

УДК 620.93

**ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СТАНЦИЯХ
HYDROGEN PRODUCTION AT NUCLEAR POWER PLANTS**

В.С. Трубило

Научный руководитель – И.А. Евсеенко, ассистент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь,

V. Trubilo

Supervisor – I. Yevseyenko, assistant
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данных тезисах рассматривается возможность выработки водорода на атомных электростанциях (АЭС), оценивается себестоимость такого производства, оценивается, насколько эффективным может оказаться производство водорода методом электролиза на АЭС для повышения маневренности станции.*

***Abstract:** the abstract considers the possibility of generating hydrogen at nuclear power plants (NPPs), estimates the cost of such production, assesses how effective hydrogen production by electrolysis at NPPs can be to increase plant maneuverability.*

***Ключевые слова:** производство водорода, атомная электростанция, эффективность производств.*

***Keywords:** hydrogen production, nuclear power plant, production efficiency.*

Введение

Чтобы уменьшить вредное воздействие на окружающую среду, а также повысить эффективность производства водорода, развитые страны активно рассматривают вариант производства водорода на атомных электростанциях. Производство водорода с использованием ядерной энергии имеет потенциальные преимущества перед другими методами производства. Их можно описать двумя основными аспектами: качество, так как этот процесс приводит к снижению выбросов парниковых газов, и количество, т.к. становится возможным крупномасштабное производство водорода.

Основная часть

Методы паровой конверсии метана, газификации угля, высокотемпературного электролиза и термохимического разложения воды требуют высоких температур. Тогда как для низкотемпературного электролиза необходима только электроэнергия. А при методах паровой конверсии и при газификации угля выделяется углекислый газ, что вредно для окружающей среды.

Во многих странах мира действуют государственные программы по так называемой атомно-водородной энергетике. В последние годы сфера охвата программы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) по неэлектрическим применениям ядерной энергии была расширена за счет включения других более перспективных направлений, таких как производство

водорода и применение высокотемпературного технологического тепла. Технологии производства водорода на АЭС имеют большой потенциал и преимущества перед другими источниками, которые могут быть рассмотрены для увеличения доли водорода в будущей мировой энергетической экономике. Выбор водородных технологий (которые будут сопряжены с ядерными энергетическими реакторами) во многом зависит от типа самой атомной электростанции.

На АЭС с реакторами с водой под давлением (ВВЭР, PWR) можно реализовать только низкотемпературный электролиз, т.к. параметры теплоносителя на выходе из реактора не превышают $\sim 330^{\circ}\text{C}$.

Считается, что появление высокотемпературных реакторов – это главный шаг в сторону водородной ядерной энергетики. Водород на таких АЭС может производиться и как единственный продукт, и параллельно с электроэнергией. Температура теплоносителя (гелия) на таких реакторах сможет достигать 1000°C , что позволит применять любой из выше названных методов.

Экономика производства водорода – это решающим фактор в вопросах выбора методов, который становится более значимым с введением налога на выбросы углерода. HydCalc был разработан как калькулятор одного окна для приблизительной оценки стоимости производства водорода с использованием различных технологий. Он использует текущую оценку цен из публикаций и научных статей, которые находятся в открытом доступе, и показывает себестоимость производства водорода и средний предполагаемый выброс CO_2 . В нем также рассматривается влияние налога на выброс CO_2 (carbon tax – это вид штрафа, который предприятия должны платить за чрезмерные выбросы парниковых газов) на себестоимость продукции.

В результате расчета с помощью этой программы пришли к следующим выводам. Низкотемпературный электролиз, несмотря на то что он самый экологически чистый из методов и имеет практически нулевой выброс CO_2 (только косвенные источники выбросов дают свой вклад), остается самым дорогим даже с учетом carbon tax. Даже при самой дешевой электроэнергии $0,046 \text{ \$/кВт}\cdot\text{ч}$ стоимость 1 тонны водорода будет дороже, чем полученная при паровой конверсии метана, в 1,5 раза.

Одним из самых дешевых оказывается высокотемпературный электролиз, но при условии, что цены на электричество составят $0,046 \text{ \$/кВт}\cdot\text{ч}$. Иначе при стоимости электроэнергии $0,131 \text{ \$/кВт}\cdot\text{ч}$ стоимость такого водорода будет в 2 раза превышать стоимость водорода, полученного традиционными методами.

Самым же дешевым методом оказывается производство водорода в йодно-серном цикле на высокотемпературных реакторах VHTR, но при условии, что экономические расчеты ведутся, принимая низкую ставку рефинансирования 10,5 %. При поднятии ставки до 16,5 % стоимость производства водорода возрастает и становится чуть больше, чем стоимость производства водорода всеми традиционными методами. Если говорить о малых модульных газоохлаждаемых реакторах MHR, цена водорода

становится выше, чем на крупных реакторах. Это можно объяснить большими капиталовложениями и высоким сроком окупаемости таких реакторов.

При выборе метода стоит опираться не только на себестоимость получаемого водорода, но и на чистоту производства. Если мы говорим о газификации угля или о конверсии метана, при повышении спроса на водород будет повышаться и выброс CO_2 . Ловушки CO_2 со своей задачей на 100 % не справляются, а carbon tax пусть и учитывает выбросы, но борется уже с последствиями и как раз направлен на стимуляцию производств к выбору более экологичных методов. Также carbon tax имеет тенденцию расти и отличается от страны к стране. Например, в некоторых европейских странах налог на CO_2 составляет более 100 \$/т CO_2 .

Т.к. мы стараемся стремиться одновременно к экологической чистоте производства и экономической эффективности, самым удачным методом можно назвать йодно-серный цикл. Однако для его реализации нужны высокие температуры порядка 850°C, которые в ядерной энергетике можно получить только на АЭС с высокотемпературными реакторами (там температура теплоносителя может достигать 1000°C). К сожалению, на данный момент такие реакторы не запущены в серийное производство. Такая технология используется только на экспериментальных и опытных установках, и в разных странах мира идет процесс накопления научно-технических знаний в этой области.

Сегодня можно рассмотреть следующий вариант производства водорода на АЭС. Наиболее распространенными типами реакторов в мире являются реакторы с водой под давлением, например, реакторы типа ВВЭР. На них возможно производство водорода только методом низкотемпературного электролиза: для других методов температура в таком реакторе недостаточна (температура теплоносителя на выходе из реактора последнего поколения – 328°C). Как можно видеть по расчетам выше, такой метод оказывается дорогим.

Но водород на АЭС с ВВЭР можно использовать для повышения маневренности самой АЭС. Это можно реализовать следующим образом. В часы провалов часть электроэнергии может идти на производство водорода путем электролиза. А в часы пиков нагрузки – этот водород можно сжигать и выделяемую при этом тепловую энергию использовать в обычном паротурбинном цикле для выработки дополнительной электроэнергии. При этом реакторная установка будет работать при номинальной нагрузке, что поможет избежать термических нагрузок на материалы активной зоны.

Такой метод использования водорода на АЭС не самый эффективный: мы не сможем покрыть полностью пиковую нагрузку, а также $\frac{3}{4}$ электроэнергии, пущенные на производство водорода, теряются в процессе дальнейшего преобразования водорода в электроэнергию. Поэтому единственная причина для использования такой схемы – это повышение маневренности атомной электростанции, чтобы сделать ее вклад в суточный график нагрузки более гибким. Экономически такое использование установок электролиза обосновать было бы сложно.

Заключение

Действительно перспективным производство водорода на АЭС сможет стать только когда высокотемпературные реакторы станут массово вводить в промышленную эксплуатацию. И тогда лидирующим может стать производство водорода методом йодно-серного цикла на АЭС с высокотемпературными реакторами. Это не только позволит улучшить экономическую эффективность производства водорода, но и уменьшит выбросы углекислого газа в атмосферу.

Литература

1. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
2. МАГАТЭ. Nuclear hydrogen production [Электронный ресурс] / МАГАТЭ. Nuclear hydrogen production. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-hydrogen-production>. – Дата доступа: 23.03.2023.
3. Сравнительная оценка эффективности АЭС с использованием сателлитной турбины [Электронный ресурс] / Сравнительная оценка эффективности АЭС с использованием сателлитной турбины. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'naya-otsenka-effektivnosti-aes-s-ispolzovaniem-satellitnoy-turbiny/viewer>. – Дата доступа: 23.03.2023.