

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА НА БАЗЕ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г.Л. Хорасанов, В.В. Колесов, В.В. Коробейников

Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1.



Рассматривается возможность использования технологии быстрого натриевого реактора для паровой конверсии метана в водород. Наличие трех независимых энергетических петель в российском быстром реакторе БН-600 позволяет использовать парогенератор одной из петель как источник водяного пара под давлением $p = 13,2$ МПа и с температурой $T = 505^\circ\text{C}$. Для повышения температуры парогазовой смеси (пар + метан) до величины, необходимой для проведения эффективной конверсии, может быть использована вторая энергетическая петля реактора. Электрическая мощность 200 МВт, вырабатываемая в этой петле, достаточна для питания источника высокотемпературного потока гелия, $T = 950^\circ\text{C}$, с помощью которого температура парогазовой смеси в конвертере повышается до температуры $T = 820^\circ\text{C}$. Рассмотренная технология позволит получать большую производительность водорода, порядка 80 тысяч кубометров в час. При этом будет высвобождаться до 25% исходного природного газа, который в рамках существующей стандартной технологии паровой конверсии метана сжигается на приготовление и нагрев парогазовой смеси.

Ключевые слова: водород, паровая конверсия метана, быстрый натриевый реактор БН-600.

Одной из фундаментальных проблем, требующих разработки научных подходов, является ограничение воздействия техногенных факторов на окружающую среду. Предприятия топливно-энергетического комплекса, использующие уголь и углеводороды, дают наибольшие выбросы в атмосферу парниковых газов, в частности, диоксида углерода. В этой связи поэтапное сокращение углеродного топлива и в перспективе его глубокое замещение водородным топливом лежат в основе концепции водородной энергетики и водородной экологии. Предполагается [1], что в будущем водород может стать одним из основных энергоносителей, и сложится принципиально новая – водородная – энергетика.

Атомная энергетика является инструментом, позволяющим при производстве электроэнергии существенно снизить выбросы парниковых газов в атмосферу. Так, по данным Международного энергетического агентства (МЭА), с 1971 г. на действующих в мире атомных электростанциях предупредили эмиссию 56 млрд. т диоксида углерода, что составляет мировой объем за два года.

В объектах атомной энергетики высокие температуры, порядка 850 – 950°C, необходимые для газификации угля и конверсии природного газа в водород [2], могут достигаться только в высокотемпературных атомных реакторах с газовым теплоносителем. Такие реакторы разрабатываются в ряде стран, но пока они не вышли на промышлен-

© Г.Л. Хорасанов, В.В. Колесов, В.В. Коробейников, 2015

ный уровень. В России успешно функционирует быстрый коммерческий реактор с натриевым теплоносителем БН-600, с температурой натрия первого контура на выходе не более 550°C. Реакторы серии БН нацелены на производство электроэнергии, однако и другие технические и коммерческие задачи могут решаться с помощью этих реакторов. В частности, представляется возможным их использование и для промышленного производства водорода [3]. Однако относительно невысокая температура теплоносителя в освоенных натриевых реакторах не позволяет эффективно конвертировать метан с целью получения водорода. В работе [4] было предложено использовать дополнительный нагрев для повышения температуры парогазовой смеси.

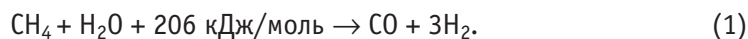
Цель работы – исследовать возможность паровой конверсии метана в водород путем использования среднетемпературного водяного пара реактора БН-600 ($T = 505^\circ\text{C}$) и последующего дополнительного нагрева парогазовой смеси до требуемой температуры ($T = 820^\circ\text{C}$) за счет электрической энергии, вырабатываемой в том же реакторе.

Промышленный реактор БН-600 имеет баковую компоновку [5]. В баке расположено оборудование первого контура, включая, кроме активной зоны, промежуточные теплообменники, главные циркуляционные насосы. Передача тепла от активной зоны к парогенераторам осуществляется по трехконтурной схеме по трем параллельным петлям.

Основные технические характеристики каждой из трех независимых энергетических петель БН-600 [5]:

- номинальная электрическая мощность – 200 МВт;
- паропроизводительность – $6,4 \cdot 10^5$ кг/ч;
- давление пара – 13,2 МПа;
- температура пара – 505°C.

В настоящее время примерно половина промышленного производства водорода получается путем паровой конверсии (риформинга) метана по схеме [2]



Реакцию проводят при давлении парогазовой смеси $p = 2 - 3$ МПа, мольном соотношении воды и метана $m = 2$, температуре $T = 850^\circ\text{C}$ и в присутствии катализаторов.

Промышленную паровую конверсию метана проводят в два этапа.

На первом этапе в камере с температурой до 500°C получают водяной пар с давлением до 3 МПа и смешивают его с подводимым извне природным газом в мольном соотношении $m = 2$. При этом сжигается до 12% подводимого газа на образование и нагрев водяного пара.

На втором этапе приготовленная парогазовая смесь поступает в высокотемпературную камеру – конвертер с температурой $T = 850^\circ\text{C}$, содержащий катализаторы и мембраны для сепарации водорода. При этом на обогрев конвертера расходуется 13% подводимого газа.

Таким образом, промышленная паровая конверсия метана сопровождается сжиганием 25% подводимого к конвертеру газа с соответствующим выбросом продукта горения – диоксида углерода – в атмосферу.

В работе с целью получения высокой производительности водорода, сохранения существенной части природного газа и устранения поступления продуктов его горения в атмосферу предлагается использовать пар, поступающий с парогенератора БН, для приготовления парогазовой смеси, а для дальнейшего повышения температуры парогазовой смеси использовать электронагреватели,

запитанные от турбины БН.

Такая возможность имеется на находящемся в эксплуатации третьем энергоблоке Белоярской АЭС – БН-600. В реакторе БН-600 функционируют три энергетические петли, каждая из которых является независимым энергоблоком.

Указанные высокие параметры водяного пара одной энергетической петли позволяют использовать его для приготовления парогазовой смеси, тем самым на 12% сократить расход подводимого газа и снизить выброс диоксида углерода в атмосферу.

Для повышения температуры приготовленной парогазовой смеси с 500 до 820°C, необходимой для эффективной паровой конверсии, можно использовать электрическую мощность до 200 МВт, вырабатываемую во второй независимой энергетической петле реактора, и тем самым сохранить еще 13% подводимого газа.

Если предположить, что половина этой мощности с учетом потерь будет затрачена на паровую конверсию метана, то, учитывая энергию, необходимую для протекания эндотермической реакции (1), 206 кДж/моль CH_4 , получим следующую производительность конверсии:

$$P = 100 \text{ МВт} / 206 \text{ кДж/моль } \text{CH}_4 \approx 5 \cdot 10^2 \text{ моль } \text{CH}_4/\text{с}. \quad (2)$$

Для осуществления такой производительности конверсии потребуется следующий поток подводимого газа:

$$W_{\text{газа}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Нм}^3/\text{ч}, \quad (3)$$

где Нм^3 – кубометр газа при нормальных условиях (давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°C).

Подведение к конвертеру 40 тысяч кубометров природного газа в час представляется технически реализуемым.

Для приготовления необходимой для конверсии парогазовой смеси потребуется поток водяного пара

$$W_{\text{пара}} = W_{\text{газа}} \cdot m \cdot M / 22,4, \quad (4)$$

где $W_{\text{пара}}$ – поток водяного пара, кг/ч; $W_{\text{газа}}$ – поток природного газа при нормальных условиях, $\text{Нм}^3/\text{ч}$; M – молекулярный вес воды, 10^{-3} кг; $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}^3$ – объем, занимаемый молем метана; $m = 2$ – молярное соотношение пара и газа.

Если в соотношении (4) задать поток природного газа, равный $4 \cdot 10^4 \text{ Нм}^3/\text{ч}$, то для приготовления парогазовой смеси с соотношением $m = 2$ потребуется поток водяного пара

$$W_{\text{пара}} = 6,4 \cdot 10^4 \text{ кг/ч}, \quad (5)$$

который на порядок меньше паропроизводительности одной энергетической петли БН-600 – $6,4 \cdot 10^5 \text{ кг/ч}$.

Согласно реакции (1), при паровой конверсии из одного моля метана может быть получено до трех молей водорода или, по крайней мере, два моля водорода с учетом потерь [6]. Тогда при подведении к конвертеру потока метана $W_{\text{газа}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ в результате реакции (1) может быть получен поток водорода порядка $W_{\text{водорода}} = 8 \cdot 10^4 \text{ Нм}^3/\text{ч}$.

Оценим возможную производительность водорода на базе реактора БН-600. Как известно, реактор БН-600 работает в течение 280-ти суток в году (6720 часов). Если за это время к комплексу реактор БН-600 – конвертер подвести 250 млн. кубометров газа ($W_{\text{газа}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Нм}^3/\text{ч}$), а это технически возможно в России, то с учетом

конверсии одного моля метана в два моля водорода будет произведено до 500 млн. кубометров водорода в год, и при этом будут сокращены выбросы диоксида углерода в атмосферу.

Устройство для конверсии метана в водород будет состоять из двух блоков: среднетемпературной камеры и высокотемпературной камеры-конвертера.

В среднетемпературной камере формируется поток парогазовой смеси. С этой целью с выхода парогенератора реактора БН-600 в камеру поступает поток водяного пара величиной 18 кг/с при температуре $T = 505^\circ\text{C}$ и давлении $p = 30$ атм. Одновременно к камере подводится поток метана величиной 8 кг/с при температуре $T = 40^\circ\text{C}$ и давлении $p = 30$ атм. С выхода среднетемпературной камеры поток парогазовой смеси (метан + водяной пар) величиной 26 кг/с при температуре $T \approx 500^\circ\text{C}$ и давлении $p = 30$ атм направляется в высокотемпературную камеру-конвертер.

Высокотемпературная камера представляет собой химический реактор, в котором метан + водяной пар при температуре 820°C и в присутствии катализаторов конвертируется в синтетический газ (монооксид углерода и водород). В процессе прохождения вдоль колонки химического реактора монооксид углерода частично восстанавливается в водной среде до диоксида углерода с дополнительной генерацией водорода. В дальнейшем водород, образованный в реакции расщепления метана в синтез-газ и «реакции сдвига» монооксида в диоксид углерода, сепарируется путем диффузии через никелевые мембраны, расположенные в той же камере. Величина потока водорода, выведенного из камеры-конвертера, может составлять до 2 кг/с и более. Остальная парогазовая смесь, состоящая из нерасщепленного метана, водяного пара, монооксида и диоксида углерода, остатков водорода, в виде потока суммарной величиной до 24 кг/с выводится из химического реактора-конвертера и может быть в дальнейшем использована или захоронена.

Химический реактор-конвертер нагревается до требуемой для конверсии средней температуры $T = 820^\circ\text{C}$ путем его обдува потоком гелия величиной до 40 кг/с при температуре $T = 950^\circ\text{C}$ и давлении $p = 40$ атм. Эти параметры потока гелия достигаются в источнике потока гелия, потребляющем электрическую мощность до 200 МВт из одной из трех независимых энергетических петель реактора БН-600.

Практически, возможность дополнительного нагрева парогазовой смеси за счет электрической энергии до температуры порядка 820°C хорошо подкрепляется экспериментами, проведенными в 80-ые годы прошлого века в Германии на установке EVA II [6]. На этой установке для приготовления пара и нагрева парогазовой смеси до 820°C использовался поток гелия величиной 4 кг/с, давлением 40 атм и температурой 950°C . Высокая температура гелия достигалась за счет использования электронагревателей, запитанных электрической мощностью до 10 МВт. Указанным способом в высокотемпературной камере EVA II конвертировался поток метана величиной 37,5 моль $\text{CH}_4/\text{с}$ (0,6 кг/с). При этом на образование водяного пара и последующий нагрев парогазовой смеси до 820°C затрачивалась энергия

$$E = 10 \text{ МВт} / 37,5 \text{ моль } \text{CH}_4/\text{с} = 267 \text{ кДж/моль } \text{CH}_4. \quad (6)$$

При такой величине энергозатрат на моль CH_4 электрическая мощность одной энергетической петли реактора БН-600, 200 МВт, может обеспечить производительность конверсии

$$P = 200 \text{ МВт} / 267 \text{ кДж/моль } \text{CH}_4 = 7,5 \cdot 10^2 \text{ моль } \text{CH}_4/\text{с}, \quad (7)$$

которая близка к указанной в (2), $5 \cdot 10^2$ моль $\text{CH}_4/\text{с}$.

Таким образом, использование водяного пара из одной энергетической петли быстрого натриевого реактора БН-600 и электроэнергии из соседней независимой

петли может создать условия для эффективной паровой конверсии потока метана величиной 8 кг/с в поток водорода величиной около 2 кг/с.

Производство водорода по предложенной схеме будет связано с коммерческими потерями суммы, складывающейся из стоимости электроэнергии, потенциально вырабатываемой на двух петлях БН-600, и стоимости подведенного природного газа.

Две энергетические петли БН-600 вырабатывают за один час $4 \cdot 10^5$ кВт-ч электроэнергии. При действующей в центральных областях России розничной цене электроэнергии 3,66 руб./кВт-ч стоимость электроэнергии, выработанной за один час в двух петлях реактора БН-600, составит 1,464 млн. руб.

Количество подведенного к конвертеру природного газа за один час составит $4 \cdot 10^4$ м³ при нормальных условиях. При розничной цене на природный газ 5,40 руб./м³ стоимость подведенного за один час газа составит 0,216 млн. руб.

В этих условиях за один час будет произведено $8 \cdot 10^4$ Нм³ водорода. Следовательно, затраты на приготовление и дополнительный нагрев парогазовой смеси для получения одного нормального кубометра водорода на базе реактора БН-600 будут не ниже 20 руб.

Следует отметить, что при использовании природного газа для приготовления пара и обогрева конвертируемой парогазовой смеси соответствующие затраты в расчете на один нормальный кубометр водорода составят около 3,5 руб. Однако в этом случае при производстве 500 млн. нормальных кубометров водорода в атмосферу поступит около 130 тысяч тонн диоксида углерода, что соответствует примерно 0,01% годовых российских выбросов в атмосферу углекислого газа от сжигания углеводородного топлива, которые в 2009 г. составляли 1,5326 млрд. тонн [8].

Выводы: использование водяного пара из одной энергетической петли быстрого натриевого реактора БН-600 и электроэнергии из соседней независимой петли этого же реактора могут создать условия для производительности водорода на уровне 500 млн. нормальных кубометров водорода в год, что соответствует примерно 0,1% годового мирового производства водорода [2]. В этом случае при финансовых затратах, превышающих затраты на получение водорода освоенным промышленным способом, эмиссия диоксида углерода в атмосферу будет предупреждена на уровне порядка 130 тысяч тонн в год.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 14-48-03036)

Литература

1. Пономарев-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика. // Атомная энергия. 2004. Том 96. Вып. 6. С. 411-425.
2. Ewan B.C.R., Allen R.W.K. A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. // International Journal of Hydrogen Energy. 2005. Vol. 30. Iss. 8. PP. 809-819.
3. Сорокин А.П., Калякин С.Г. и др. Высокотемпературная ядерная энерготехнология на основе быстрых реакторов с натриевым теплоносителем для производства водорода. // Атомная энергия. 2014. Том 116. Вып. 4. С. 194-203.
4. Хорасанов Г.Л., Иванов А.П., Блохин А.И. Конверсия метана с использованием водяного пара быстрых ядерных реакторов. // Альтернативная энергетика и экология. 2004. №6. С. 5-7.
5. Багдасаров Ю.Е., Сараев О.М., Ошканов Н.Н. Реактор БН-600: Препринт № 2284. Обнинск: ФЭИ. 1992. 38 с.
6. Назаров Э.К., Дубяга Н.А., Семенова Л.В., Ивановский А.Ф. Физико-химические основы процессов хемотермического метода передачи энергии на дальние расстояния. // Атомно-

водородная энергетика и технология. Вып. 7. М.: Энергоатомиздат. 1986. С. 3-61.

7. Harth R., Jansing W., Teubner H. Experience gained from the EVA II and KVK operation. // Nuclear Engineering and Design. 1990. Vol. 121. PP. 173-182.

8. Интернет-ресурсы:

http://slon.ru/economics/top_10_stran_po_vybrosam_uglekislogo_gaza-691567.xhtml;

<http://www.ecfor.ru/pdf.php?id=2004/5/08>.

Поступила в редакцию 11.11.2014 г.

Авторы

Хорасанов Георгий Леванович, ведущий инженер, кандидат физ.-мат. наук,
ст. научн. сотрудник

E-mail: khorasanow@yandex.ru

Колесов Валерий Васильевич, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Коробейников Валерий Васильевич, профессор, доктор физ.-мат. наук

E-mail: korob@ippe.ru

UDC 621.039.58

CONCERNING HYDROGEN PRODUCTION ON THE BASE OF NUCLEAR TECHNOLOGIES

Khorasanov G.L., Kolesov V.V., Korobeynikov V.V.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear
University «MEPhI».

1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga region, 249040 Russia

ABSTRACT

The paper is dedicated to assuming a possibility of application sodium fast reactor technology for steam methane reforming (SMR) into hydrogen. Existence of three independent power loops in the Russian reactor BN-600 allows using a steam generator of one of these loops as a source of pressurized steam for preparation a steam-gas mixture with medium temperature, $T = 505^{\circ}\text{C}$. To increase the mixture (steam + methane) temperature to the value required for effective SMR an additional heating is proposed. For this purpose the second independent power loop of the same reactor might be used. This loop's 200 MW electric power can be supplied to the source of high temperature helium flux which has ability to increase the temperature of the converter up to the value of required temperature, $T = 820^{\circ}\text{C}$. This technology allows obtaining great rate of hydrogen production, up to the value of 500 million normal cubic meters of hydrogen per 280 effective days of the reactor BN-600 operation in supplying 250 million cubic meters of natural gas to the converter. In this case, due to this technology, emission into the atmosphere of 130 thousand tons of the carbon dioxide can be excluded. This technology has advantage as compared to the standard now existing SMR technology which needs burning about 25 per cent of supplying natural gas for preparation and heating the steam and further heating the steam-gas mixture. Estimated cost of the BN-600 electric energy and the feeding natural gas consumption required for obtaining 1 normal cubic meter of hydrogen will be equal to 20 Russian rubles or approximately to 0.3 – 0.4 Euro.

Key words: hydrogen, steam methane reforming, sodium fast reactor BN-600.

REFERENCES

1. Ponomarev-Stepnoj N.N. Atomno-vodorodnaya energetika. [Nuclear and hydrogen power engineering.] *Atomnaya energiya*. 2004, v. 96, iss. 6, pp. 411-425.
2. Ewan B.C.R., Allen R.W.K. A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005, v. 30, iss. 8, pp. 809-819.
3. Sorokin A.P., Kalyakin S.G. et al. Vysokotemperaturnaya yadernaya energotekhnologiya na osnove bystrykh reaktorov s natrievym teplonositelem dlya proizvodstva vodoroda. [High temperature nuclear power technology on the base of fast reactors with sodium coolant for hydrogen production.] *Atomnaya energiya*. 2014, v. 116, iss. 4, pp. 194-203.
4. Khorasanov G.L., Ivanov A.P., Blokhin A.I. Konversiya metana s ispol'zovaniem vodyanogo para bystrykh yadernykh reaktorov. [Methane reforming by fast nuclear reactor steam.] *International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology»*. 2004, no 6, pp. 5-7.
5. Bagdasarov Yu.E., Saraev O.M., Oshkanov N.N. Reactor BN-600. *Preprint PhEI-2284*, Obninsk: SSCRFIPPE, 1992 (in Russian).
6. Harth R., Jansing W., Teubner H. Experience gained from the EVA II and KVK operation. *Nuclear Engineering and Design*. 1990, v. 121, pp. 173-182.
7. Nazarov E.K., Dubyaga N.A., Semyonova L.V., Ivanovskij A.F. Fiziko-himicheskie osnovy hemotermicheskogo metoda peredachi energii na dal'nie rasstoyaniya. [Physical and chemical backgrounds of thermochemical technique for energy transfer to long distance.] *Nuclear and Hydrogen Power Engineering and Technology*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, iss. 7, pp. 3-61 (in Russian).
8. Available at:
http://slon.ru/economics/top_10_stran_po_vybrosam_uglekislogo_gaza-691567.xhtml..;
<http://www.ecfor.ru/pdf.php?id=2004/5/08>.

Authors

Khorasanov Georgij Levanovich, Leading Engineer, Senior Scientist,
Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: khorasanow@yandex.ru

Kolesov Valerij Vasil'evich, Associated Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Korobejnikov Valerij Vasil'evich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: korob@ippe.ru