

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА (05.14.04)

УДК 661.96

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-29-36

Энергетическая эффективность производства и потребления водорода

С.Н. Петин

Изучена энергетическая эффективность производства водорода на основе коэффициента энергетической рентабельности. Предложена модель расчета энергетической рентабельности EROEI (Energy Returned on Energy Invested) по ряду переделов реализации водорода при исследовании различных вариантов производства, хранения и транспорта. Исходя из проведенных расчетов показано, что затраты энергии на реализацию водорода составляют 154...614% от его химической энергии в зависимости от способов производства, хранения и транспорта, что соответствует $EROEI = 0,651...0,163$ и характеризует водород как энергетически нерентабельный энергоноситель.

Выполнен обзор литературы, представлены возможные варианты создания энергоэффективного производства водорода, опирающиеся на использование энергетически дешевых источников энергии, которыми для электролитического производства могут стать возобновляемые источники энергии, а также электроэнергия от атомных и тепловых электростанций.

Представлены направления энергосберегающего производства водорода при использовании методологии интенсивного энергосбережения, где получаемый водород сопровождается значительными энергосберегающими эффектами при комбинировании его получения с металлургическим производством. Проанализировано производство водорода конверсионными способами при использовании выбрасываемых вторичных энергетических ресурсов на примерах конвертерных газов сталеплавильного производства и нефтеперерабатывающего завода. Рассмотрены эффекты от использования водорода на автотранспорте, в энергетике и металлургической промышленности. Предложен коэффициент энергетической эффективности использования водорода, определяющийся как отношение экономии удельного расхода топлива при использовании водорода к энергозатратам на его производство. Дан пример энергоэффективного использования водорода при термической обработке стали, где энергосберегающий эффект от его использования в 4,73 раз превосходит затраты на его получение.

Ключевые слова: коэффициент энергетической рентабельности, пароводяная конверсия природного газа, электролиз, транспорт и коэффициент энергетической эффективности использования водорода.

Для цитирования: Петин С.Н. Энергетическая эффективность производства и потребления водорода // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 29—36. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-29-36.

Energy Efficiency of Hydrogen Production and Consumption

S.N. Petin

The hydrogen production energy efficiency is studied based on the energy profitability coefficient. A model for calculating the energy profitability, known as energy returned on energy invested (EROEI), which can be used in analyzing different production, storage and transport options for a number of hydrogen processing technologies, is proposed. It is shown, based on the performed calculations, that the energy expenditures for hydrogen production make 154--614% of its chemical energy depending on the production, storage and transportation methods, which corresponds to $EROEI = 0.651--0.163$ and characterizes hydrogen as an energy-unprofitable energy carrier.

A review of the literature is carried out, and possible options of setting up energy-efficient production of hydrogen are presented, which rest on using energy-cheap energy sources. Renewable energy sources, as well as electricity from nuclear and thermal power plants, may become such sources for electrolytic hydrogen production.

Energy-saving hydrogen production lines are presented involving the use of an intensive energy saving methodology, in which the produced hydrogen is accompanied by significant energy-saving effects in combining its production with metallurgical production. Hydrogen production by means of conversion methods using rejected secondary energy resources is analyzed taking as examples the use of converter waste gases from steelmaking production and an oil refinery. The effects from using hydrogen in motor vehicles, in the power industry, and in the metallurgical industry are considered. The hydrogen utilization energy efficiency coefficient is proposed, which is defined as the ratio of saving the specific fuel consumption in using hydrogen to the energy expenditures for its production. An example of the energy efficient use of hydrogen in thermal treatment of steel is presented in which the energy-saving effect of its use is 4.73 times greater than the cost of obtaining it.

Key words: hydrogen, energy returned on energy invested, natural gas steam-water conversion, electrolysis, transport, hydrogen utilization energy efficiency coefficient.

For citation: Petin S.N. Energy Efficiency of Hydrogen Production and Consumption. Bulletin of MPEI. 2019;2:29—36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-29-36.

Введение

Выбор водорода в качестве источника энергии обусловлен рядом преимуществ, главные из которых — экологическая чистота и высокий уровень энергии в единице массы. Исходя из прогнозов [1], мировое потребление водорода в ближайшее столетие может возрасти в 16 раз с 50 до 800 млн т, при этом основное его количество будет использоваться в энергетике и на транспорте. Для перехода к водородной энергетике необходимо решение проблем производства достаточно дешевого водорода в массовом количестве, его хранения, транспортировки и эффективного использования.

Анализ энергетической рентабельности производства водорода

Для анализа энергетической эффективности производства, хранения и транспортировки водорода предложен критерий энергетической рентабельности EROEI (Energy Returned on Energy Invested) [2 — 8], определяемый по формуле:

$$\text{EROEI} = E_{\Pi} / E_3,$$

где E_{Π} — количество энергии, полученной при использовании энергоресурса; E_3 — количество энергии, израсходованной, чтобы получить используемый энергоресурс.

Наиболее эффективен вариант производства водорода при $\text{EROEI} > 1$.

Обзор данного показателя для водорода показал, что имеется значение, равное 0,5, характеризующее водород как энергетически нерентабельный энергоноситель, где затраты энергии на получение энергоносителя составляют 200% от энергии полученного энергоносителя [4].

Рассмотрим затраты энергии водорода при расчете критерия EROEI при его реализации на различных переделах: производства, хранения и транспортировки. В качестве единицы водорода принят нормальный 1 м³, а в качестве полученной энергии E_{Π} предложено

использовать низшую теплоту сгорания водорода, равную 10800 кДж/м³.

Для определения затраченной энергии используем схему для расчетов прямых затрат энергии, представленную на рис. 1.

Суммарный расход затраченной энергии равен

$$E_3 = \sum_{k=1}^K (e_{n,k} \varepsilon_{n,k}) + \sum_{n=1}^N \Delta p_n,$$

где $\varepsilon_{n,k}$ — энергетический потенциал (энергоёмкость, приведенный удельный расход топлива) k -го энергоносителя, используемого в n -м переделе.

Затраты энергии из-за потерь водорода определим, как

$$\Delta p_n = d_n \left(E_{\Pi} + \sum_{n=1}^N E_{3_{n-1}} \right),$$

где d_n — доля потерь водорода на n -м переделе реализации водорода.

Для оценки затрат на реализацию в различных переделах рассмотрим энергозатраты при производстве, хранении и транспортировке водорода наиболее развитыми целевыми способами.

При изучении передела по производству учитывается, что получение водорода конверсиями природного газа и электролизом воды является целевым. Водород из нефти и угля, как правило, побочный продукт в процессе нефтепереработки, коксохимии и др. В настоящее время в мировой структуре производство водорода на 85% осуществляется из природного газа, 7% из нефти; 4% из угля; 4% из воды методом электролиза [1].

Выделены целевые способы производства водорода, при этом удельные энергозатраты на 1 м³ H₂, получаемого электролизом, состоят из 4,5...5,1 кВт·ч электроэнергии и 0,92...1,1 кг воды [1, 9]. Удельные энергозатраты на производство водорода из природного газа состоят из 0,43...0,66 м³ природного газа, 0,038...0,07 кВт·ч электроэнергии и 0,9...1,7 кг воды [9 — 12].

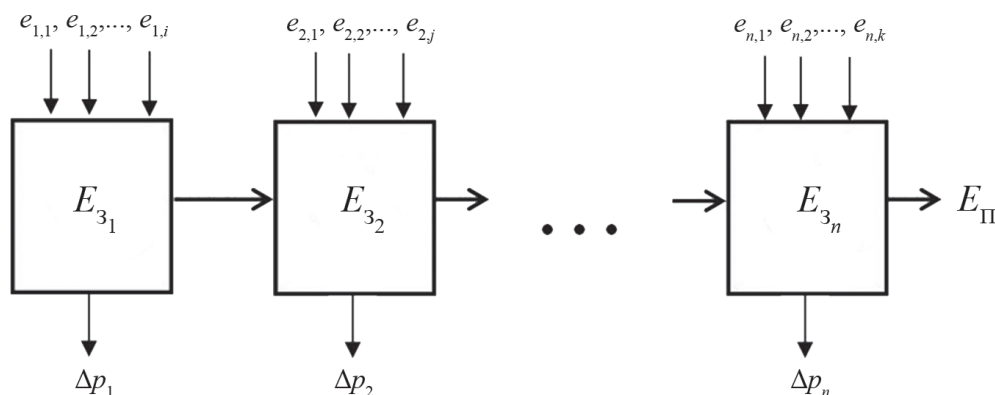


Рис. 1. Схема для расчетов затраченной энергии энергоносителей:

$E_{3_1}, E_{3_2}, \dots, E_{3_n}$ — затраченная энергия; $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n$ — потери энергии, связанные с потерями водорода с учетом затрат на предыдущих переделах; $e_{1,1}, e_{2,j}, \dots, e_{n,k}$ — расходы энергоносителей на 1-, 2- и n -ом переделах реализации водорода

При анализе передела по хранению водорода учитывается, что наиболее распространены способы хранения в сжатом газообразном и в жидком или в сжиженном видах. Удельные энергозатраты на хранение 1 м³ водорода в газообразной форме составляют 0,04...0,08 кВт·ч, а в сжиженном виде 0,95...1,34 кВт·ч. Также существует ряд других способов хранения водорода, например в гидратах, методом криогенной адсорбции или при использовании углеродных наноструктур [1].

При рассмотрении транспорта водорода учитывается, что в настоящее время в основном применяется транспортировка газообразного (по трубопроводам) или сжиженного (автомобильным и железнодорожным транспортом) водорода. У каждого варианта транспорта есть свой диапазон применения [10]. Так, для расхода водорода более 10 т/ч и на расстояния до 1000 км используют трубопроводы, при меньших расходах и более близких расстояниях — цистерны сжиженного водорода.

Энергозатраты на транспорт водорода при использовании трубопроводов оцениваются в 0,27...0,32 кВт·ч/м³H₂ на 1 тыс. км [10]. Энергозатраты на транспорт жидкого водорода с учетом массы хранения водорода в 0,093 кг у.т./м³ на 1 тыс. км для автотранспорта и 0,006 кг у.т./м³ на 1 тыс. км для железнодорожного транспорта.

Для вычисления потенциалов используемых энергоносителей $\varepsilon_{n,k}$ на переделах реализации водорода используют следующие переводные коэффициенты [13, 14]: 1 кг у.т. = 29 330 кДж; 1 кВт·ч электроэнергии = 0,320 кг у.т. = 9386 кДж; 1 м³ природного газа = 36 500 кДж; 1 кг воды = 9,9 · 10⁻⁵ кг у.т. = 2,9 кДж.

В расчетах доля потерь водорода d_n на каждом участке составляет 1,5%, исходя из оценочных данных [1, 10].

Карта энергоматериалопотребления производства, хранения и транспорта водорода представлена на рис. 2.

Для вычисления значений по затратам энергии и определения EROEI на основании представленной карты энергоматериалопотребления предложен расчет для двенадцати вариантов реализации водорода, из них варианты 1 — 6 основаны на электролизе воды, а 7 — 12 — на производстве из природного газа. В вариантах 1, 7 отсутствуют переделы по хранению и транспорту, а в 2, 4, 8, 10 — только по транспорту. В вариантах 2, 3, 8, 9 хранение осуществляется в газообразном виде, в вариантах 3, 9 использован трубопроводный транспорт. В вариантах 4 — 6 и 10 — 12 водород хранится в сжиженном виде, при этом в вариантах 5 и 11 используется автомобильный транспорт, в 6 и 12 — железнодорожный, в вариантах 4 и 10 транспорт не используется.

Полученные значения затраченной энергии E_3 на производство водорода по различным вариантам реализации с определением EROEI даны в табл. 1, откуда следует, что основными затратами энергии при реализации водорода являются затраты на его производство, характеризующиеся затратами энергии в 398...451% от энергии получаемого водорода (EROEI = 0,251...0,222) для электролиза и 154...233% (EROEI = 0,651...0,430) для паровой конверсии природного газа.

Затраты на хранение водорода составляют 10...16% от получаемой энергии водорода для газообразного хранения и 90...127% для сжиженного.

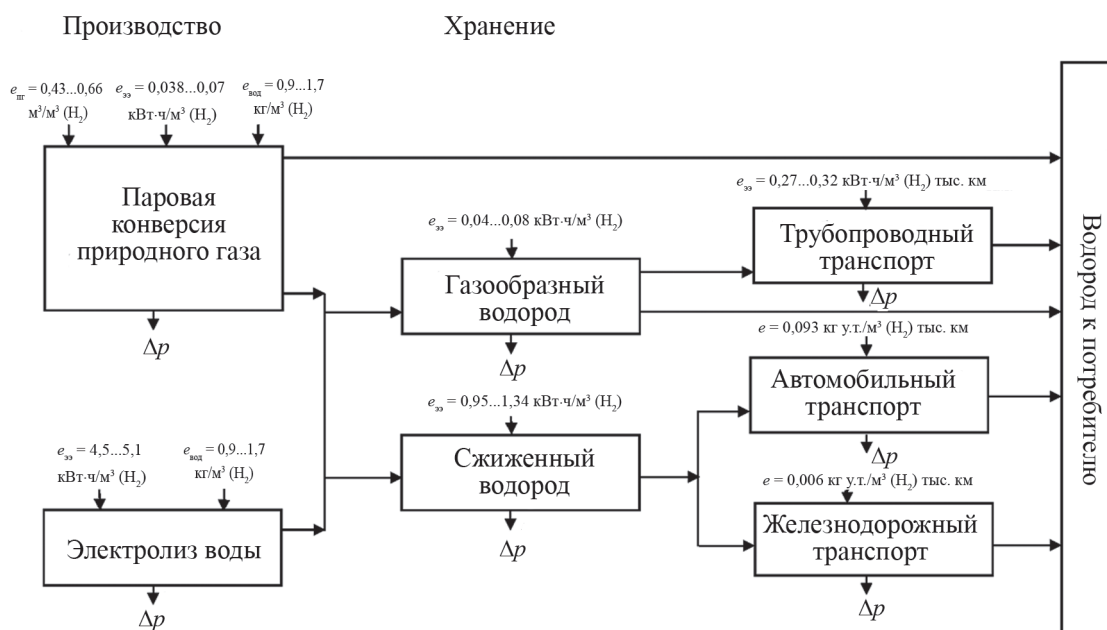


Рис. 2. Карта энергоматериалопотребления производства, хранения и транспорта водорода:

$e_{п}, e_{э}, e_{вод}$ — удельные затраты природного газа, электрической энергии и воды; Δp — потери водорода

Таблица 1

Расчетные значения затраченной энергии и EROEI для различных вариантов реализации водорода

Номер варианта	Затраченная энергия, кДж/м ³ (H ₂)								EROEI
	производство		хранение		транспорт		итого		
	минимум	максимум	минимум	максимум	минимум	максимум	минимум	максимум	
1	43033	48750	—	—	—	—	43033	48750	0,251...0,222
2	43033	48750	1036	1698	—	—	44210	50392	0,244...0,214
3	43033	48750	1036	1698	3252	4024	47607	54358	0,227...0,199
4	43033	48750	9705	13702	—	—	52879	62395	0,204...0,173
5	43033	48750	9705	13702	3579	3925	56603	66261	0,191...0,163
6	43033	48750	9705	13702	1019	1364	54043	63701	0,200...0,170
7	16600	25123	—	—	—	—	16600	25123	0,651...0,430
8	16600	25123	788	1295	—	—	17388	26419	0,621...0,409
9	16600	25123	788	13299	2995	3607	20383	30025	0,530...0,360
10	16600	25123	9457	13299	—	—	26057	38422	0,414...0,281
11	16600	25123	9457	13299	3321	3507	29379	41929	0,368...0,258
12	16600	25123	9457	13299	761	947	26819	39369	0,403...0,274

Затраты на транспорт водорода на 1000 км составляют 30...3 % от получаемой энергии водорода для трубопроводного транспорта и 31 и 7% для автомобильного и железнодорожного, соответственно.

Таким образом, действующие способы реализации водорода энергетически нерентабельны, но достижение энергетической рентабельности газа возможно при изыскании способов производства энергетически дешевого энергосберегающего водорода.

Пути повышения энергетической эффективности производства водорода

Наименьшие энергетические затраты при производстве водорода из рассматриваемых способов имеет паровая конверсия природного газа, энергозатраты составляют 154...233% от энергии водорода. Затраты на электролиз — 398...451% от энергии производимого водорода, но само производство перспективно при использовании развитых систем возобновляемых источников энергии, развитии атомно-водородной энергетики или при производстве водорода на тепловых электрических станциях с повышением их энергетической эффективности [1, 10, 14, 15].

Помимо энергозатратных систем производства водорода предложены энергосберегающие способы, когда производство водорода сопровождается дополнительным энергосберегающим эффектом. Создание подобных систем возможно при использовании методологии интенсивного энергосбережения, разработанной на кафедре энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ» профессором А.Д. Ключниковым [16]. Так, в [17] предложена схема производства водорода с энергосберегающим эффектом 8,94 кг у.т./м³ (H₂), что составляет в 24,3 раза больше полученной

энергии водорода. Суть способа заключается в том, что водород производится на базе комплексного использования природного газа на предприятиях черной металлургии при достижении значительных энергосберегающих эффектов.

Схема производства водорода на базе использования выбрасываемых конвертерных газов сталеплавильного производства, в которой энергетический эффект по снижению природного газа составляет 68% при достижении рентабельности производимого водорода, приведена в [18, 19].

Практический опыт энергоэффективного получения водорода продемонстрирован в промышленном пригороде Венеции, где ранее выбрасываемый водород от нефеперерабатывающего завода используется на водородной парогазовой установке электрической мощностью 12 МВт для производства электрической и тепловой энергии [20].

Анализ энергетических эффектов при потреблении водорода

Энергетические затраты на производство водорода могут быть оправданы при его эффективном использовании, так как использование водорода может дать эффект превышающий затраты на его получение. Объекты, эффективность функционирования которых повышается за счет использования водорода, представлены в табл. 2 [10].

Энергетическая эффективность использования водорода может быть оценена путем сопоставления энергозатрат на его производство и экономии энергии в результате его использования. Соответствующей количественной характеристикой может служить коэффициент энергетической эффективности

Таблица 2

Эффективность использования водорода

Потребители водорода	Эффективность использования
Двигатель внутреннего сгорания на водороде	Более широкие пределы воспламенения по сравнению с традиционными моторными топливами. Высокий термический КПД (на водороде 37,5...43%, на традиционном моторном топливе — до 30%). Использование зажигания посредством накала вместо дорогостоящего искрового зажигания. Снижение расхода масла, износа двигателя и его легкий запуск
Топливные элементы на водороде	КПД топливных элементов при выработке электричества достигает 50...85%. Создание гибридных установок (топливный элемент — газовая турбина) с КПД до 70%. Использование топливных элементов на различных видах транспорта и создание электрохимических генераторов на топливных элементах
Электростанции на водородном топливе	Применение водорода с кислородом на парогенераторах в качестве топлива увеличивает КПД до 98,0...99,5% за счет увеличения удельной тепловой мощности, снижения удельного объема установки; уменьшает длительность запуска; сокращает длительность переходного процесса при изменении нагрузки. Термический КПД для ГТУ на водороде достигает 60% при максимальных температурах 1500...2000 К. Промежуточный перегрев пара в турбинах при использовании водорода повышает КПД на 3%
Металлургические установки с использованием водорода как восстановителя	Водород — эффективный восстановитель металлов в области высоких температур. В металлургии эффективность восстановления водородом в 3 раза выше по сравнению с СО. Перспективным направлением использования водорода являются процессы прямого получения железа, что позволит отказаться от производства стали традиционными энергоемкими способами
Термические установки с водородной атмосферой	Переход на энергосберегающую термическую печь (отжиг стали) с водородной защитной атмосферой может дать экономию топлива до 63%

$$K_{\text{эф}}^{\text{H}_2} = \frac{\Delta b_{\text{эк}}^{\text{H}_2}}{\Delta b_{\text{зз}}^{\text{H}_2}},$$

где $\Delta b_{\text{эк}}^{\text{H}_2}$ — экономия удельного расхода топлива вследствие использования водорода, кг у.т./(ед. продукта); $\Delta b_{\text{зз}}^{\text{H}_2}$ — дополнительные энергозатраты на производство водорода, кг у.т./(ед. продукта).

Обе величины приведены к условному топливу и отнесены к единице продукта рассматриваемого промышленного объекта или технологии.

Если $K_{\text{эф}}^{\text{H}_2} > 1$, то энергосберегающий эффект от использования водорода выше затрат на его получение.

В данном случае применение водорода в рассматриваемой технологии энергетически целесообразно.

Оценим энергетическую эффективность использования водорода в процессе термической обработки стали в колпаковых печах. Исходя из представленных в табл. 3 характеристик колпаковых печей листопрокатного цеха Магнитогорского металлургического комбината оценим энергосберегающий эффект при замене азотных колпаковых (АКП) на водородно-азотные колпаковые печи (ВАКП).

Из данных табл. 3 следует, что экономия топлива при переходе на современные колпаковые печи ВАКП

Таблица 3

Эффективность использования водорода

Параметр	Существующая АКП	Новая ВАКП	
		азотная	водородная
Производительность, т/ч:			
стенд	0,61	1,50	1,80
15 стендов АКП	9,15	—	—
8 стендов ВАКП	—	12,0	14,4
Годовой фонд работы печи, ч		8400	
Годовая производительность, т	77800	101800	121000
1-я группа качества	17000	—	
Удельный расход:			
топлива, кг у.т./т	50...54	30	20...22
азотного защитного газа, м ³ /т	18	5	2
электроэнергии, кВт·ч/т	26,5	12	8
технически чистой воды, м ³ /т	10	5	5
водорода, м ³ /т	—	—	3

составляет 40...44% при использовании азотной и 56...63% при использовании водородной технологий.

Эффект от использования водорода в колпаковых печах основан на следующих моментах [21]:

- водород по сравнению с азотом обладает в 6,5 раз большей теплопроводностью и восстановительной способностью, вследствие чего в водородных колпаковых печах в два раза выше коэффициент теплопередачи;

- дожигание водорода совместно с масляными парами, образующимися на базе масляной эмульсии на поверхности стали в процессе прокатки рулонов, позволяет использовать теплоту сгорания водорода и масляных паров;

- экономия электроэнергии за счет применения двухскоростного стенового вентилятора с частотно-регулируемым приводом позволяет экономить электроэнергию при прокачке очень легкого водорода по сравнению с азотом.

Коэффициент энергетической эффективности использования водорода в рассматриваемом примере корректно определять для современных ВАКП при сравнении характеристик азотной и водородной технологий, принимая во внимание расходы топлива и электроэнергии на производство водорода. В качестве источника водорода взята технология на основе паровой конверсии природного газа с характеристиками согласно [11].

Суммарный удельный расход топлива на тонну технологического продукта, кг у.т./т составляет

$$b_{\text{сум}} = b_{\text{тп}} + e_{\text{тп}} b_{\text{эз}} + \Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2},$$

где $b_{\text{тп}}$ — видимый удельный расход топлива кг у.т./т; $e_{\text{тп}}$ — удельный расход электроэнергии на тонну технологического продукта, кВт·ч/т; $b_{\text{эз}}$ — удельный расход топлива при выработке электроэнергии, на основании [13] принимается равным 0,32 кг у.т./кВт·ч;

$$\Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2} = V_{\text{H}_2} (b_{\text{H}_2} + e_{\text{H}_2} b_{\text{эз}}),$$

где V_{H_2} — удельный расход водорода на тонну технологического продукта, м³/т; b_{H_2} — удельный расход топлива на производство водорода, кг у.т./м³; e_{H_2} — удельный расход электроэнергии на производство водорода, кВт·ч/м³.

По данным [11] $e_{\text{H}_2} = 0,038$ кВт·ч/м³; $b_{\text{H}_2} = 0,43$ м³ (прир. газа)/м³ (H₂) или в пересчете на условное топливо 0,528 кг у.т./м³ (H₂).

Литература

1. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014.
2. Сафронов А.Ф., Голоскоков А.Н. EROEI как показатель эффективности добычи и производства энергоносителей // Бурение и нефть. 2010. № 12 С. 48—51.

Для азотной технологии характерны $b_{\text{тп}} = 30$ кг у.т./т; $e_{\text{тп}} = 12$ кВт·ч/т, при которых суммарный удельный расход топлива $b_{\text{сум}} = 30 + 12 \cdot 0,32 = 33,84$ кг у.т./т.

В водородной технологии $b_{\text{тп}} = 22$ кг у.т./т; $e_{\text{тп}} = 8$ кВт·ч/т; $V_{\text{H}_2} = 3$ м³(H₂)/т, следовательно, дополнительные энергозатраты на производство водорода и суммарный удельный расход топлива:

$$\Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2} = 3 \cdot (0,528 + 0,038 \cdot 0,32) = 1,62 \text{ кг у.т./т (тп);}$$

$$b_{\text{сум}} = 22 + 8 \cdot 0,32 + 1,62 = 26,18 \text{ кг у.т./т. (тп).}$$

Экономия суммарного расхода топлива при переходе от азотной к водородной технологии:

$$\Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2} = 33,84 - 26,18 = 7,66 \text{ кг у.т./т. (тп).}$$

Коэффициент энергетической эффективности использования водорода:

$$K_{\text{эф}}^{\text{H}_2} = \Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2} / \Delta b_{\text{эз}}^{\text{H}_2} = 7,66 / 1,62 = 4,73.$$

Поскольку $K_{\text{эф}}^{\text{H}_2} > 1$, применение водорода в рассматриваемой теплотехнологической установке энергетически целесообразно. Аналогичным образом можно проанализировать эффективности применения водорода в других объектах, представленных в табл. 2.

Таким образом, отсутствие энергетической рентабельности при производстве водорода может быть нивелировано энергетически эффективным его использованием.

Заключение

Выполнен анализ энергетической эффективности действующих целевых способов производства, хранения и транспорта водорода на основании коэффициента энергетической рентабельности. Показано, что затраты на реализацию водорода составляют 154..614% от его получаемой энергии, что соответствует коэффициенту энергетической рентабельности 0,651..0,163.

Доказано, что помимо энергозатратных способов производства водорода возможны энергосберегающие способы, основанные на достижении энергосберегающих эффектов при комбинировании на промышленных комплексах черной металлургии и нефтепереработки.

Изучено энергоэффективное использование водорода на базе коэффициента энергетической эффективности использования, сделан вывод, что энергосберегающие эффекты в 4,73 раз превосходят энергетические затраты на его получение.

References

1. Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyul'pa V.V. Vodorod v Energetike. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo Un-ta, 2014. (in Russian).
2. Safronov A.F., Goloskokov A.N. EROEI kak Pokazatel' Effektivnosti Dobychi i Proizvodstva Energoresurov. Burenie i Neft'. 2010;12:48—51. (in Russian).

3. **Голоскоков А.Н.** Критерии сравнения эффективности традиционных и альтернативных энергоресурсов // Нефтегазовое дело. 2011. № 1. С. 285—299.
4. **Visalli D.** Getting a Decent Return on Your Energy Investment [Электрон. ресурс] <http://www.resilience.org/stories/2006-04-12/getting-decent-return-your-energy-investment> (дата обращения 08.04.18).
5. **Heinberg R.** Searching for a Miracle: Net Energy Limits and Fate of Industrial Society. San Francisco: Post Carbon Institute, 2009.
6. **Crude Oil Reserves** [Электрон. ресурс] www.eia.doe.gov/pub/international/iealf/crudeoilreserves.xls (дата обращения 13.04.18).
7. **Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R.** What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? // Energies. 2009. V. 2 (1). Pp. 25—47.
8. **Hall C.** Why EROI Matters (Pt. 1 of 6) // The Oil Drum. 2008. [Электрон. ресурс]: <http://www.theoil Drum.com/node/3786> (дата обращения 10.04.18).
9. **Синяк Ю.В.** Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и тепло-снабжения // Проблемы прогнозирования. 2007. № 3. С. 35—47.
10. **Козлов С.И., Фатеев В.Н.** Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009.
11. **Установка по производству водорода на основе парового риформинга** [Электрон. ресурс] <http://www.mahler-ags.com/ru/hydrogen/hydroform-c.htm> (дата обращения 10.03.18).
12. **Клышников С.Т. и др.** Установка для получения водорода из природного газа и водяного пара // Сталь. 2010. № 3. С. 114—115.
13. **Промышленная теплоэнергетика и теплотехника.** М.: Изд-во МЭИ, 2007.
14. **Хрестоматия энергосбережения.** М.: Теплоэнергетик, 2002.
15. **Tremel A. e. a.** Techno-economic Analysis for the Synthesis of Liquid and Gaseous Fuels Based on Hydrogen Production Via Electrolysis // Intern. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. Pp. 11457—11464.
16. **Ключников А.Д.** Основы теории интенсивного энергосбережения. М.: Изд-во МЭИ, 2016.
17. **Ключников А.Д., Петин С.Н.** Повышение энергетической и экологической эффективности производства водорода на базе комплексного использования природного газа на предприятиях черной металлургии // Вестник МЭИ. 2008. № 3. С. 18—23.
18. **Пат. № 2637439 РФ.** Способ утилизации конвертерных газов для производства водорода / Петин С.Н., Бурмакина А.В., Ипполитов В.А. // Бюлл. изобрет. 2017. № 34.
19. **Петин С.Н.** Утилизация конвертерных газов с целью получения водорода // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 29—33.
3. **Goloskokov A.N.** Kriterii Sravneniya Effektivnosti Traditsionnyh i Al'ternativnyh Energoresursov. Neftegazovoe Delo. 2011;1:285—299. (in Russian).
4. **Visalli D.** Getting a Decent Return on Your Energy Investment [Elektron. Resurs] <http://www.resilience.org/stories/2006-04-12/getting-decent-return-your-energy-investment> (Data Obrashcheniya 08.04.18).
5. **Heinberg R.** Searching for a Miracle: Net Energy Limits and Fate of Industrial Society. San Francisco: Post Carbon Institute, 2009.
6. **Crude Oil Reserves** [Elektron. Resurs] www.eia.doe.gov/pub/international/iealf/crudeoilreserves.xls (Data Obrashcheniya 13.04.18).
7. **Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R.** What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?. Energies. 2009;2 (1):25—47.
8. **Hall C.** Why EROI Matters (Pt. 1 of 6). The Oil Drum. 2008. [Elektron. Resurs]: <http://www.theoil Drum.com/node/3786> (Data Obrashcheniya 10.04.18).
9. **Sinyak Yu.V.** Perspektivy Primeneniya Vodoroda v Sistemah Detsentralizovannogo Elektro- i Teplosnabzheniya. Problemy Prognozirovaniya. 2007;3:35—47. (in Russian).
10. **Kozlov S.I., Fateev V.N.** Vodorodnaya Energetika: Sovremennoe Sostoyanie, Problemy, Perspektivy. M.: Gazprom VNIIGAZ, 2009. (in Russian).
11. **Ustanovka po Proizvodstvu Vodoroda na Osnove Parovogo Riforminga** [Elektron. Resurs] <http://www.mahler-ags.com/ru/hydrogen/hydroform-c.htm> (Data Obrashcheniya 10.03.18). (in Russian).
12. **Klyshnikov S.T. i dr.** Ustanovka dlya Polucheniya Vodoroda iz Prirodnogo Gaza i Vodyanogo Para. Stal'. 2010;3:114—115. (in Russian).
13. **Promyshlennaya Teploenergetika i teplotekhnika.** M.: Izd-vo MEI, 2007. (in Russian).
14. **Hrestomatiya Energoberezheniya.** M.: Teploenergetik, 2002. (in Russian).
15. **Tremel A. e. a.** Techno-economic Analysis for the Synthesis of Liquid and Gaseous Fuels Based on Hydrogen Production Via Electrolysis. Intern. J. Hydrogen Energy. 2015;40:11457—11464.
16. **Klyuchnikov A.D.** Osnovy Teorii Intensivnogo Energoberezheniya. M.: Izd-vo MEI, 2016. (in Russian).
17. **Klyuchnikov A.D., Petin S.N.** Povyshenie Energeticheskoy i Ekologicheskoy Effektivnosti Proizvodstva Vodoroda na Baze Kompleksnogo Ispol'zovaniya Prirodnogo Gaza na Predpriyatiyah Chernoy Metallurgii. Vestnik MEI. 2008;3:18—23. (in Russian).
18. **Pat. № 2637439 RF.** Sposob Utilizatsii Konverternykh Gazov dlya Proizvodstva Vodoroda / Petin S.N., Burmakina A.V., Ippolitov V.A. Byull. izobret. 2017;34. (in Russian).
19. **Petin S.N.** Utilizatsiya Konverternykh Gazov s Tsel'yu Polucheniya Vodoroda. Vestnik MEI. 2018;1: 29—33. (in Russian).

20. **Electricity** from Hydrogen with Combined Cycles. The Fusina Project [Электрон. ресурс] https://www.xing-events.com/eventResources/r/v/kfKncJZVrUe3Xh/Electricity_from_hydrogen_with_combined_cycles_-_The_Fusina_Project.pdf (дата обращения 15.03.18).

21. **Достижения** в применении техники отжига в колпаковых печах // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке: Сб. науч. трудов. М.: Металлургия, 1994. Т. 2 [Электрон. ресурс] <http://engineeringssystems.ru/sbornik-nauchnih-trudov-chernya-metalurgiya-rossii-i-stran-sng-tom2/dostizheniya-v-primeneniitehniki-otzhiga.php> (дата обращения 15.03.18).

Сведения об авторе:

Петин Сергей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ», e-mail: Spetin@yandex.ru

Information about author:

Petin Sergey N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Energetic of High-Temperature Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: Spetin@yandex.ru

Работа выполнена при поддержке: Министерства образования и науки РФ по государственному заданию в рамках конкурсного отбора научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (заявка № 13.3233.2017/ПЧ)

The work is executed at support: Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the State Task in the Framework of Competitive Selection of Scientific Projects Carried Out by Research Teams of Research Centers and Research Laboratories of Educational Institutions of Higher Education (Application No. 13.3233.2017/ПЧ)

Статья поступила в редакцию: 14.05.2018

The article received to the editor: 14.05.2018

20. **Electricity** from Hydrogen with Combined Cycles. The Fusina Project [Elektron. Resurs] https://www.xing-events.com/eventResources/r/v/kfKncJZVrUe3Xh/Electricity_from_hydrogen_with_combined_cycles_-_The_Fusina_Project.pdf (Data Obrashcheniya 15.03.18).

21. **Dostizheniya** v Primenenii Tekhniki Ozhiga v Kolpakovyh Pechah. Chernaya Metallurgiya Rossii i Stran SNG v XXI Veke: Sb. Nauch. Trudov. M.: Metallurgiya, 1994;2 [Elektron. Resurs] <http://engineeringssystems.ru/sbornik-nauchnih-trudov-chernya-metalurgiya-rossii-i-stran-sng-tom2/dostizheniya-v-primeneniitehniki-otzhiga.php> (Data Obrashcheniya 15.03.18). (in Russian).