

УДК 620.97

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ АЛЮМОВОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

© 2022 г. Э. П. Волков*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

**e-mail: volkov_ep@ihed.ras.ru*

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 15.08.2022 г.

В статье приводятся результаты сравнения стоимости производства высокочистого водорода «без углеродного следа» по технологиям окисления алюминия водой (алюмоводная технология) и электролиза воды. Показано, что в случае низкой стоимости электроэнергии (менее 3 центов/кВт ч) преимущество имеет алюмоводная технология, а более 3 центов/кВт ч – электролиз воды. При этом указаны некоторые преимущества алюмоводной технологии: 1) использование одного агента для получения водорода – электроэнергии и поэтому возможность размещения установок практически в любой точке на территории страны; 2) экономия энергии на сжатии водорода для рабочих параметров (20–90 МПа) из-за наличия в цикле при осуществлении алюмоводной технологии низкопотенциального тепла и 3) возможность снижения цены водорода при крупнотоннажном производстве (более 10 млн м³ водорода в год) из-за незначительного роста капитальных вложений в гидроокислительную установку алюминия.

Ключевые слова: водород, конкурентоспособность, алюмоводная технология, метод гидротермального окисления, метод электролиза воды

DOI: 10.31857/S0002331022060073

Оценку конкурентоспособности алюмоводной технологии получения водорода методом гидротермального окисления алюминия проведем по отношению к получению водорода методом электролиза воды, как к единственному на сегодняшний день методу получения водорода в промышленном масштабе, в котором может отсутствовать углеродный след. Оценка ведется на основе сравнения себестоимости получаемого водорода по методу электролиза воды и по алюмоводной технологии.

Себестоимость водорода, получаемого по методу алюмоводной технологии, рассчитывается исходя из соотношения капитальных и эксплуатационных затрат.

В случае стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВт ч цена водорода равна 3.45 USD/кг H₂, при стоимости электроэнергии 0.03 USD/кВт ч – 6.05 USD/кг H₂ [1].

Расчет себестоимости получаемого водорода методом электролиза воды проводим для сопоставления по той же методике, что и расчет себестоимости водорода, получаемого по алюмоводной технологии [1].

Отсюда, требуется оценить капитальные и эксплуатационные затраты получения водорода методом электролиза воды по всей технологической цепочке с учетом коммуникаций и оборудования.

Основным оборудованием в случае электролиза воды являются:

1. Электролизеры воды с преобразователями напряжения и коммуникациями.
2. Установки по подготовке дистиллированной воды.
3. Компрессоры для доведения давления до рабочих значений (200–700 атм.).
4. Здания и сооружения технологического комплекса.

Основными эксплуатационными затратами являются затраты на используемую электроэнергию и дистиллированную воду, а также затраты на поддержание надежного и устойчивого функционирования установок по производству водорода.

Исходя из вышесказанного, эксплуатационные затраты состоят из:

- 1) Расхода и стоимости электроэнергии на электролиз воды;
- 2) Расхода и стоимости дистиллированной воды;
- 3) Расхода и стоимости электроэнергии на компримирование водорода до рабочих параметров и ежегодный ремонт компрессоров;
- 4) Затрат на оплату эксплуатационного персонала, обслуживание оборудования, проведение ремонта и закупку необходимых для функционирования комплекса расходных материалов.

Конкретные значения капитальных и эксплуатационных затрат взяты из данных реальной эксплуатации установок по электролизу воды, прежде всего из данных введенной в эксплуатацию в 2020 г. крупной установки производительностью 3000 т водорода в год, которая содержит четыре протонно-обменных мембранных электролизера воды (PEM-electrolyzer) по 5 МВт мощностью каждый, производительностью 8.2 тонны в сутки низкосодержащего углерод водорода. Такая установка сооружена в провинции Квебек (г. Беканкур, Канада) и снабжается электроэнергией от гидроэлектростанции.

Время жизни такой системы 60000 часов – 6.8 года [7].

Тогда CAPEX·CFR = 11.78/6.8 USD/кг H₂/год = 1.73 USD/год.

В работе [6] Glenk G. and Reichelstein S. приводят капвложения в протонно-обменную электролизную систему в Германии на уровне 2700 USD/kW.

1.2. Капитальные затраты на производство дистиллированной воды

Исходя из соотношения вода : водород = 9 : 1 и принимая, что стоимость дистиллята определяется капзатратами на катионитовые и анионитовые фильтры, и затратами на их эксплуатацию, стоимость 1 кг дистиллята при его производстве на тепловых электростанциях Северо-Запада и центра России равна

$$C_{\text{дист}} = 1000\text{--}1500 \text{ руб./т или } 14.1\text{--}21.1 \text{ USD/т H}_2\text{O} (0.014\text{--}0.021 \text{ USD/кг H}_2\text{O}).$$

При условии худшего исходного качества воды стоимость дистиллята в условиях России возрастает до 3000 руб./т или 0.042 USD/кг H₂O.

Таким образом, при производстве 1кг водорода стоимость использованного дистиллята в России лежит в диапазоне 0.13–0.38 USD/кг H₂O. В расчетах принимаем $C_{\text{дист}} = 0.26 \text{ USD/кг H}_2\text{O}$. В других странах это значение будет выше.

1.3. Капзатраты на компримирование водорода

Одним из существенных недостатков водорода в качестве энергоносителя является его низкая плотность. Поэтому для его использования в качестве рабочего агента требуется его компримирование до давлений (20–70) МПа. Для этой цели традиционно используются механические компрессоры водорода (поршневые, мембранные), что значительно увеличивает стоимость водорода. Применяемые в настоящее время в промышленности механические компрессоры имеют ряд недостатков: сложность конструкции, недостаточная надежность, высокая стоимость обслуживания, вероят-

Таблица 1.

Electrolyzer Type	Year of Estimate	(2016 €/kW)	(2020 \$/kW)	Original Source Использованы ссылки обзора [2]
PEM	2003	1830	2091	[13]
PEM	2004	1131	1293	Report-N/A ([See 12])
PEM	2005	2440	2789	[41]
PEM	2008	1587	1814	[42]
PEM	2008	1241	1418	[19]
PEM	2009	2154	2462	[20]
PEM	2010	2133	2438	[43]
PEM	2010	960	1097	[21]
PEM	2013	1569	1793	[26]
PEM	2013	1135	1297	Report-N/A ([See 12])
PEM	2014	3227	3688	[44]
PEM	2014	1110	1269	[27]
PEM	2014	1160	1326	[29]
PEM	2014	2463	2815	[45]
PEM	2014	1009	1153	[30]
PEM	2014	1160	1326	[31]
PEM	2014	1513	1729	[46]
PEM	2014	1670	1909	Interview ([See 12])
PEM	2014	1387	1585	Report-N/A ([See 12])
PEM	2014	1210	1383	Report-N/A ([See 12])
PEM	2015	3420	3909	[47]
PEM	2015	2816	3218	[48]
PEM	2015	1012	1157	[32]
PEM	2015	1157	1322	Report-N/A ([See 12])
PEM	2015	1006	1150	Report-N/A ([See 12])
PEM	2015	2575	2943	Report-N/A ([See 12])
PEM	2015	1006	1150	Report-N/A ([See 12])
PEM	2016	1200	1371	[34]
PEM	2016	1000	1143	[35]
PEM	2016	1100	1257	[36]
PEM	2016	1112	1271	[37]
PEM	2016	1283	1466	Interview ([See 12])
PEM	2016	1000	1143	Report-N/A ([See 12])
PEM	2017	800	914	Report-N/A ([See 12])
PEM	2017	1550	1771	Report-N/A ([See 12])
PEM	2017	1000	1143	Report-N/A ([See 12])
PEM	2017	975	1114	Report-N/A ([See 12])

ность утечки водорода и загрязнение водорода маслом, сильный шум и вибрации при работе.

По данным NREL [8] стоимость компримирования составляет до 70% общей стоимости доставки, хранения и выдачи водорода.

Если для компримирования используется механический компрессор фирмы Penev, то его основные показатели будут следующими [9]:

Производительность – 133 кг H₂/час или 1 168 000 кг/год.

Ресурс – 30 лет.

Ремонт – 31 000 USD/год (0.026 USD/кг H₂).

Расход электроэнергии – E = 4.35 кВт ч/кг H₂.

Капзатраты – 14005276 USD или 12 USD/кг H₂/год.

Тогда удельные ежегодные капзатраты:

$K \cdot CFR = 12/30 = 0.4 \text{ USD/кг H}_2$.

1.4. Капзатраты на здания и сооружения

Исходя из соотношения стоимости зданий и оборудования 1 : 10, удельные капзатраты с учетом полной амортизации составят 0.2 USD/кг H₂.

Всего удельные капитальные затраты на производство водорода методом электролиза воды равны

$$K_{H_2} = 1.73 + 0.26 + 0.4 + 0.2 \approx 2.6 \text{ USD/кг H}_2.$$

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ

Учитывались следующие эксплуатационные затраты:

2.1. Расход и стоимость электроэнергии на электролиз воды

Это значение для современных электролизеров лежит в диапазоне 47–66 кВт ч/кг H₂ [3, 4, 6]. При этом, как правило, не учитывают расход электроэнергии на систему в целом, включая вспомогательные устройства и оборудование (преобразователи, размыкатели, коммуникации, материалы анодов и т.д.)

Такое включение, формирующее электролизную систему, увеличивает стоимостной диапазон, который возрастает до 50–83 кВт ч/кг H₂ [4, 7, 10]. Для оценки расходов на электроэнергию примем среднее значение удельного расхода электроэнергии на систему 66.5 кВт ч/кг H₂.

Отсюда стоимость потребляемой электроэнергии на электролиз воды при ее цене 0.01 USD/кВт ч составит 0.665 USD/кг H₂ и при цене 0.03 USD/кВт ч ~ 2 USD/кг H₂.

2.2. Стоимость воды, подвергающейся электролизу для получения водорода

Дистиллированная вода, используемая для получения водорода, в зависимости от качества исходной воды и метода получения дистиллята (химобессоливание или получение с помощью паропреобразователей), имеет цену от 1000 до 3000 рублей за тонну – 0.014–0.042 USD/кг.

С учетом расхода воды на получение 1 кг водорода (9 : 1) ее цена будет равна 0.13–0.38 USD.

В расчетах принято: $C_{\text{дист}} = 0.26 \text{ USD/кг H}_2\text{O}$.

Данное значение учитывает и капитальные и эксплуатационные расходы на получение дистиллята.

2.3. Эксплуатационные затраты на компримирование водорода и ремонт компрессора:

- при цене электроэнергии 0.01 USD/кВтч и ежегодных ремонтах стоимостью 31 000 USD эти затраты будут равны $0.0435 + 0.026 = 0.07$ USD/кг H₂;
- при цене э/э 0.03 USD/кВтч – $0.13 + 0.026 = 0.16$ USD/кг H₂.

2.4. Затраты на оплату эксплуатационного персонала, проведение ремонта, обслуживание оборудования и закупку необходимых для функционирования комплекса расходных материалов

С учетом того, что стоимость замены стэков (набора электролитических ячеек) учтена нами при выборе времени эксплуатации электролизера (~7 лет), в данную статью затрат входят только расходные материалы и оплата персонала. В этом случае затраты будут не более 0.5 USD/кг H₂.

Стоимость получения водорода

В целом капитальные и эксплуатационные затраты на получение 1 кг водорода методом электролиза воды составляют:

- при стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВтч
Затраты = 2.6 USD + 0.665 USD + 0.26 USD + 0.07 USD + 0.5 USD = 4.10 USD;
- при стоимости электроэнергии 0.03 USD/кВтч
Затраты = 2.6 + 2 + 0.26 + 0.16 + 0.5 = 5.52 USD.

Таким образом, стоимость водорода, получаемого методом окисления алюминия водой и методом электролиза воды (с учетом использования исходных данных в достаточно широком диапазоне), примерно одинаковая. (Соответственно 3.45 USD/кг H₂ и 6.05 USD/кг H₂ при стоимости электроэнергии 0.01 USD/кВтч и 0.03 USD/кВтч при производстве по алюмоводной технологии и 4.10 USD/кг H₂ и 5.52 USD/кг H₂ при тех же значениях цены электроэнергии при электролизе воды). Однако при электролизе воды необходимо иметь громадное количество обычной воды, превращенной в дистиллят, что представляет серьезную проблему для большинства стран мира. Кроме того, производства для получения водорода должны быть привязаны к объемным источникам воды, что затрудняет выбор места расположения водородопроизводящих производств. В случае алюмоводной технологии практически единственным агентом для получения водорода является электроэнергия. Это позволяет располагать источники получения водорода практически в любом месте, что особенно важно в случае малых, децентрализованных производств (заправок для автомобилей, малотоннажных производств в металлургии, в нефтеперерабатывающей и химической промышленности).

Особенно эти преимущества проявляются при наличии относительно дешевых источников электроэнергии (ГЭС, АЭС, парогазовые установки). В этом случае страны и регионы, имеющие такие источники, получают существенные конкурентные преимущества.

Экономические показатели гидротермального метода окисления алюминия (ГТОА) более чувствительны к цене электроэнергии. Данная ситуация обусловлена тем, что суммарный расход электроэнергии при производстве водорода по технологии ГТОА примерно в два раза выше, чем при электролизе воды. В то же время приведенные капитальные затраты в технологии электролиза воды в четыре-пять раз выше, чем таковые для технологии ГТОА. Поэтому до цены электроэнергии ~ 0.03 USD/кВтч произведенный водород по технологии ГТОА несколько дешевле, чем по технологии электролиза воды, а при цене электроэнергии более 0.03 USD/кВтч начинается преимущество метода электролиза воды.

В любом случае важными являются конкретные условия в конкретной стране: цена электроэнергии, наличие и цена воды.

Необходимо также отметить, что в алюмоводной технологии существуют возможности компенсации повышенных удельных затрат электроэнергии. Это достигается прежде всего утилизацией низкопотенциального тепла, образующегося в реакторе гидроокисления алюминия и его использованием для сжатия водорода до требуемых значений давлений (20–90 МПа) в термосорбционном компрессоре, без применения механического компрессора, требующего дополнительных затрат электроэнергии. Кроме того, остаточное после этого тепло может использоваться как низкопотенциальное для других целей, что дает экономию затрат на производство водорода на уровне 5–6%. Снижение затрат энергии возможно и за счет улучшения характеристик и соответственно уменьшения расходных материалов на функционирование электролизеров с инертными анодами. Такие работы в компании “РУСАЛ” уже проводятся. Данное обстоятельство может привести к снижению цены производимого водорода дополнительно на 8–10%. И, наконец, при строительстве крупных водородопроизводящих комплексов эффект увеличения мощности приведет к снижению удельных капитальных затрат установок, работающих по алюмоводной технологии, минимум на 10% за счет незначительного увеличения капзатрат на гидроокислительную установку при увеличении ее производительности.

В итоге перспективная стоимость 1 кг производимого водорода может снизиться до 2.5–3 долл. США.

ВЫВОДЫ

1. Алюмоводная технология получения водорода является технологией безотходной, требующей использования для получения высокочистого водорода без углеродного следа только одного расходного агента – электроэнергии, что дает возможность сооружения высокопроизводительных водородных установок практически в любом географическом регионе и в любой точке страны.

2. Расход электроэнергии на производство водорода в алюмоводной технологии примерно в два раза выше, чем в технологии электролиза воды.

3. Капитальные затраты в алюмоводную технологию получения водорода на сегодняшний день в 4–5 раз меньше, чем в технологию получения водорода методом электролиза воды.

4. Алюмоводная технология водорода позволяет осуществить его компримирование практически без эксплуатационных затрат, используя образующееся в цикле низкопотенциальное тепло.

5. Алюмоводная технология обладает возможностью при использовании всего низкопотенциального тепла, доработки технологии электролиза алюминия, применяя инертные аноды и осуществляя крупные водородопроизводящие установки, снизить стоимость производства водорода до 2.5–3 долл. США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по НИР “Оценка конкурентоспособности алюмоводной технологии получения водорода” по договору ОИВТ РАН и ООО “Наука и инновации”, 2022 г.
2. *Christensen A.* Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe. Final release, June 18, 2020. URL: https://theicct.org/sites/default/files/icct2020_assessment_of_hydrogen_production_costs_v1.pdf (дата обращения: 24.05.2021)
3. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolyzers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. IRENA (2020). URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> (дата обращения: 24.05.2021)
4. *Mayyas A., Ruth M., Pivovar B., Bender G. and Wipke K.* Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers. NREL/TP-6A20-72740. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/72740.pdf> (дата обращения: 24.05.2021)

5. Schmidt O., Gambhir A., Staffell I. et al. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *Int J. of Hydrogen Energy*. 42 (2017) P. 30470–30492 URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>
6. Glenk G. and Reichelstein S. Economics of converting renewable power to Hydrogen. *Nature Energy*. 4. P. 216–222 (2019). URL: <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>
7. High Capacity Hydrogen Systems M Series PEM Electrolysers/ URL: https://www.p-rotonon-site.com/sites/default/files/2016-10/pd-0600-0115_rev_a%20%281%29.pdf (дата обращения: 24.05.2021)
8. Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing. Technical Status and Costs, G. Parks, R. Boyd, J. Cornish, and R. Remick. Independent Peer Review Team NREL Technical Monitor: Neil Popovich NREL. Technical Report NREL/BK-6A10-58564 May 2014.
9. Penev M., Zuboy J. and Hunter Ch. Economic analysis of a high-pressure urban pipeline concept (HyLine) for delivering hydrogen to retail fueling stations. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 77 (2019). pp. 92–105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.005>
10. Ivy J. Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report (2004) DE-AC36-99-GO10337. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36734.pdf> (дата обращения: 24.05.2021)

Evaluation of the Competitiveness of Aluminum-Water Technology for Hydrogen Production

E. P. Volkov*

*Federal State Budgetary Institution of Science Joint Institute of High Temperatures
of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

**e-mail: volkov_ep@ihed.ras.ru*

The results of comparing the cost of producing high-purity hydrogen “without a carbon footprint” by the technologies of aluminum oxidation with water (aluminum-water technology) and water electrolysis are presented. It is shown that in the case of a low cost of electricity (less than 3 cents/kWh), aluminum–water technology has an advantage, and more than 3 cents/kWh – water electrolysis. At the same time, some advantages of aluminum-water technology are indicated: 1) the use of one agent to produce hydrogen – electricity and therefore the ability to place installations almost anywhere in the country; 2) energy savings on hydrogen compression to operating parameters (20–90 MPa), due to the presence of low-potential heat in the cycle when implementing aluminum-water technology, and 3) the possibility of reducing the price of hydrogen in large-scale production (more than 10 million m³ of hydrogen per year), due to a slight increase in capital investments in the aluminum hydroxidation plant.

Keywords: hydrogen, competitiveness, aluminum-water technology, hydrothermal oxidation method, water electrolysis method