42/e3sconf_asee18_00097/e3sconf_asee18_00097.html).
8. Benjamin K. Sovacool. Island wind-hydrogen energy: A significant potential US resource// Renewable Energy. 2008. V. 33. № 8. pp.1928-1935.
9. Schoenung S., Gillie M., Argumosa M. del Pilar, Halliday S. Miles. Trends in Evaluation of Integrated Hydrogen Systems: IEA Hydrogen Task 18 // 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010.
10. Тимофеев Д.И. Водородный переход в локальной энергетике: зарубежный опыт и российские перспективы // Энергетическая политика. 2019. № 4 (142). С. 86-95.
11. Hydrogen: A renewable energy perspective // Доступно по URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>. 2019. 52 с.
12. Кулагин В.А., Грушевенко Д.А. Сможет ли водород стать топливом будущего? // Теплоэнергетика. 2020. №4. С.3-17.
13. Паскуариелло Рори. Инновации в газовой турбине, с водородом или без него // Газотурбинные технологии. 2020. №8. С.12-15.
14. Working toward 100% hydrogen // Gas Turbine World. 03. 2020. <https://gasturbine.com/Working-Toward-100-percent-hydrogen/>.
15. Мероприятия по созданию глобальной цепочки поставки водорода Kawasaki Heavy Industries, Ltd // Организация глобальных цепочек поставок водорода и водородные технологии в Японии. Конференция-вебинар 11 марта 2021 года Японской ассоциации по торговле с Россией и новыми независимыми государствами (РОТОБО). 2021.
16. Ларфельдт Дж. Газотурбинные установки на водороде // Газотурбинные технологии. 2020. №8. С.16-19.
17. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №6. С.79-91.

### Авторы публикации

**Филимонов Артем Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета.

**Филимонова Антонина Андреевна** – канд. мед. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета.

**Чичиров Андрей Александрович** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета.

**Чичирова Наталия Дмитриевна** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета.

#### References

1. Schneider SH. *Abrupt non-linear climate change irreversibility by policy. OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers.* Paris. 2003. URL: <https://www.oecd.org/env/cc/2482280.pdf>.
2. Solov'ev DA. Directions of development of hydrogen energy technologies. *Energy policy.* 2020;3 (145):64-71.
3. Nefedova DV, Solovyov AA. New challenges and risks in the development of distributed power generation in the Arctic region of Russia. *Energy Policy.* 2018;4:99-108.
4. Tyagunov MG. How an energy system with installations based on RES should be built. *Technical opponent.* 2019;2(3):22-29.
5. Voropai NI, Podkovalnikov SV. From local electric power systems to global energy unification: concept, technologies, problems. Managing the development of large-scale systems MLSD-2019. Proceedings of the twelfth International Conference Scientific Electronic Edition. Under the general editorship of Vasilyev SN., Tsvirkun AD. 2019. pp. 46-52.
6. Nakken T, Strand LR, Frantzen E, et al. *The Utsira wind-hydrogen system– operational experience.* 2006. URL: [http://www.globalislands.net/greenislands/docs/norway\\_135\\_Ewec2006fullpaper.pdf](http://www.globalislands.net/greenislands/docs/norway_135_Ewec2006fullpaper.pdf)
7. Barbara Widera. Renewable hydrogen as an energy storage solution // E3S Web of Conferences 116.00097(2019). Available at: URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/42/e3sconf\\_asee18\\_00097/e3sconf\\_asee18\\_00097.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/42/e3sconf_asee18_00097/e3sconf_asee18_00097.html).
8. Sovacool BK. Island wind-hydrogen energy: A significant potential US resource. *Renewable Energy.* 2008;33(8):1928-1935. Available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.006>
9. Schoenung S, Gillie M, Argumosa M. del Pilar, et al. *Trends in Evaluation of Integrated Hydrogen Systems: IEA Hydrogen Task 18.* 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/34994591.pdf>
10. Timofeev DI. Hydrogen transition in local power engineering: foreign experience and Russian perspectives. *Energy policy.* 2019;4(142):86-95.
11. Hydrogen: *A renewable energy perspective.* Available at: URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>. 2019. 52 с.
12. Kulagin VA, Grushevenko DA. Can hydrogen become the fuel of the future? *Teploenergetika.* 2020;4:3-17.5.
13. Pasquariello Rory. Innovations in a gas turbine, with or without hydrogen. *Gas Turbine technologies.* 2020;8:12-15.
14. Working toward 100% hydrogen. *Gas Turbine World.* 03.2020.
15. *Events to create a global supply chain of hydrogen Kawasaki Heavy Industries.* Ltd. Organization of global supply chains of hydrogen and hydrogen technologies in Japan. Conference-webinar on March 11, 2021 of the Japan Association for Trade with Russia and the Newly Independent States (ROTOBO). 2021.
16. Larfeldt J. Gas turbine installations on hydrogen. *Gas Turbine technologies.* 2020;8:16-19.
17. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al. Prospects for the development of hydrogen energy in Tatarstan. *Energy problems.* 2020;6:79-91.

#### Authors of the publication

**Artem G. Filimonov** – Kazan State Power Engineering University. Email: [agfilimonov@mail.ru](mailto:agfilimonov@mail.ru).

© А.Г. Филимонов, А.А. Филимонова, Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров

*Antonina A. Filimonova* – Kazan State Power Engineering University.

*Andrey A. Chichirov* – Kazan State Power Engineering University.

*Natalya D. Chichirova* – Kazan State Power Engineering University.

*Получено*

*26 марта 2021г.*

*Отредактировано*

*31 марта 2021г.*

*Принято*

*31 марта 2021 г.*