

# Оценка конкурентоспособности технологий получения «зеленого» водорода: «безуглеродный» алюминий и электролиз воды

А. З. Жук, В. И. Борзенко, Е. А. Бузоверов и П. П. Иванов  
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: peter-p-ivanov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 2 июня 2021 г.

**Аннотация.** Проведены расчетные исследования стоимости водорода, полученного электролизом воды и методом гидротермального окисления алюминия. Стоимости оказываются сопоставимыми, если цена электроэнергии в регионах производства энергоносителей находится на уровне трех центов за кВт·ч. Рассмотрена возможность повышения эффективности алюмоводного процесса получения водорода с помощью металлгидридных систем компримирования с использованием тепла, выделяющегося в реакции гидротермального окисления алюминия. <https://doi.org/10.33849/2021104>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

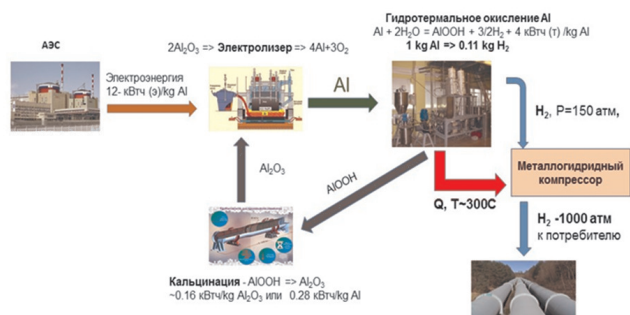
В настоящее время в большинстве экономически развитых стран активно реализуются программы широкого внедрения в экономику водородных энергетических технологий. При этом одной из наиболее актуальных задач является организация экономически эффективного массового производства высококачественного, химически чистого водорода, не сопровождающегося массивным выбросом в атмосферу парниковых газов. С этой точки зрения весьма перспективным оказывается технология гидротермального окисления алюминия (ГТОА).

В процессе гидротермального окисления алюминий взаимодействует с водой или паром. При этом выделяется водород без примеси углерода или его соединений и тепловая энергия. Продуктом окисления алюминия являются гидроокись или окись алюминия (в зависимости от температуры процесса). Полученная гидроокись алюминия восстанавливается до металла в процессе электролиза и снова возвращается в цикл для восстановления водорода из воды в реакции гидротермального окисления — рисунок 1.

родными анодами. В этом случае будет иметь место выделение углекислого газа, образующегося при взаимодействии кислорода и углеродного анода, что не позволяет считать технологию Холла–Эру экологически чистой. В связи с этим в мире интенсивно разрабатываются и внедряются технологии электролиза алюминия с использованием инертных анодов [1, 2]. Инертные аноды с кислородом не взаимодействуют. В этом случае в процессе электролиза выделяется не углекислый газ, а кислород. Если при этом для электролиза использовать электроэнергию, вырабатываемую на ГЭС или АЭС, то в процессе получения водорода появление парниковых газов исключено.

Целью данной работы является сравнительная оценка технико-экономической эффективности технологии электролиза воды и технологии гидротермального окисления алюминия. Предполагается, что электролитическое восстановление окиси алюминия производится с применением инертных анодов, т.е. в процессе электрохимической реакции выделяется не двуокись углерода, а кислород.

Оценивается влияние стоимости электроэнергии, капитальных и текущих затрат на стоимость производимого водорода. Также рассматривается влияние на конечную стоимость водорода технологии его сжатия до давления 90 МПа.



**Рисунок 1.** Схема производства водорода на основе реакции гидротермального окисления «безуглеродного» алюминия. Тепло, выделяющееся в реакции гидротермального окисления алюминия, используется для компримирования водорода.

В процессе электролиза алюминия может использоваться традиционная технология Холла–Эру с угле-

## 2. СТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РФ И ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ

### 2.1. Россия

С амортизированных АЭС электроэнергия отпускается примерно по 0.01–0.015 USD/кВт·ч. Отпускная цена с новых АЭС может достигать 0.1 USD/кВт·ч [3].

Электроэнергия, вырабатываемая ГЭС в первой и второй ценовых зонах, отпускается по цене от 0.01 до 0.02 USD кВт·ч (пересчет по курсу 64 руб./USD — 2019 г.) [4].

### 2.2. Страны Евросоюза

Предполагается, что электролизер подключен к сети и поэтому может производить водород с КИУМ 100% (соотношение фактической выработки электроэнергии к максимально возможной выработке электроэнергии).

### 2.3. Стоимость электроэнергии, генерируемой на основе ВИЭ

Поставка электроэнергии осуществляется в рамках долгосрочных соглашений о закупке электроэнергии, производимой только с применением ВИЭ. При этих условиях стоимость электроэнергии оценивается величинами, лежащими в интервале 0.09–0.22 USD/кВт·ч [5].

### 2.4. Оптовые цены на электроэнергию

Оптовые цены на электроэнергию (вне зависимости от типа генератора) в 2015–2019 гг. в странах Евросоюза колебались в интервале 0.01–0.09 USD/кВт·ч [6].

В дальнейших расчетах будем предполагать, что электроэнергия поставляется производителям алюминия и/или водорода по цене, лежащей в интервале 0.01–0.1 USD/кВт·ч.

## 3. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА

При оценке стоимости производства водорода учитываются следующие характеристики технологий:

- капитальные затраты (*CAPEX*);
- эксплуатационные затраты (*OPEX*);
- стоимость вспомогательных систем и дополнительных технологических переделов;
- капитальные затраты на компрессорное оборудование (промежуточное сжатие до давления 5 МПа);
- ресурс оборудования;
- удельные энергетические затраты на производство вторичного энергоносителя (водорода или алюминия);
- стоимость электроэнергии в регионе производства водорода или алюминия;
- затраты на компримирование водорода до давления 90 МПа (будут рассмотрены в отдельном параграфе).

Стоимость водорода, получаемого методом электролиза воды и гидротермального окисления алюминия, рассчитана исходя из известной методики, основанной на использовании коэффициента возврата капитала *CRF*, учитывающего среднюю стоимость капитала и номинальную продолжительность жизненного цикла актива [7].

Для расчета себестоимости *C*, USD/кг, по обеим технологиям используется формула (1):

$$C = CAPEX * CRF + OPEX, \quad (1)$$

где *CAPEX* — капитальные затраты, USD/кг/год; *CRF* — коэффициент возврата капитала, безразмерная величина; *OPEX* — эксплуатационные затраты, USD/кг/год.

Коэффициент возврата капитала принимается равным 5% [8].

## 4. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ

### 4.1. Капитальные затраты

Известно весьма значительное число работ, посвященных оценкам будущей эволюции стоимости установок для электролиза воды мощностью от сотен киловатт до сотен мегаватт в период 2030–2050 гг. В целом

эти оценки неплохо согласуются между собой и дают величины, лежащие в интервале 500–2000 USD/кВт, в зависимости от типа электролизеров, объемов их производства и горизонта прогноза [5, 8–10]. В наших расчетах мы будем опираться на известную работу G. Glenk et al. [11], т.к. эти данные получены на основе прямого опроса производителей электролизеров и относятся к текущему периоду времени. *CAPEX* электролизера оценен величиной 2700 USD/кВт (данные [11] для Германии).

### 4.2. Эксплуатационные затраты

Эксплуатационные затраты на электролиз воды обычно выражаются в долях первоначальных капитальных затрат. Большинство исследований оценивают это значение в пределах 1–3% от *CAPEX* [12]. Мы следуем методологии моделирования, выбранной в [11], и принимаем фиксированную величину *OPEX* для Европы 50 USD/кВт [11].

### 4.3. Стоимость вспомогательных систем и дополнительных технологических переделов

Стоимость вспомогательных систем («balance of plant» в английской терминологии) учтена в работе [11] в составе *CAPEX*. Стоимость замены стэка (набора электролитических ячеек) установки для электролиза воды принимается равной 60% полной стоимости электролизной установки [12].

### 4.4. Капитальные затраты на компрессорное оборудование (промежуточное сжатие до давления 5 МПа)

По данным [13, 14] капитальные затраты на оборудование для сжатия водорода, полученного методом электролиза воды до давления 5 МПа, составляют 3 USD/кг H<sub>2</sub>/год.

### 4.5. Ресурс электролизных установок

По данным [5, 8] ресурс ячеек современных электролизных установок находится в пределах 50000–80000 часов. Выбираем среднее значение — 65000 часов. Общий срок службы электролизера составляет 20 лет.

### 4.6. Удельные энергетические затраты на производство водорода

В большинстве источников в качестве удельных энергетических затрат указывается расход энергии непосредственно на электролиз. Это значение для современных электролизеров лежит в диапазоне 47–66 кВт·ч/кг H<sub>2</sub> [5, 8, 10, 13]. При этом, как правило, не учитывают расход энергии на систему в целом. Более детальное рассмотрение электролизной установки с учетом вспомогательных систем приводит к диапазону характеристик 50–83 кВт·ч/кг H<sub>2</sub> [8, 15–17]. Для оценок примем среднее значение — 66.5 кВт·ч/кг.

## 5. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧАЕМОГО МЕТОДОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ «БЕЗУГЛЕРОДНОГО» АЛЮМИНИЯ

### 5.1. Производство «безуглеродного» алюминия с использованием инертных анодов

Для получения «зеленого» водорода целесообразно организовать производство алюминия с минимальным «углеродным следом». Этого можно достигнуть, используя технологию инертных анодов и безуглеродные источники электроэнергии — ГЭС, АЭС. Использование инертных анодов для электролиза алюминия безусловно не является новой идеей. Впервые она была сформулирована Чарльзом Мартином Холлом в его знаменитом патенте 1886 года. В текущих условиях основным преимуществом инертных анодов является их экологичность. Предполагается, что использование в электролизе алюминия инертных анодов устранил выбросы окиси углерода и перфторуглеродных газов ( $CF_4$  и  $C_2F_6$ ). Кроме того, будут исключены выбросы фтора и пыли во время замены анодов. В идеале исчезают все затраты, напрямую связанные с производством угольных анодов. Эта экономия может быть значительной, достигая 25–30% [18, 19].

ОК РУСАЛ в настоящее время является единственной в мире компанией, которая имеет опыт промышленного производства алюминия с использованием инертных анодов [1]. Предполагается, что затраты на производство инертных анодов выше, чем затраты на производство угольных анодов. Расход электроэнергии на электролиз с использованием инертных анодов также несколько выше, чем в процессе Холла–Эру. С другой стороны, ресурс инертных анодов существенно больше, чем ресурс их угольных аналогов. Расчеты показывают, что в целом суммарные затраты электроэнергии и текущие расходы при эксплуатации анодов в обоих процессах могут оказаться примерно одинаковыми. Исходя из этого утверждения и ввиду отсутствия детальной информации о технико-экономических характеристиках электролиза с инертными анодами, в последующих расчетах мы будем использовать хорошо известные данные для процесса Холла–Эру.

### 5.2. Капитальные затраты

Капитальные затраты для запущенного РУСАЛом в 2021 г. Тайшетского алюминиевого завода составили 2 USD/кг Al в год [20], что эквивалентно 18 USD/кг  $H_2$  в год.

### 5.3. Эксплуатационные затраты

Структура эксплуатационных расходов при производстве алюминия опубликованы в отчетах ОК РУСАЛ [21] и в работах [18, 22–25]. Эти данные позволяют оценить затраты на производство алюминия с учетом возврата гидроокиси алюминия в производственный цикл.

Зарплата персонала в РФ — 0.068 USD/кг Al или 0.62 USD/кг  $H_2$  [21]. Расходы на аноды, криолит и фторид алюминия ( $Na_3AlF_6$  и  $AlF_3$ ) составляют 0.11 USD/кг Al или 1.02 USD/кг  $H_2$  [18, 23, 24].

### 5.4. Стоимость вспомогательных систем и дополнительных технологических переделов

По данным [26–28] суммарные затраты на:  
- диспергирование Al (изготовление порошка) оценивается в 0.019 USD/кг Al или 0.18 USD/кг  $H_2$ ;  
- кальцинация гидроокиси алюминия — 0.01 USD/кг Al или 0.09 USD/кг  $H_2$ ;  
- затраты на реактор ГТОА составляют 0.33 USD/кг  $H_2$  для установки производительностью 72 т  $H_2$ /год. Капитальные затраты оцениваются величиной 300 USD/кВт тепловой мощности, срок эксплуатации около 40 лет. Оценки выполнены на основе результатов представленных в [29, 30].

Стоимость умягченной воды (12 кг воды на 1 кг водорода) и охлаждающей оборотной воды незначительна, и поэтому не учтена в расчете.

### 5.5. Капитальные затраты на компрессорное оборудование (промежуточное сжатие до давления 5 Мпа)

Реакция гидротермального окисления алюминия в реакторе ГТОА происходит при давлении 14–16 МПа. После конденсации пароводородной смеси (разделение воды и водорода) остаточное давление водорода составляет 6 МПа [28]. Соответственно, затраты на компрессорное оборудование для промежуточного сжатия водорода до давления 5 МПа отсутствуют.

### 5.6. Ресурс оборудования

Период эксплуатации алюминиевого завода оценивается величиной не менее 40 лет [18]. Ресурс оборудования для кальцинации гидроокиси алюминия и диспергирования алюминия учтен в расчетах в параграфе «Стоимость вспомогательных систем и дополнительных технологических переделов».

### 5.7. Удельные энергетические затраты на производство водорода

Для современных алюминиевых заводов расход энергии на электролиз составляет 12.5–14 кВт·ч/кг Al [18, 21, 22] или не более 127 кВт·ч/кг  $H_2$ . Установка ГТОА является энергонезависимой системой. Расходы электроэнергии на собственные нужды составляют около 1% от тепловой мощности реактора ГТОА и могут быть покрыты за счет преобразования теплоты реакции гидротермального окисления Al (см. ниже).

### 5.8. Результаты оценок производственных затрат без учета расходов на компримирования водорода до давления 90 Мпа

Значения стоимости килограмма водорода, полученного с помощью электролизера и ГТОА, в зависимости от цены электроэнергии, приведены в таблице 1. Результаты расчетов показывают, что гидротермальный

Таблица 1. Сравнение стоимости производства

Цена электроэнергии, USD/кВт	Электролиз воды, USD/кг $H_2$	$H_2$ ГТОА, USD/кг $H_2$
0.10	10.82	16.80
0.03	6.16	7.11
0.01	4.83	4.34

метод получения водорода в экономическом плане более чувствителен к цене электроэнергии и дает больший выигрыш при использовании дешевой электроэнергии (менее 0.03 USD/кВтч), что вполне достижимо при использовании электроэнергии АЭС или ГЭС.

## 6. КОМПРИМИРОВАНИЕ ВОДОРОДА ДО ДАВЛЕНИЯ 90 МПА

Одним из существенных недостатков водорода в качестве энергоносителя является его низкая плотность. Поэтому в большинстве приложений требуется его компримирование, что позволяет эффективно хранить и транспортировать водород. Для этой цели традиционно используются механические компрессоры, что значительно увеличивает стоимость водорода. Применяемые в настоящее время в промышленности механические компрессоры водорода (поршневые, мембранные) имеют ряд недостатков: сложность конструкции, недостаточная надежность, высокая стоимость обслуживания, вероятность утечки водорода и загрязнения водорода маслом, сильный шум и вибрация при работе.

По данным NREL [31] стоимость компримирования составляет до 70% общей стоимости доставки, хранения и выдачи («compression, storage and dispensing», CSD) водорода на выходе из заправочной станции, как в сценарии доставки водорода по трубе, так и при распределенном производстве водорода на месте. При этом практические значения затрат электроэнергии на сжатие на существующих пилотных водородных заправочных станциях, например, Linde Engineering, составляют 1.3–4.0 кВт·ч/кг при давлениях до 90.0 МПа [13, 32].

Альтернативой механическим компрессорам является металлгидридный термосорбционный компрессор водорода (ТСКВ), принцип действия которого основан на обратимом взаимодействии металлов или сплавов с водородом. Металлогидридный компрессор представляет собой систему компримирования, которая включает в себя модули с металлгидридом, устройства для их нагрева и охлаждения, распределительные газопроводы с запорно-регулирующей арматурой, систему контроля и управления. Основным преимуществом данной системы является использование низкпотенциального тепла вместо электроэнергии, что существенно удешевляет процесс. Дополнительно можно отметить возможность создания высокого давления нагнетания (свыше 100 МПа), масштабируемость, модульную конструкцию, простоту в ремонте и обслуживании, высокую чистоту компримированного водорода. К тому же в металлгидридном компрессоре нет движущихся частей, что упрощает конструкцию, повышает надежность и обеспечивает снижение шума и вибрации. Использование ТСКВ наиболее эффективно совместно с гидротермальной установкой окисления алюминия, поскольку последняя может служить источником низкпотенциального тепла.

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ТСКВ (90 МПА)

Характеристики двухступенчатого ТСКВ, предназначенного для работы совместно с ГТОА, приведены в таблице 2. Схема состоит из двух ступеней по два реактора, работающих попеременно на сорбцию/десорбцию

водорода [33]. Охлаждение осуществляется хладагентом с комнатной температурой, а нагрев — теплоносителем (пропиленгликоль), предварительно подогретым в соответствующем парогазовом теплообменнике ГТОА до температуры 450 К. Для дополнительной очистки водорода возможна периодическая эвакуация свободного газового объема сорбирующего реактора. Для этого может быть предусмотрена отдельная сбросная линия, управляемая электроклапаном. Первая ступень низкого давления основана на использовании интерметаллида семейства  $LaNi_5$  а вторая ступень — на основе сплавов типа  $TiCr_{1.5}Mn_{0.25}Fe_{0.25}$  [33, 34].

**Таблица 2.** Характеристики ТСКВ, сопряженного с установкой ГТОА, производительностью 70 тонн/год.

№	Параметр	Значение
1	Гидридообразующий материал	AB5 на основе $LaNi_5$ и AB2 на основе $TiCr_{1.5}Mn_{0.25}Fe_{0.25}$
2	Тепловой эффект реакции гидрирования, кДж/моль	19–40
3	Массовый расход водорода, кг/с	0.00225
4	Объемный расход водорода, норм. м <sup>3</sup> /с	0.0252
5	Давление на входе в I ступень ТСКВ, МПа	6.0
6	Давление на выходе из I ступени ТСКВ, МПа	15.0
7	Давление на входе в II ступень ТСКВ, МПа	15,0
8	Давление на выходе из II ступени ТСКВ, МПа	100
9	Состав водорода, об. доли	$H_2O$ — $2,401 \times 10^{-4}$ $H_2$ — 0.9998
10	Мощность тепловыделения при сорбции, кВт	до 45 в I ступени, до 22 во II ступени
11	Характерное время единичного цикла сорбции, с	600
12	Характерное время единичного цикла десорбции, с	600
13	Максимальное содержание водорода в металлгидриде I ступени, масс. доли	0.0135
14	Максимальное содержание водорода в металлгидриде II ступени, масс. доли	0.015
15	Масса металлгидрида I ступени, не менее, кг	200
16	Масса металлгидрида II ступени, не менее, кг	180
17	Расход теплоносителя (450 К, теплоемкость 2.2 кДж/кг·К), кг/с	0.6
18	Расход хладагента (298 К, теплоемкость 2,2 кДж/кг·К), кг/с	0.6
19	Ресурс, ч	65 000

Оценка капитальных затрат на создание ТСКВ, основанная на опыте создания металлгидридных реак-

торов, накопленном в ОИВТ РАН, данных о биржевых ценах на чистые металлы [35], а также ценах на гидридообразующие сплавы представлена в таблице 3.

**Таблица 3.** Оценка капитальных затрат на создание ТСКВ.

Компонента	Кол-во, параметры	USD
1 Гидридообразующий сплав I ступени	200 кг	10 000
2 Гидридообразующий сплав II ступени	180 кг	5 400
3 Металлогидридные реакторы	300% от п. 1+п. 2	46 200
4 Газовая арматура	20% от п. 3	9 240
5 Системы нагрева и охлаждения, включая парожидкостный теплообменник	10% от п. 3	4 620
6 Система управления	10% от п. 3	4 620
	Итого	80 080

Операционные расходы ТСКВ связаны главным образом с затратами электроэнергии на прокачку теплоносителя/хладагента и энергообеспечение системы управления. Поскольку необходимо обеспечить два непрерывных потока, как теплоносителя, так и хладагента, в системе необходимо установить два циркуляционных насоса. Суммарная мощность подобных низконапорных насосов не превысит 400 Вт, таким образом с учетом затрат на АСУ ТП принята 1 кВт. В таблице 4 представлено сравнение технических и стоимостных характеристик ТСКВ и механического компрессора по данным [34] с учетом экстраполяции производительности последнего до параметров ТСКВ.

**Таблица 4.** Предварительные характеристики ТСКВ, сопряженного с установкой ГТОА производительностью 70 тонн/год на давление 100 МПа в соответствии с [36].

№	Параметр	ТСКВ	Механический компрессор
1	Объемный расход водорода	90.7 норм м <sup>3</sup> /ч	90.7 норм м <sup>3</sup> /ч
2	Давление на входе	60 бар	60 бар
3	Давление на выходе	1 000 бар	1 000 бар
4	Количество ступеней	Не менее 2	3
5	Масса металлогидрида, не менее	360 кг	-
6	Общая масса, не более	800 кг	5 760 кг
7	Объем системы	200 л	9 600 л
8	Расход горячего теплоносителя (450 К)	0.6 кг/с	0.001 кг/с
9	Расход хладагента	0,6 кг/с	0,033 кг/с
10	Требуемая тепловая мощность	67 кВт	-
11	Электрическая мощность	1 кВт	20 кВт
12	Капитальные затраты, оценка (в мелкой серии)	80 080 USD	145 000 USD
13	Операционные затраты, оценка	1 000 USD	8 000 USD

## 8. РАСЧЕТЫ ЗАТРАТ НА КОМПРИМОВАНИЕ

Расчет затрат на компримирование водорода с помощью ТСКВ и механического компрессора аналогичной производительности, в зависимости от цены электроэнергии, приведен в таблице 5.

**Таблица 5.** Сравнение стоимости компримирования.

Цена электроэнергии, USD/кВт·ч	Механический компрессор, USD/кг H <sub>2</sub>	ТСКВ, USD/кг H <sub>2</sub>
0.10	0.527	0.166
0.03	0.352	0.158
0.01	0.285	0.156

Стоимость компримирования с помощью традиционного компрессора существенно выше, чем посредством ТСКВ, и в обоих случаях имеет сопоставимую чувствительность к изменению цены электроэнергии.

## 9. ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения стоимости водорода, полученного с помощью электролизера и ГТОА с учетом компримирования, в зависимости от цены электроэнергии, приведены в таблице 6.

**Таблица 6.** Сравнение итоговой стоимости производства водорода.

Цена электроэнергии USD/кВт·ч	Электролиз воды + компримирование механическим компрессором USD/кг H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> ГТОА + компримирование ТСКВ, USD/кг H <sub>2</sub>
0.10	11.34	16.97
0.03	6.51	7.27
0.01	5.11	4.49

Расчет показал, что преимущество гидротермального способа получения водорода из алюминия по сравнению с электролизом воды при низкой стоимости электроэнергии увеличивается при учете затрат на компримирование.

## 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленных выше расчетов показывают, что стоимость водорода, полученного электролизом воды, и стоимость водорода, полученного методом гидротермального окисления алюминия, оказываются сопоставимыми, если цена электроэнергии в регионах производства энергоносителей находится на уровне 1–3 цента за кВт·ч. При цене электроэнергии ниже двух центов за кВт·ч, водород, полученный методом гидротермального окисления алюминия, оказывается дешевле, чем водород, полученный методом электролиза воды.

Экономические показатели гидротермального метода более чувствительны к цене электроэнергии. Данная ситуация обусловлена тем, что суммарный расход энергии при производстве водорода методом ГТОА выше, чем для электролиза воды, а приведенные капиталь-

ные затраты ниже для технологии ГТОА. Отсюда следует, что производство водорода по технологии ГТОА целесообразно в регионах, где имеется или может быть создано производство алюминия, использующее дешевую электроэнергию, получаемую, например, на крупных ГЭС или АЭС. При этом непосредственно на месте производства водорода наличие развитой энергетической инфраструктуры не требуется. К месту производства водорода алюминий может доставляться любым видом наземного или водного транспорта.

Тепло, выделяющееся в реакции гидротермального окисления алюминия, целесообразно использовать для компримирования водорода, что повышает энергоэффективность процесса.

Низкая стоимость реактора ГТОА, его энергонезависимость, а также возможность получения сжатого водорода в едином технологическом цикле делает технологию ГТОА привлекательной при создании локальных источников водорода в районах со слаборазвитой энергетической инфраструктурой, например, сети станций для заправки водородного транспорта, а также на объектах, где необходимо экологически чистое совместное производство тепловой и электрической энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 2020 РУСАЛ начал испытания электролизера с инертными анодами нового поколения. Аргументы и факты: Красноярск URL [https://krsk.aif.ru/money/rusal\\_nachal\\_ispytaniya\\_elektrolizera\\_s\\_inertnymi\\_anodami\\_novogo\\_pokoleniya](https://krsk.aif.ru/money/rusal_nachal_ispytaniya_elektrolizera_s_inertnymi_anodami_novogo_pokoleniya)
2. Padamata S K, Yasinskiy A S and Polyakov P V 2018 *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* **1** 18–30
3. Предложение о регулируемых тарифах на электроэнергию АЭС: URL <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/b69/b69622e1a7ccb0b4b8807ce3e4eff637.pdf>
4. Рус Гидро. Годовой отчет за 2019 г. url: URL <http://ar2019.rushydro.ru/sections/index.html>
5. Christensen A 2020 Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United states and europe. final release URL [https://theicct.org/sites/default/files/icct2020\\_assessment\\_of\\_hydrogen\\_production\\_costs\\_v1.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/icct2020_assessment_of_hydrogen_production_costs_v1.pdf)
6. Dashboard for energy prices in the eu and main trading partners URL <https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-prices-and-costs/energy-prices-eu-member-states-and-main-trading-partners-en>
7. Ereev S and Patel M 2012 *Journal of Business Chemistry* **9** 31–48
8. 2020 Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5 oc climate goal URL <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
9. Mayyas A, Ruth M, Pivovar B, Bender G and K W Manufacturing cost analysis for proton exchange membrane water electrolyzers *NREL/TP-6A20-72740*
10. Schmidt O, Gambhir A and Staffell I e a 2017 *Int J. of Hydrogen Energy* **42** 30470–30492
11. Glenk G and Reichelstein S 2019 *Nature Energy* **4** 216–222
12. Brynolf S e a *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
13. Penev M, Zuboy J and Hunter C Economic analysis of a high-pressure urban pipeline concept (hylene) for delivering hydrogen to retail fueling stations, in: Transportation research part d: Transport and environment 77 pp. 92-105
14. 2008 H2a hydrogen delivery infrastructure analysis models and conventional pathway options analysis results. interim report *DE-FG36-05GO15032* (US Department of Energy Washington DC)
15. Hystat hydrogen generators. hydrog(e)nic: Advanced hydrogen solutions URL <https://www.h2gentec.com/pdf/generators-hystat-10.pdf>
16. High capacity hydrogen systems m series pem electrolyzers URL [https://www.protononsite.com/sites/default/files/2016-10/pd-0600-0115\\_rev\\_a%20%281%29.pdf](https://www.protononsite.com/sites/default/files/2016-10/pd-0600-0115_rev_a%20%281%29.pdf)
17. Ivy J Summary of electrolytic hydrogen production: Milestone completion report *Preprint*
18. Kvande H and Drablos P A 2014 *JOEM* **56** S23–S32
19. Thonstad J, Fellner P and Haarberg G M e a 2001 *Aluminium Electrolysis – Fundamentals of the Hall-Heroult Process* 3rd ed (Dusseldorf, Germany: Aluminium-Verlag, Marketing and Kommunikation GmbH)
20. Обухова Е За секунду до алюминия. Как райцентр в Иркутской области готовится к запуску нового завода // Интернет-издание «Эксперт» URL <https://expert.ru/expert/2021/13/za-sekundu-do-alyuminiya/>
21. Uscusal financial results presentation. 1h2020. 13.08.2020 URL <https://rusal.ru/en/investors/financial-stat/presentations/>
22. Александров А В и Немчинова Н В 2020 *Вестник Иркутского государственного технического университета* **24** 408–420
23. Yang S and Knickle H 2002 *Journal of Power Sources* **112** 162–173
24. Борисоглебский Ю В, Галевский Г В и Кулагин Н М et al 1999 *Металлургия алюминия* (Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН)
25. ООО ТК Промреагент. Пульс цен: Челябинск URL [https://www.xn--80agec5akbhjcl1a.xn--pp1ai/goods/3164591-kriolit\\_tekhnicheskii\\_40kg](https://www.xn--80agec5akbhjcl1a.xn--pp1ai/goods/3164591-kriolit_tekhnicheskii_40kg)
26. Волочко А, Овчинников В и Садоха М 2012 *Наука и инновации* **115-9** 12–14
27. Шишкин С Ф 2015 *Новые огнеупоры* **4** 12–15
28. Vlaskin M S, Shkolnikov E I and Zhuk A Z e a 2011 *Journal of Power Sources* **196** 8828–8835
29. Власкин М С, Школьников Е И, Берш А В, З Жук А, Лисицын А В, Сороковиков А И и Панкина Ю В 2011 *Известия Российской академии наук. Энергетика*
30. Grigorenko V, Shkolnikov E I, Zhuk A Z and Vlaskin M S 2018 *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **381** 012049, url=doi:10.1088/1757-899X/381/1/012049
31. Parks G, Boyd R, Cornish J and Remick R 2014 Hydrogen station compression, storage, and dispensing. technical status and costs *Independent Peer Review Team NREL. Technical Report NREL/BK-6A10-58564* (NREL Technical Monitor: Neil Popovich)
32. Linde hydrogen fueltech – driving the future of mobility. linde engineering. url=<https://www.linde-engineering.com/en/plant-components/hydrogen-fueling-technologies/index.html>
33. Lototskiy M V, Yartys V A, Pollet B G and Bowman R C J 2014 *International journal of hydrogen energy* **39** 5818–5851
34. Wang X, Liu H and Li H *International Journal of Hydrogen Energy* **36**(15)
35. ООО ПО «Трубное Решение Екатеринбург» URL <https://potreb.pulscen.ru/>
36. Stamatakis E, Zoulias E, Tzamalidis G, Massina Z, Analytis V, Christodoulou C and Stubos A 2018 *Renewable Energy* **127** 850–862