

**Резюме проекта НИР, выполненного  
в рамках ФЦП  
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития  
научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»  
по этапу № 4**

Номер контракта: 16.516.11.6032

Тема: Разработка научно-технологических решений для создания водородных систем аккумулирования электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики

Приоритетное направление: Энергоэффективность и энергосбережение

Критическая технология: Технологии водородной энергетики

Период выполнения: С «19» апреля 2011 г. по «5» ноября 2012 г.

Плановое финансирование проекта: 11.3 млн. руб

Бюджетные средства - 9.6 млн. руб.,

Внебюджетные средства - 1.7 млн. руб.

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13 строение 2.

Ключевые слова: Водородная система аккумулирования энергии, водородосжигающие установки, термодинамические исследования, схемный анализ.

## **1. Цель исследования, разработки**

Разработка научно-технологических решений для создания современных накопителей электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики, предназначенных для покрытия неравномерности нагрузки в энергетических сетях, создания систем аварийного, резервного и бесперебойного питания потребителей.

Разработка и создание научно-технологических решений для водородных систем аккумулирования электрической энергии киловаттного и мегаваттного классов мощности для нужд централизованной и автономной энергетики на основе водородосжигающих технологий. Создание экспериментального образца водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт с модернизированной камерой сгорания, обеспечивающего выход на номинальный режим не более чем за 10 секунд.

## **2. Основные результаты проекта**

На первом этапе проведены подготовительные работы для обеспечения дальнейшего успешного выполнения государственного контракта. Проведенный анализ литературы и патентные исследования показали, что на следующих этапах возможно получение исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности.

В результате проведения сравнительной оценки эффективности возможных направлений исследований показано, что наиболее эффективным способом аккумулирования электроэнергии для централизованной энергетики являются ГА-

ЭС и воздухоаккумулирующие станции, которые отличаются высоким коэффициентом рекуперации и низкой стоимостью выдаваемой электроэнергии. Вместе с тем, для их строительства требуется наличие специфического рельефа местности, что ограничивает их использование, в особенности на равнинных территориях для ГАЭС. Для автономной энергетики чаще всего используют электрохимические аккумуляторы, что связано с возможностью их размещения практически в любом месте. Суперконденсаторы, с учетом их высокой удельной стоимостью находят применение в основном в узкоспециализированных и военных областях. Для создания эффективных маховичных аккумуляторов требуется разработка новых высокопрочных материалов.

Водородные аккумулирующие системы могут быть использованы как для автономной, так и для централизованной энергетики, при этом проведенные сравнительные расчеты показывают, что срок их окупаемости может быть примерно в 2 раза ниже, чем у ГАЭС. Для автономной энергетики основными преимуществами водородных систем являются более высокий ресурс и отсутствие потерь при длительном хранении.

Таким образом, в настоящее время водородные системы аккумулирования являются конкурентоспособными с традиционными аккумуляторами как в области автономной так и централизованной энергетики.

На основе разработанной конструкторской документации водородо-кислородного парогенератора и модернизированной камеры сгорания в дальнейшем планируется их изготовление и проведение экспериментальных исследований.

В результате подготовки экспериментального стенда к проведению испытаний на нем проведены необходимые регламентные работы, установлены регуляторы расхода водорода и кислорода, проведена настройка системы управления, осуществлена промывка баков с охлаждающей водой.

На втором этапе настоящего государственного контракта выполнен сравнительный термодинамический и технико-экономический анализ перспективных технологий аккумулирования электроэнергии в зависимости от уровня мощности и графиков производства и потребления энергии, проведено математическое моделирование тепловых напряжений в камере сгорания водородосжигающей установки, возникающие при ее кратковременном выходе на максимальную тепловую мощность и резком изменении тепловой мощности и определены допустимые режимы работы камеры сгорания, создана модернизированная камера сгорания для экспериментального образца водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт, обеспечивающая выход на номинальный режим за 10 секунд, не более и проведены ее пуско-наладочные испытания на экспериментальном стенде.

В результате выполнения сравнительного термодинамического и технико-экономического анализа перспективных технологий аккумулирования электроэнергии выяснено, что системы водородного аккумулирования электроэнергии могут быть конкурентоспособными по сравнению с другими технологиями аккумулирования в широком диапазоне мощностей. Показано, что при уровне мощностей более 100 МВт водородные системы аккумулирования с водородосжигающими установками на равнинных территориях могут иметь меньший срок окупаемости, по сравнению с гидроаккумулирующими электростанциями, а при

уровне мощностей до 10 МВт обладают более низкой удельной стоимостью и более высоким ресурсом, по сравнению с электрохимическими и маховичными аккумуляторами, а также суперконденсаторами.

В результате проведения математического моделирования тепловых напряжений посчитаны термические напряжения в модернизированной камере сгорания водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт. Показано, что при заданной тепловой нагрузке и в бронзе и в стали напряжения ниже предельных ( $[\sigma_{\text{бронза}}] = 4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$  и  $[\sigma_{\text{сталь}}] = 6 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ). Рассмотрены варианты с использованием различного количества ребер, на поверхности охлаждаемой стенки камеры сгорания, показано, что с ростом числа ребер напряжения на внутренней поверхности камеры сгорания уменьшаются. Также рассмотрены варианты различных режимов работы модернизированной камеры сгорания и определено, что при расчетной номинальной мощности, максимальные тепловые напряжения составляют 80 % от допустимых, таким образом, допустимыми режимами работы модернизированной камеры сгорания являются режимы от 30 до 110 % от ее номинальной мощности.

В результате создания модернизированной камеры сгорания для экспериментального образца водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт были повышены ее динамические характеристики по сравнению с предыдущим образцом, в результате чего ее время выхода на номинальный режим составляет менее 10 сек. Это стало возможным благодаря введению двухконтурного охлаждения, при этом в первом контуре (цилиндрическая часть) для охлаждения может использоваться как вода, так и водород, а во второй контур (сопловая коническая часть) подается вода, необходимая для надежного охлаждения сопловой части.

В результате проведенных пуско-наладочных испытаний подтверждена правильность выбора конструктивной схемы модернизированной камеры сгорания водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт и ее работоспособность при пусковом и основном режимах. Проведена оценка устойчивости рабочих процессов в модернизированной камере сгорания и эффективности охлаждения модернизированной камеры сгорания и блока подачи балластировочной воды, которые оказались удовлетворительными.

На третьем этапе настоящего государственного контракта создан экспериментальный образец водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт и проведена его подготовка к проведению испытаний и экспериментальных исследований тепловых процессов.

Проведенные 2 испытания экспериментального образца водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт с модернизированной камерой сгорания в целом показали его работоспособность, при этом в результате проведенных испытаний выявлено, что размер проходного сечения на выходе из камеры сгорания должен быть увеличен, для исключения закипания охлаждающей воды. Принятые изменения учтены при разработке откорректированной конструкторской документации.

В результате проведения экспериментальных исследований выполнена проверка соответствия объекта экспериментальных исследований требованиям пункта № 6.1.1. технического задания, в т.ч. номинальная тепловая мощность ЭБПГ составляет 200 кВт, время запуска и выхода на номинальный режим рабо-

ты составляет 8-10 секунд, температура производимого пара составила от 570 до 1200 К. Проведена работа ЭБПГ на переменных режимах в диапазонах мощностей от 65 до 227 кВт (32,5 до 113,5 % от номинальной). Изучена неравномерность поля температур на выходе из ЭБПГ и проведена доработка конструкции КС для ее снижения. Изучен состав генерируемого пара на выхлопе из ЭБПГ при различных режимах работы.

В результате реализации мероприятий по достижению технико-экономических показателей показано, что параметры водородных аккумулирующих систем позволяют аккумулировать 4-5 % электроэнергии, производимой объектом централизованного энергоснабжения и до 35 % для объекта автономного энергоснабжения, повышают маневренность объекта централизованного и автономного энергоснабжения на 10 %, обеспечивают возможность кратковременного увеличения выдаваемой потребителю электрической мощности не менее чем на 10 % от номинальной мощности для объекта централизованного энергоснабжения и на 50 % для объекта автономного энергоснабжения, а также снижают характерное время выхода на режим максимальной мощности до 10 секунд.

Основным узлом, требующим применения импортного оборудования является электролизер. В России существуют возможности по импортозамещению электролизеров, однако существующие электролизеры требуют снижения энергопотребления при электролизе и подготовке к промышленному производству существующих экспериментальных образцов.

При сравнении с ГАЭС оценочная площадь водородной аккумулирующей системы аналогичной мощности составляет 1,5-2 гектара или 56-42 кВт/м<sup>2</sup>, т.е. ее удельная мощность в 350-370 раз больше чем у ГАЭС.

Стоимостные оценки сравнения ГАЭС и водородной системы аккумулирования показывают, что снижение затрат на строительство новых аккумуляторных мощностей на основе ВАЭС по сравнению с существующими гидроаккумулирующими электростанциями на равнинных территориях РФ составляет более 300 долл. США/кВт.

Расчетная удельная мощность водородной системы аккумулирования составляет 800-1100 Вт/кг, что 2-5 раз больше чем у лучших электрохимических аккумуляторов, при этом расчетный ресурс в 2-3 раза больше, чем у электрохимических аккумуляторов.

Проведена корректировка эскизной конструкторской документации по результатам экспериментальных исследований и математического моделирования.

На 4 этапе представлены результаты обобщения теоретических и экспериментальных исследований и сопоставление их с результатами анализа научно-информационных источников. Обобщение полученных в ходе выполнения государственного контракта теоретических и экспериментальных данных позволило оценить полноту поставленных задач и сравнить их с результатами анализа информационных источников. В целом, полученные данные соответствуют современному мировому уровню, а экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний водородо-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт, получены впервые в мире.

Выполненная оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем показала, что разработанные схем-

ные решения водородных систем аккумулирования энергии позволяют обеспечить строительство более дешевых и экологически чистых аккумуляторов для энергетики. Разработанная конструкция водородо-кислородного парогенератора позволяет обеспечить импортозамещение зарубежных электролизеров, что позволит сэкономить в ближайшие 10 лет до 12-15 млрд. долл., при успешной реализации энергетической стратегии России до 2025 г. При этом, полученные в ходе выполнения НИР результаты превосходят мировой уровень. Проведенный анализ выполнения требований технического задания на НИР и оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей показали, что все основные требования, задачи и цели НИР выполнены в полном объеме.

Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов НИР показала, что учитывая необходимость создания и введения в эксплуатацию к 2030 г. около 10 млн. кВт маневренных мощностей и возможности решения этой задачи путем создания наряду с новыми ГАЭС относительно дешевых водородоаккумулирующих электрических станций (ВАЭС), обеспечивающих производство пиковых и полупиковых мощностей на уровне 10% от мощности ЭС без создания новых типов турбин, можно оценить объем перспективного внутреннего рынка разрабатываемой новой техники в 2-5 ГВт установленной мощности к 2030 г., что при цене оборудования на уровне 400 долл./кВт соответствует затратам от 800 до 2000 млн. долл. Автономные и резервные водородные паротурбинные энергоустановки мощностью 3-5 МВт(э) уже сегодня востребованы предприятиями, имеющими водород в качестве побочного продукта и их выход на рынок не зависит от темпов реализации программы строительства АЭС и угольных ТЭС в европейской части России. Поэтому выход на рынок при успешном завершении работ можно прогнозировать на 20-е годы текущего столетия, а организацию опытно-промышленного мелкосерийного производства на уровне 2014-2016 гг.

Проведен анализ результатов НИР, который показал, что полученные результаты, в частности схемные решения для объектов централизованной и автономной энергетики могут быть использованы в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках. На основе проведенного анализа разработаны рекомендации по дальнейшему использованию полученных результатов.

### **3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки**

Полезная модель заявка № 2011143618 от 31.10.2011 «Водородная аккумулирующая система для централизованной энергетики», РФ.

Полезная модель заявка № 2012142483 от 05.10.2012 «Водородно-кислородный парогенератор с комбинированным охлаждением камеры сгорания».

### **4. Назначение и область применения результатов проекта**

- в составе модернизируемых и вновь создаваемых энергоблоков ТЭЦ для покрытия неравномерности графика нагрузки и создания дополнительных пиковых и маневренных мощностей. Такая система (присоединенная водородо-кислородная установка) позволит электростанции работать в наиболее экономичном базовом режиме. Одновременно с этим возрастет КПД электростанции

за счет использования высокотемпературного водяного пара для перегрева пара перед турбиной. Согласно энергетической стратегии РФ до 2030 г. потребность в пиковых и маневренных мощностях составит около 10 ГВт;

- в составе автономной энергоустановки, например, для нужд сельского хозяйства, отопления и электроснабжения крупных поселков коттеджного типа, энергоснабжения крупных промышленных предприятий, производящих водород в качестве побочного продукта. Рынок водорода, произведенного в качестве побочного продукта, оценивается в 30-50 тонн/год;

- создание мобильных аккумулирующих энергоустановок для транспорта. В настоящее время опытные образцы создали, например, «DaimlerCrysler», «FIAT», «Ford», «General Motors», «Honda», «Hyundai», «Nissan», «Toyota», «Volkswagen», ВАЗ), автобусы (например, «MAN», «Neoplan», «Renault») и другие транспортные средства, военные корабли и субмарины.

### 5. Эффекты от внедрения результатов проекта

Внедрение разрабатываемых систем аккумулирования для централизованной и автономной энергетики на основе водородных технологий позволит в 2-3 раза снизить стоимость строительства аккумулирующих установок (по сравнению с ГАЭС) для централизованной энергетики и в 4-5 раз увеличить их ресурс для автономной энергетики (по сравнению с электрохимическими аккумуляторами). Снижение стоимости позволит более эффективно решить проблему строительства пиковых и маневренных мощностей для реализации энергетической стратегии России до 2030 г.

### 6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Данным контрактом коммерциализация не предусмотрена.

Заместитель директора  
ОИВТ РАН



В.А. Зейгарник

Заведующий лабораторией №  
2.7. ОИВТ РАН



С.П. Малышенко

М.П.

