

ЛИТЕРАТУРА:

1. British Petroleum statistical review of world energy 2014. London, 2014.
2. Тайлашева Т.С., Красильникова Л.Г., Воронцова Е.С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области // Известия Томского политехнического университета, 2013, т.322 №4
3. Jankovskiy S., Luzhkovoj D., Larionov K., Matveeva A. Research of heating rates influence on layer coal gasification of Krasnogorsky and Borodinsky coal deposit // МАТЕС Web of Conferences 37, 01026.
4. Цибульский С.А. Современные технологии газификации угля в промышленной энергетике // XX Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» 2013, 189-190.
5. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения взрыва, 2015, т.51, №2.
6. Yaman S, Kucukbayrak S (1997) Effect of oxydesulphurization on the combustion characteristics of coal. Thermochim Acta 293(2):109–115
7. Catalytic effects of metals on peat combustion Aho, M.J., Hämäläinen, J.P., Tummavuori, J.L.
8. Завьялова У.Ф., Барбашова П.С., Лермонтов А.С. и др. Самораспространяющийся синтез блочных катализаторов нейтрализации выхлопных газов Pd-CeO₂/Al₂O₃ // Кинетика и катализ, 2007, Том 48 №1. – с. 171-176.
9. Токарева И.В., Мишаков И.В., Ведягин А.А. и др. Модифицирование углеволокон для армирования трубного полиэтилена ПЭ80Б / Композиты и наноструктуры. – 2014. – Том 6 №3. – с. 158-167.
10. Slyusarskiy K.V., Bejsekov M.K., Marysheva J.V., Rakov Y.Ja. Dependence of pyrolysis rate of coal on temperature // МАТЕС Web of Conferences, Volume 37, 01053.

АТОМНО-ВОДОРОДНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

¹А.Р. Дягель, ²К.В. Слюсарский
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5022

Значительным образом снизить затраты на электроэнергию при электрохимическом методе производства водорода сможет создание атомно-водородного энергетического комплекса, вместе с тем решив еще одну немаловажную проблему.

В связи с программой развития атомной энергетики, особо актуальными являются вопросы повышения безопасности и эффективности работы АЭС по условиям обеспечения базисной электрической нагрузкой, а также эффективно-го аккумулирования внепиковой электроэнергии. В часы ночного минимума

электропотребления будет осуществляться выработка водорода и кислорода посредством электролиза воды и их аккумулятирование в системе хранения для дальнейшей реализации, как товарной продукции, тем самым став эффективной технологией по выравниванию загрузки АЭС.

Проведем сравнение себестоимости водорода (рисунок 1) для вариантов, когда водородный энергетический комплекс находится в составе АЭС с потреблением электроэнергии по её себестоимости, для случая отдельной производственной энерготехнологической станции с потреблением электроэнергии из энергосистемы (степень очистки водорода – 99,7-99,9%), а также себестоимость водорода, полученного методом паровой конверсии метана с учетом очистки конвертируемого газа до уровня содержания водорода 97 % с учетом затрат (в виде штрафов) на выбросы CO₂ при Российской внутренней цене газа порядка 190 долл./1000 м³ (2014г.).

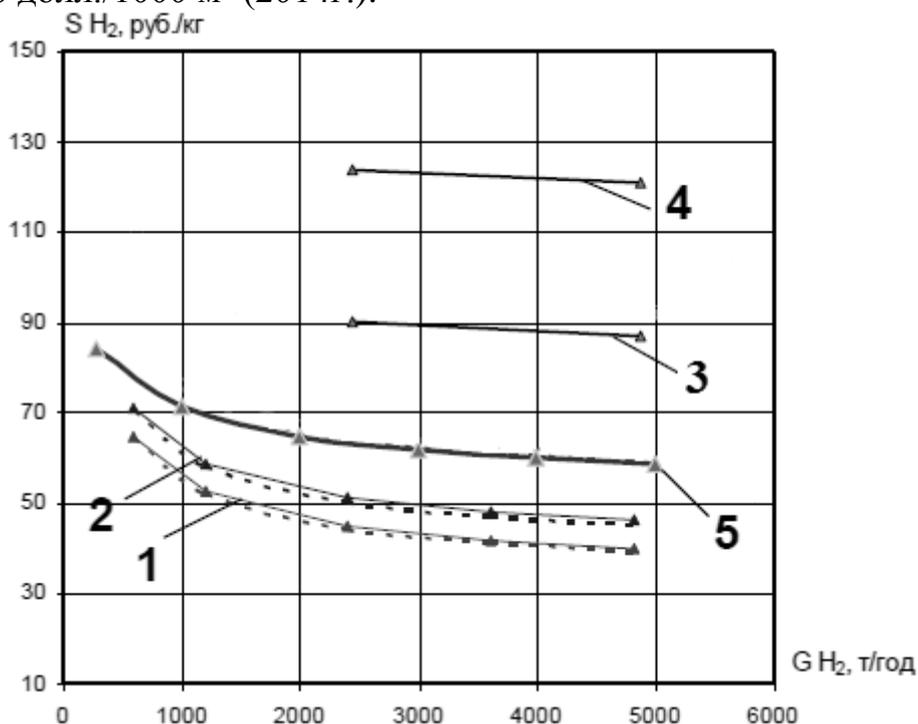


Рис. 1 себестоимость получения водорода (при КПД электролиза 80%): 1,2 – при цене на потребляемую электроэнергию от АЭС в циклическом режиме 0,3, 0,45 руб./кВт·ч соответственно; 3, 4 – при цене на потребляемую электроэнергию от энергосистемы в стационарном режиме 1,83 и 2,64 руб./кВт·ч соответственно (средневзвешенный тариф с учетом НДС, 2014г.); 5 – себестоимость получения водорода методом паровой конверсии метана при внутренней Российской цене на газ порядка 190 долл./1000 м³ (2014г.).

Из рисунка 1 видно, что при потреблении электроэнергии по себестоимости от АЭС затраты на производство водорода заметно ниже по сравнению со значениями при потреблении электроэнергии из энергосистемы.

Также очевидно, что при КПД электролиза порядка 80% водород, производимый электролизом воды в циклическом режиме за счет электроэнергии от АЭС по её себестоимости в интервале 0,3 – 0,45 руб./кВт·ч оказывается конкурентоспособным с методом паровой конверсии природного газа при Россий-

ской внутренней цене на газ, в отличие от производимого при потреблении электроэнергии из энергосистемы. [5]

Убедившись в рентабельности и высокой эффективности совместного производства электроэнергии и водорода на АЭС в предыдущих пунктах, перейдем к конкретным примерам.

В настоящее время в промышленности эксплуатируются или разрабатываются опытно-промышленные образцы трех основных типов электролизеров для производства водорода: водно-щелочные электролизеры типовой конструкции, электролизёры с твердополимерным электролитом (ТПЭ) и высокотемпературные твердо-оксидные электролизеры.

Основным достоинством водно-щелочных электролизеров является низкая стоимость материалов и отработанная технология производства, но водород получается низкого качества из-за примесей кислорода, щелочей и водяного пара, следовательно, требуется дополнительная очистка. Кроме того, данный тип имеет наибольшие энергозатраты.

Наиболее эффективным и безопасным является электролизер с ТПЭ, у него низкое энергопотребление, а получаемый водород высокой степени чистоты. Однако, материалы электродов, включающие металлы платиновой группы, а также высокая стоимость мембран (200\$ на 1 м²) заметно повышают стоимость установки. Но, не смотря на это, данный тип является одним из самых перспективных для эксплуатации, в том числе и на АЭС.

Высокотемпературный твердо-оксидный электролизер имеет самые низкие энергозатраты, однако для его работы необходим дополнительный подвод высокопотенциальной теплоты. Его установка возможна на высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, с температурой теплоносителя 900-950°C, создав дополнительный контур для отвода тепла. [3]

Отдельного внимания заслуживают водородные генераторы РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, разрабатываемые в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Один из типов основан на разложении водяного пара в расплаве Рb-Vi при температуре $t = 400-1000^\circ\text{C}$, когда протекает реакция:



Температура теплоносителя составляет 520°C, следовательно, осуществление реакции (1) возможно, создав дополнительный контур отвода тепла. Интенсифицировать процесс может использование специального кислородного насоса. [1,2,4]

Проведем сравнение основных характеристик электролизеров и водородного генератора с разложением воды (таблица 1):

Табл. 1. Характеристики основных типов электролизеров [2,3]

	Водно-щелочной	ТПЭ	Высокотемпературный	С разложением воды в Pb-Bi	
Реагент	NaOH/КОН	Деионизированная вода	Водяной пар	Водяной пар + расплав Pb-Bi	
Рабочая температура, °С	70-95	90-110	800-1000	525	810
Рабочее давление, МПа	1	до 3	н/д	н/д	
Материал электродов	Стальные сетки	RuO_2 (30%), IrO_2 (32%), SnO_2 (38%),	ZrO_2 + оксиды Yb и Sc	Электроды отсутствуют	
Энергозатраты, кВт·ч/м ³ H ₂	5,0-5,3 (электроэнергия)	3,9-4,1 (электроэнергия)	2,8-3,0 (электроэнергия)	от 3,6 (тепловая энергия)	
Чистота H ₂ , %	99	99,99	99,99	0,02	15,21
Стоимость	низкая	на 30-40% выше, чем у водно-щелочных	н/д	н/д	
Распространенность в промышленности	высокая	средняя, набирающая обороты	на стадии НИР	на стадии НИР	

Водородный генератор на РУ БРЕСТ имеет ряд преимуществ перед электролизерами – практически полное отсутствие затрат электроэнергии (кроме питания кислородного насоса), а также электродов и мембран, изготавливаемых из дорогостоящих материалов.

Вместо электроэнергии в данной установке потребляется тепловая энергия, передаваемая теплоносителем реактора. Зная, что для осуществления реакции разложения воды необходимо подвести 286 кДж/моль, и что согласно формуле (1) при разложении 1 моля воды выделяется 1 моль водорода, путем некоторых вычислений получаем энергозатраты, приблизительно равные 3,6 кВт·ч/м³H₂ при чистоте водорода 100%, что сопоставимо с энергозатратами электролизеров (таблица 1). Иными словами, без количественных изменений один вид подводимой энергии заменяется на другой, более дешевый.

Однако, если учесть низкие концентрации полученного водорода, то при температуре 810°С с чистотой водорода 15,21% энергозатраты составят порядка 24 кВт·ч/м³H₂, а при 525°С с чистотой 0,02% - 18000 кВт·ч/м³H₂. Столь низкое содержание водорода объясняется использованием несовершенного кислородного насоса, следовательно, экспериментальный образец требует доработки.

Подведем итоги. Атомно-водородный энергокомплекс, работающий за счет внепиковой электроэнергии, во-первых, конкурентоспособен с традицион-

ными методами добычи водорода, а, во-вторых, позволит обеспечить АЭС базисной нагрузкой. В то же время наиболее выгодными могут оказаться водородные генераторы, разрабатываемые для реакторов нового поколения типа БРЕСТ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Adamov E.O., Orlov V.V. NATURALLY SAFE LEAD-COOLED FAST REACTOR FOR LARGE-SCALE NUCLEAR POWER, Moscow. 2001 – 268 pp.
2. Рачков В.И., Мартынов П.Н. Инновационные технологии, развиваемые в ГНЦ РФ-ФЭИ// Известия вузов, ядерная энергетика. 2014. №1. С 16-38.
3. Семенова И.В. Производство электролитического водорода. Физико-химические закономерности, современное состояние и перспективы развития// Энергосбережение и водоподготовка. 2010. №3 (65). С 15-21.
4. Адамов Е.О., Габарев Б.А., Орлов В.В., Филин А.И. Опытномонстрационный реактор БРЕСТ// Энергия: экономика, техника, экология. 2003. №8. С. 25-30.
5. Байрамов А.Н. Исследование эффективности атомно-водородного энергетического комплекса// Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития, выпуск II, сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции (10 октября 2015 г.)

Научный руководитель: К.В. Слюсарский, ассистент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБИЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ

¹Д.С. Лужковой, ²О.Ю. Ромашова
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5БМ61

Повышение эффективности использования энергоресурсов является общемировой проблемой, поскольку возрастающий с каждым годом спрос на них неизбежно приводит к сложностям экономического, экологического и технического характера. Для российской энергосистемы, в которой преобладает значительная доля когенерации, особо актуальна проблема повышения эффективности работы существующих теплоэлектроцентралей.

Одной из наиболее перспективных технологий для внедрения на ТЭЦ является преобразование низкопотенциальной теплоты в высокопотенциальную с помощью абсорбционных тепловых насосов (АТН).